

УДК 629.7.035.7:681.2.087

О.В. Дергунов, А.Р. Деменко, А.В. Залевська, К.В. Фостенко

Національний авіаційний університет, Київ

## КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ГВИНТОМОТОРНОЇ УСТАНОВКИ ЛЕГКИХ БЕЗПІЛОТНИХ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

*Розглянуто задачу розробки комп'ютеризованого стенду для випробування гвинтомоторної установки на основі безколекторних електричних двигунів, що використовуються в легких безпілотних повітряних суднах як літакового, так і мультироторного типу. Представлено загальну структуру стенду, його вимірювальних каналів та розглянуто його практичну реалізацію.*

**Ключові слова:** комп'ютеризований стенд, випробування гвинтомоторної установки, вимірювальний канал, вимірювальна система.

### Вступ

**Постановка задачі та аналіз досліджень.** Сучасні легкі безпілотні повітряні судна (БПС) – прості, надійні, компактні та багатоцільові апарати. Вони знайшли своє застосування в багатьох галузях господарства: від екологічного моніторингу та вирішення спеціальних задач агросектору [1; 2] до охорони громадянського порядку та персональних засобів фото та відео аерозйомки. За останні п'ять років мультироторні БПС, або як їх ще називають «дрони», увійшли в повсякденний інструментарій спеціалістів різних профілів. Такі БПС допомагають проводити енергетичний аудит будівель, термомоніторинг стану лінії електропередач, є обов'язковим інструментом сучасного відеооператора тощо. Це стало можливим завдяки появі на ринку готових та відносно недорогих, комерційних продуктів, переважно виробництва компанії DJI [3]. В лінійці цієї компанії є багато різних продуктів, які можуть задовольнити потреби багатьох різних галузей. Разом з цим для вирішення специфічних задач виникає потреба розробки власних рішень. Особливо це є актуальним для наукової та інженерно-конструкторської галузей. Незалежно від конструкційного виконання одним з обов'язкових елементів БПС є його гвинтомоторна установка, яка в багатьох випадках для легких БПС складається з безколекторного електричного двигуна (БКЕД), контролеру обертів двигуна (КО) та пропелеру. Параметри гвинтомоторної установки впливають на всі експлуатаційні характеристики БПС. Слід зазначити, що далеко не всі БКЕД супроводжуються детальною технічною документацією. Серед характеристик БКЕД в документації зазвичай зазначається параметр швидкості обертів без навантаження (без пропелера), сумісні напруги акумуляторної батареї (АКБ), проте не завжди зазначені типи сумісних пропелерів та відповідні рівні тяги [4].

При плануванні експлуатаційних можливостей БПС важливу роль відіграє проектування гвинтомоторної установки, а саме – планування необхідного рівня тяги, струмоспоживання, швидкості польоту тощо. Широко розповсюдженим є розрахунок таких параметрів з використанням спеціалізованих калькуляторів, база даних яких охоплює різних виробників елементів гвинтомоторної установки [5]. Проте, слід зазначити, що результати розрахунків не завжди збігаються з дійсними через неідентичність параметрів БКЕД або пропелерів з різних партій навіть одного виробника, а також наявності на ринку великої кількості елементів, що не включені в такі бази даних. В цьому випадку найбільш правильним рішенням є експериментальне випробування гвинтомоторної установки з метою встановлення її характеристик та граничних можливостей.

Найбільш важливими характеристиками гвинтомоторної установки є:

- тяга;
- швидкість обертів БКЕД;
- струмоспоживання.

Для забезпечення правильної експлуатації установки необхідно впевнитися, що температури БКЕД та КО не виходять за безпечні межі для усіх режимів їх роботи на всіх рівнях тяги.

Отже, стенд для випробування гвинтомоторної установки повинен контролювати такі параметри:

- тягу, з номінальним значенням 2 кг та роздільною здатністю 0,05 кг;
- швидкість обертів БКЕД, з номінальним значенням 40000 об/хв;
- струмоспоживання установки, з номінальним значенням 30 А;
- температуру БКЕД;
- температуру КО.

**Метою роботи** є розробка комп'ютеризованого стенду для проведення випробувань гвинтомоторних установок легких БПС із можливістю контролю

зазначених параметрів, представлення структурних схем стенду, його вимірювальних каналів, їх практичної реалізації, а також спеціалізованого програмного забезпечення для персонального комп'ютера (ПК).

### Основна частина

Для вирішення поставлених задач запропоновано загальну структуру комп'ютеризованого стенду (рис. 1), яка складається з вимірювальних каналів (ВК) швидкості обертів електричного двигуна, його температури, тяги, температури контролера обертів двигуна та його струмоспоживання. Інформація з вимірювальних каналів поступає до мікроконтролера (МК), який виконує задачі керування режимом роботи електричного двигуна, відображення поточних результатів відповідних вимірювань на дисплеї та передачі всіх поточних даних на персональний

комп'ютер із спеціалізованим програмним забезпеченням (ПЗ).

В якості центрального мікроконтролера обрано 8-бітний мікроконтролер Atmega 328p, з тактовою частотою 16 МГц по причині достатніх можливостей для вирішення поставлених задач (кількість портів вводу/виводу, наявність 8 портів АЦП, наявність апаратних контролерів I2C, SPI, UART) та великої кількості бібліотек для роботи з різною периферією, що значно спрощує розробку мікропрограмного забезпечення. Мікроконтролер підключається до ПК за допомогою інтерфейсу UART з використанням перетворювача UART/USB. В якості дисплею використано популярний монохромний рідкокристалічний дисплейний модуль NOKIA 5110 з діагоналлю 1,6 дюйма та роздільністю 84×84 пікселів.

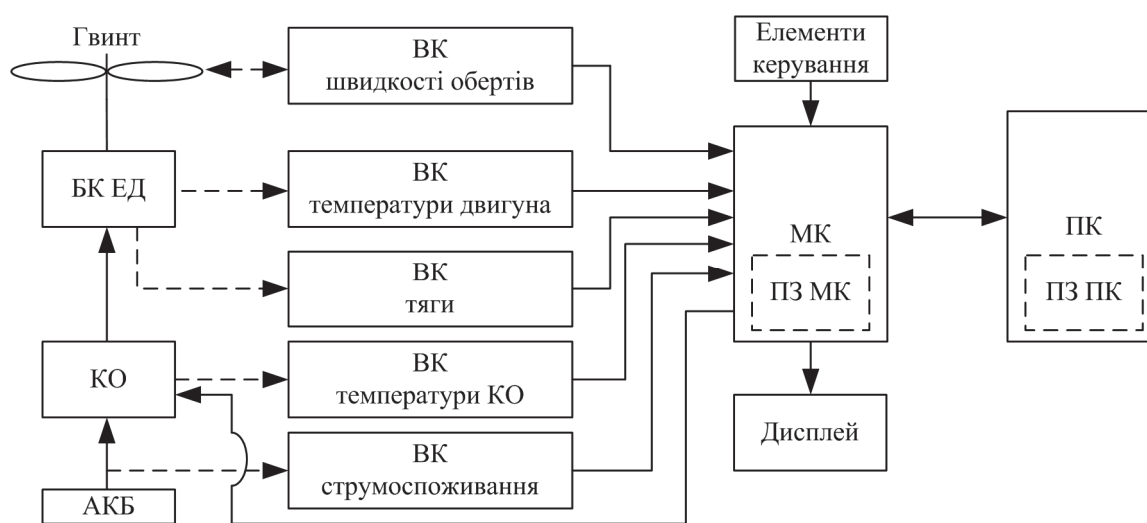


Рис. 1. Структурна схема комп'ютеризованого випробувального стенду

Основний режим роботи стенду передбачає обов'язкове підключення до ПК та спеціалізованого програмного забезпечення, в якому відображаються поточні результати вимірювань, часові реалізації усіх вимірювальних сигналів за останню сесію роботи стенду, керування швидкістю обертів двигуна, а також дозволяє встановлювати граничні значення вимірювальних величин, за яких спрацьовує аварійне вимкнення двигуна.

Наприклад, при наближенні струму до максимальних значень, за яких може працювати АКБ або КО, швидкість обертів двигуна автоматично знижується.

Можливе використання стенду без підключення до ПК. В цьому випадку задавати швидкість обертів двигуна можна за допомогою відповідних елементів керування, а зчитувати результати вимірювань з дисплею. Проте, в цьому випадку не можливо задати порогові значення контрольованих величин, тому необхідно уважно слідкувати за показами стенду.

Вимірювальні канали спроектовані з використанням сучасних датчиків та інтегральних пристроїв узгодження, переважно з цифровими інтерфейсами. На рис. 2 представлена структурна схема вимірювального каналу швидкості обертів електричного двигуна, а на рис. 3 – функціональна схема датчика та його пристрою узгодження.

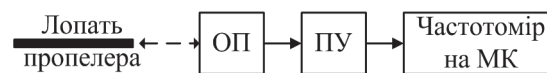


Рис. 2. Структурна схема вимірювального каналу швидкості обертів двигуна

Основою ВК швидкості обертів двигуна є оптопара (ОП) відкритого типу, яка відслідковує оберт лопаті пропелера. Сигнал з оптопари подається на компаратор, де порівнюється із граничним значенням заданим потенціометром. Прямокутні імпульси з виходу компаратора поступають на вхід МК для вимірювання їх частоти за допомогою вбудованих таймерів/лічильників.

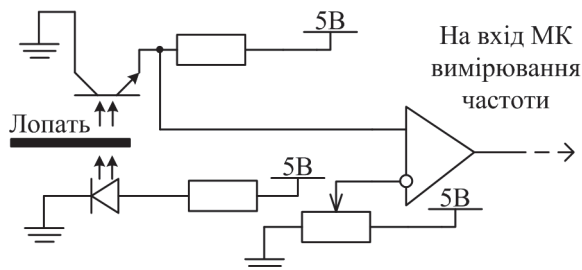


Рис. 3. Функціональна схема пристрою узгодження вимірювального каналу швидкості обертів двигуна

Реалізований на мікроконтролері частотомір перевірено шляхом безпосереднього зіставлення його показів з показами лабораторного частотоміру (клас точності 0,01) для імпульсного сигналу поданого з лабораторного генератора імпульсів. Похибка реалізованого частотоміру не перевищувала 0,1% в діапазоні частот 40...500 Гц.

Вимірювальний канал температури двигуна (рис. 4) складається з інтегрального безконтактного датчика температури MLX90614, похибка якого в необхідному діапазоні температур не перевищує 0,5°C. Датчик має цифровий інтерфейс зв'язку з МК, тобто не потребує додаткового пристрою узгодження.

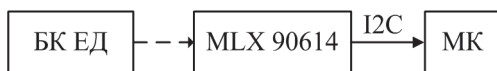


Рис. 4. Структурна схема вимірювального каналу температури двигуна

Принцип вимірювання тяги гвинтомоторної установки полягає у використанні тензомодуля YZC-133. Умовна схема конструкційного виконання стенду, що пояснює спосіб вимірювання тяги представлена на рис. 5.

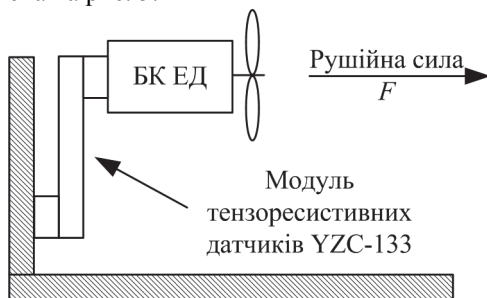


Рис. 5. Умовна схема конструкції стенду

Вимірювальний канал тяги (рис. 6) складається з модуля тензоперетворювача YZC-133 та інтегрального пристрою узгодження для роботи з датчиками ваги – HX711. Модуль тензоперетворювача складається з чотирьох тензорезистивних датчиків, об'єднаних за схемою моста Уїтстона. Такі модулі використовуються в побутових електронних вагах та випускаються на різні номінальні значення діапазону. В роботі використаний модуль з номінальним значенням ваги 2 кг, номінальним коефіцієнтом перетворення  $1,0 \pm 0,15$  мВ/В та сумарною похибкою,

що не перевищує 1,5%. Для узгодження сигналів тензомодуля застосовується інтегральний пристрій узгодження HX711, який представляє собою спеціалізоване 24-бітне АЦП з низьким рівнем шуму, двома диференційними входами для діапазонів  $\pm 20$  мВ та  $\pm 40$  мВ (вибирається програмно) та цифровим вихідним інтерфейсом SPI для підключення до МК.



Рис. 6. Структурна схема вимірювального каналу тяги

Калібрування каналу тяги виконувалося шляхом вимірювання ваги еталонних гир за загальноприйнятою методикою калібрування електронних ваг. В результаті калібрування визначено, що зведена похибка каналу не перевищує 2%, що задовольняє поставлені вимоги.

Вимірювання температури контролера обертів двигуна можна виконати контактним способом за допомогою термоелектричного датчика – термопари типу К. Вимірювальний канал температури КО (рис. 7) складається з власне термопари типу К та інтегрального пристрою узгодження – MAX 31855.



Рис. 7. Структурна схема вимірювального каналу температури контролера обертів

Перетворювач MAX 31855 забезпечує узгодження сигналів термопари в широкому діапазоні вимірюваних температур ( $-200^{\circ}\text{C} \dots +1350^{\circ}\text{C}$ ), має вбудований модуль компенсації температури холодного спаю, 14-бітний АЦП, який забезпечує роздільну здатність  $0,25^{\circ}\text{C}$  та цифровий інтерфейс SPI для підключення до МК.

Оцінку поточного струмоспоживання електричним двигуном можна за допомогою датчика струму на ефекті Холла – ACS712. Даний датчик випускається в різних версіях під різні номінальні значення струму. В роботі використаний датчик із номінальним струмом 30 А. Структурна схема вимірювального каналу наведена на рис. 8.

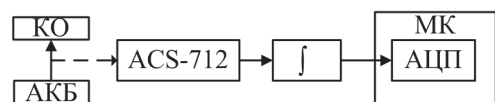


Рис. 8. Структурна схема вимірювального каналу струмоспоживання

Враховуючи імпульсний та швидкозмінний характер струмоспоживання БК ЕД, необхідно вимірювати діюче значення сигналу на виході датчика струму. Для цього в схемі використано інтегратор.

Представлені вимірювальні канали підключаються до МК за допомогою відповідних цифрових інтерфейсів. Програма МК виконує наступні функції:

1. Опитування вимірювальних каналів для отримання нових значень контрольованих величин.
2. Вивід отриманих даних на дисплей.
3. Передача отриманих даних на ПК.
4. Прийом сигналів керування з ПК або елементів керування стенду.
5. Подача сигналів керування на контролер обертів двигуна.

Спеціалізоване програмне забезпечення випробувального стенду розроблене з використанням технологій National Instruments LabVIEW. Його структура наведена на рис. 9.

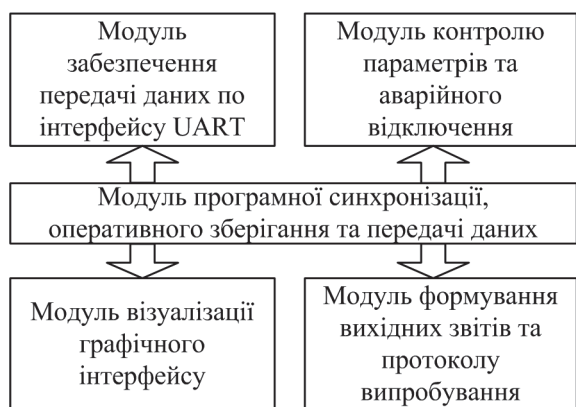


Рис. 9. Структура спеціалізованого програмного забезпечення комп'ютеризованого стенду

На графічному інтерфейсі користувача відображаються поточні значення контрольованих параметрів, часові діаграми їх зміни упродовж останньої сесії роботи зі стендом, наявні індикатори перевищення певних граничних значень контрольованих величин та інструменти встановлення цих граничних значень. В ПЗ реалізовано функцію автоматизованого тестування гвинтомоторної групи та

формування вихідного протоколу випробування з наведенням визначених характеристик: залежності струму, швидкості обертів, тяги від відносного рівня тяги, що задається на КО в діапазоні 0–100%.

## Висновки

В ході даної роботи розроблено комп'ютеризований стенд, який дозволяє визначати тягу гвинтомоторної установки, температури ключових її елементів, швидкість обертів двигуна та його струмоспоживання, що є необхідним при проектуванні легких безпілотних повітряних суден. За допомогою представленого стенду можливо оцінювати характеристики різних моделей безколекторних електричних двигунів, підбирати для них оптимальний пропелер, оцінювати час польоту БПС. Це особливо актуально в умовах обмеженої інформації про двигун в його технічній документації.

## Список літератури

1. Chabot D. *Small unmanned aircraft: precise and convenient new tools for surveying wetlands* / D. Chabot, D.M. Bird // *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. – 2013. – No. 01. – P. 15-24.
2. Babak S. *Radiation monitoring of environment using unmanned aerial complex* / S. Babak // *The Advanced Science Journal*. – 2014. – Issue 12. – P. 41-44.
3. DJI – *The Future of Possible* [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.dji.com>.
4. DJI – *E305 characteristics* [Electronic resource] – Access mode: <http://www.dji.com/e305/spec>.
5. *eCalc-xCopterCalc* [Electronic resource] – Access mode: <http://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php>
6. *Винтомоторная группа. Практические советы и расчеты* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.parkflyer.ru/ru/blogs/view\\_entry/454/](http://www.parkflyer.ru/ru/blogs/view_entry/454/).

Надійшла до редколегії 22.02.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. Л.М. Щербак, Національний авіаційний університет, Київ.

## КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВИНТОМОТОРНОЙ УСТАНОВКИ ЛЕГКИХ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А.В. Дергунов, А.Р. Деменко, А.В. Залевская, К.В. Фостенко

*Рассмотрена задача разработки компьютеризированного стенда для испытания винтомоторной установки на основе безколлекторных электрических двигателей, которые используются в легких беспилотных воздушных судах как самолетного, так и мультироторного типов. Представлена общая структура стенда, его измерительных каналов, а также рассмотрена его практическая реализация.*

**Ключевые слова:** компьютеризированный стенд, испытание винтомоторной установки, измерительный канал, измерительная система.

## COMPUTERIZED TEST BENCH FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES PROPELLER-ENGINE INSPECTION

O. Dergunov, A. Demenko, A. Zalevska, K. Fostenko

*The development of the computerized test bench for inspection of propeller-engine system of light unmanned aerial vehicles is presented. General structures of test bench and its measurement channels are shown.*

**Keywords:** computerized test bench, propeller-engine system inspection, the measurement channel, measurement system.