УДК 62-83:681.5

МЕХАТРОННА СИСТЕМА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ НА ПРИКЛАДІ МОДЕЛІ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ ТИПУ «ПЛАНЕР»

НАЗАРОВА О.С. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: nazarova16@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0784-7621;

КУЛИНИЧ Е.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kuliniched@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4415-4362;

БЕРЕЖНИЙ О.Ю. студент групи Е-312-2 кафедри електроприводу та автоматизації промислових установок Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: 8357238@gmail.com

Мета роботи. *Розробка мехатронної системи на прикладі моделі літального апарата типу «Планер» для вивчення та дослідження процесів керування ним.*

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

Отримані результати. *В ході дослідження було розглянуто та проаналізовано основні процеси керування планером: взаємодію органів керування пілота та діючих механізмів крила. Проведено аналіз недоліків та переваг існуючих розробок за досліджуваною тематикою з урахуванням питань мобільності, економічності, простоти і надійності виконання, а також можливості використання в якості навчального стенду. Розроблено лабораторний стенд у вигляді мехатронної системи на прикладі моделі літального апарата типу «Планер» для вивчення та дослідження процесів взаємодії органів керування та виконавчих механізмів польоту. Підключення програмно-апаратного комплексу здійснюється за допомогою інтерфейсу USB. Для обробки команд процесору та конвертації їх у рухи елеронів використано SOC платформу з мікроконтролером ArduinoUno. В якості інтерфейсу керування обрано джойстик Logitech Extreme 3D. З метою підвищення подібності до реальних систем передбачено певну затримку (інерцію) між моментом впливу оператора на джойстик та реакцією планера. Як матеріал моделі планера використано пінополістирол. Сервоприводи MG-90S та DS-37 використовуються для керування положенням рухомих частин моделі планера. Обертання планера здійснюється за допомогою двигуна 28BYJ-48. Розроблено програмне забезпечення, особливістю якого є легке налаштування та швидкий запуск лабораторного стенду. Передбачити можливість ведення журналу, який дозволить проводити аналіз дій оператора стенду. В результаті проведеного дослідження було визначено особливості керування планером та структуру механізмів, що забезпечують процес керування.*

Наукова новизна. *Запропоновано та розроблено мехатронну систему моделі літального апарату типу «Планер» на основі програмно-апаратного комплексу на базі ArduinoUno, який відрізняється від існуючих наявністю програми, яка забезпечує легке налаштування та швидкий запуск літального апарату, що дозволяє досліджувати взаємодію органів керування та виконавчих механізмів польоту.*

Практична цінність*. Розроблений лабораторний стенд на основі літального апарату типу «Планер» розширює можливості вивчення та дослідження електромеханічних процесів систем автоматичного керування складними мехатронними об'єктами.*

Ключові слова: мехатронна система, літальний апарат, планер, система керування, лабораторний стенд, моделювання, Arduino, C++.

I. ВСТУП

На сьогодні авіація є однією з найбільш широкоохоплюючих галузей оскільки вона пов'язує бізнес та людей у всіх куточках світу. Темпи її використання невпинно зростають незважаючи на економічні та політичні коливання в світі. Тим паче слід зауважити що останнім часом отримав високий розвиток напрямок використання безпілотних або дистанційно керованих літальних апаратів. Розширення галузі викликає потребу у розробці та виробництві нових, а також модифікації існуючих літальних апаратів, щоб задовільнити зростаючий попит. Процес розробки літальних апаратів потребує висококваліфікованих кадрів, висуває високі вимоги до виробничих потужностей, вимагає чималого фінансування. Через ці фактори відносно дуже мала кількість країн має повний цикл виробництва літальних апаратів. Під час проектування нового та оновлення вже існуючого обладнання особливо ретельно досліджують можливості впровадження електронних систем через те, що вони здатні істотно розширити функціональні можливості літального

©Назарова О.С., Кулинич Е.М., Бережний О.Ю. 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-2-5

апарату, підвищити зручність керування ним. Дослідження та розвиток авіоніки – це основа для розробки та виробництва сучасних, конкурентоспроможних літальних апаратів, які відповідатимуть актуальним функціональним вимогам. Однією зі складових авіоніки є задача забезпечення та поліпшення можливості керування літальним апаратом, а саме, підтримка зв'язку між органами керування, дієздатність та впровадження відмовостійкості усього функціоналу, який необхідний для здійснення керуванням.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛИКАЦІЙ

Мехатронна система літального апарату - це сукупність механічного та електричного обладнання, автоматики та програмної частини, яка забезпечує можливість виконувати польоти літака з високою надійністю та точністю. Система управління є комбінацію певної кількості пристроїв: датчиків, органів управління кабіною, приводів та програмно-обчислювальних складових тощо [1, 2]. Система управління польотом поділяється на дві підсистеми: первинну (кермо, елерони, стабілізатори) та вторинну відповідно. Вони забезпечують управління літальним апаратом під час польоту [3]. Розробка систем управління літальним апаратом відбувається дуже ретельно оскільки її надійність впливає безпосередньо на безвідмовну реакцію повітряного судна на дії пілотів. Керування літальним апаратом має певні специфічні особливості [4]. Зміна положення хоча б одного з основних елементів управління польоту (керма, стабілізатора або елеронів) впливає на розподіл тиску навколо крил та на напрям потоку набігаючого повітря. Це надає пілоту здатність управління у трьох осях оскільки впливає на повітряний опор і підйомну силу повітряного судна [5]. Правильність та ретельний прорахунок конструкції повітряного судна забезпечує легкість керування літаком під час маневрів і загальну стабільність у повітрі. Звісно що через певні конструкційні особливості є певні обмеження на діапазони відхилення для органів керування. Прикладом може виступати обмеження руху керма управління, щоб запобігти перенапруженню літака під час маневру [6]. У статті [7] досліджується надання безпілотним літальним апаратам планерного типу можливості автономної посадки. Якщо припустити, що літальний апарат оснащено будь-якою надійною системою вимірювання швидкості, такою як система глобального позиціонування або інерційний вимірювальний блок, може бути використана швидкість планера, щоб з високою точністю визначити його висоту під час посадки. Ця інформація стійка до різних умов зовнішнього освітлення та на різних типах текстурованої землі, що є важливою властивістю для контролю фази посадки літака. Забезпечення безпеки польоту дистанційно пілотованих авіаційних систем є складною проблемою через масовість такого роду об'єктів [8]. У документі [9] представлено комплексне проектування та метод перевірки літака та силової установки. Ідея полягає в тому, щоб перетворити модель системного рівня на стандартизовану архітектуру системи, яка містить структуру та обмеження. Таким чином, архітектура системи стає орієнтиром для проектування та перевірки на основі моделі літака. Ця робота [10] підкреслює переваги системного моделювання та симуляції для підтримки аналізу навантаження компонентів трансмісії (наприклад, приводів, моментних валів тощо) на етапі концептуального проектування. У статті [11] представлено метод моделювання, який об'єднує кілька ключових областей: динаміка польоту, керування польотом, керування двигуном, динаміка двигуна, вихлоп двигуна, шум літака, економія палива, планування польоту, що дозволяє дослідити відповідні показники ефективності.

Отже, ідея створення лабораторного стенду, який представляє собою мехатронну систему моделі літального апарату типу «Планер», для вивчення та дослідження процесів керування ним 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 [12].

III. МЕТА РОБОТИ

Провести аналіз недоліків та переваг існуючих розробок за досліджуваною тематикою з урахуванням питань мобільності, економічності, простоти і надійності виконання, а також можливості використання в якості навчального стенду. Розробити лабораторний стенд у вигляді мехатронної системи на прикладі моделі літального апарата типу «Планер» для вивчення та дослідження процесів керування ним. В якості інтерфейсу підключення стенду використовувати USB. Передбачити можливість ведення журналу, який дозволить проводити аналіз дій оператора стенду.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розробка методу взаємодії користувачів з системою. При проектуванні програмно-апаратного комплексу (ПАК) враховано особливості застосування у навчальному процесі [13, 14].До параметрів, адаптованих під користувача-початківця відносяться низький час на розгортання системи у робоче становище, ймовірність малої обізнаності кінцевого користувача (студента) в програмуванні, відмовостійкість до раптового вимкнення електроживлення та некоректного з'єднання компонентів [15,16]. Зміна та модернізація налаштувань лабораторного стенду була заборонена для користувачів комплексу і можлива лише з залучанням адміністратора комплексу (рис. 1, 2).

Розробка апаратної частини комплексу. Проведений аналіз складових модулів, з яких має складатись ПАК показав, що важливою частиною є мікроконтролерний модуль, що має забезпечувати зчитування даних з комп'ютеру, оброблювати його та формувати вихідний сигнал на безпосередньо модель планеру.

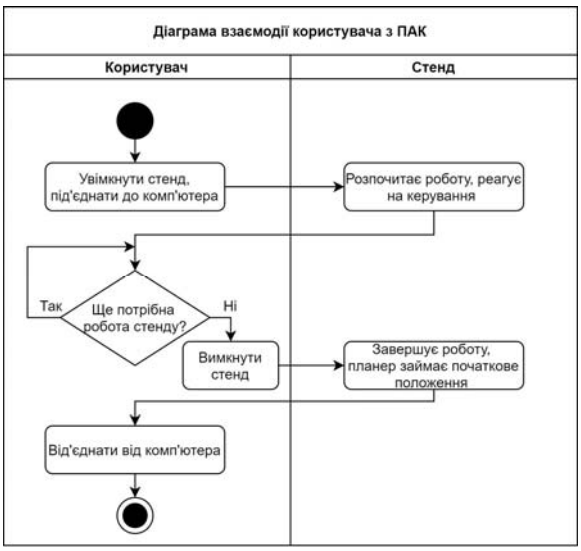

Рисунок 1. Діаграми діяльності користувача (студента) з ПАК

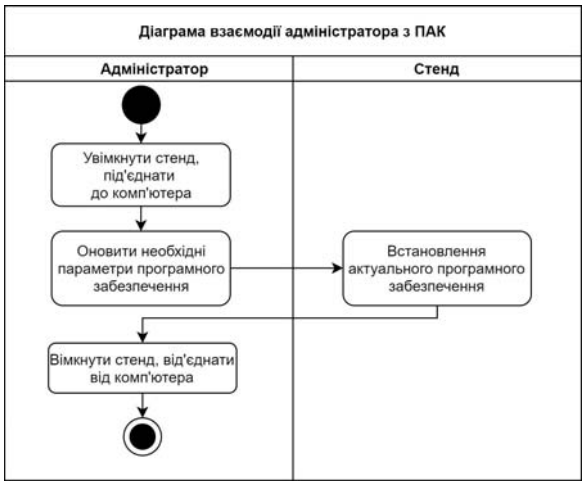

Рисунок 2. Діаграми діяльності адміністратора з ПАК

Розглянувши існуючі модульні рішення, а саме контролери на базі платформи Arduino було обрано саме Arduino UNO (рис. 3) оскільки вона має відносно високу обчислювальну потужність та помірні розміри [17]. З метою підвищення реалістичності керування було прийнято рішення використовувати в якості пристрою вводу джойстик Logitech Extreme 3D PRO. При обранні моделі ЛА важливим показником були характеристики матеріалу, з якого вона зроблена. Результатом аналізу стало визнання пінополістиролу найкращим варіантом в якості основного матеріалу для моделі. З метою забезпечення рухомості моделі ЛА інтегровано до стенду два сервоприводи (руля лівого та правого) MG-90S (рис. 4), кроковий двигун 28BYJ-48 (рис. 5) та драйвер ULN20 до нього.

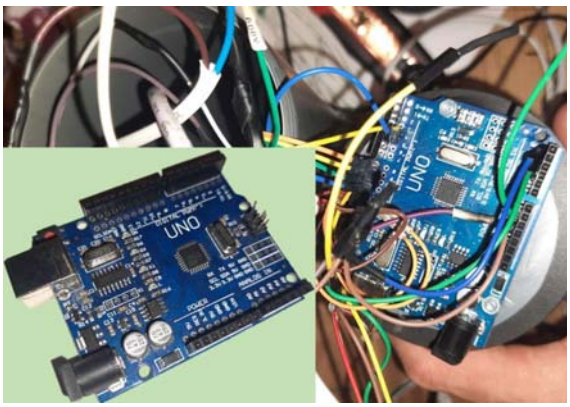

Рисунок 3. Arduino UNO та його інтеграція до стенду

Рисунок 4. MG-90S та його інтеграція до стенду

Для забезпечення наочної імітації роботи ЛА, а саме – для рухомості керма висоти, керма напряму та елеронів було використано кілька компактних сервоприводів DS-37. З огляду на обмеженість кількості інтерфейсів вводу плати Arduino було задіяно розширювач портів ШІМ PCA9685. Також використано блок живлення 12 В та перетворювач постійного струму LM2596. В результаті проектування з урахуванням обраних компонентів було розроблено архітектуру програмно-апаратного комплексу, що зображено на функціональній схемі (рис. 5). Алгоритм роботи лабораторного стенду роказано на рисунку 6.

Розробка програмної частини комплексу. При розробці програмного забезпечення було спроєктовано діаграму роботи ПАК та алгоритм роботи програмного забезпечення (рис. 7). Початком роботи комплексу є ініціалізація програмного забезпечення на контролері Arduino та комп'ютері. Після чого ПК налаштовує обмін даними з джойстиком та отримує його початкове положення. Зчитані дані комп'ютер нормує та надсилає на контролер Arduino на початку роботи комплексу.

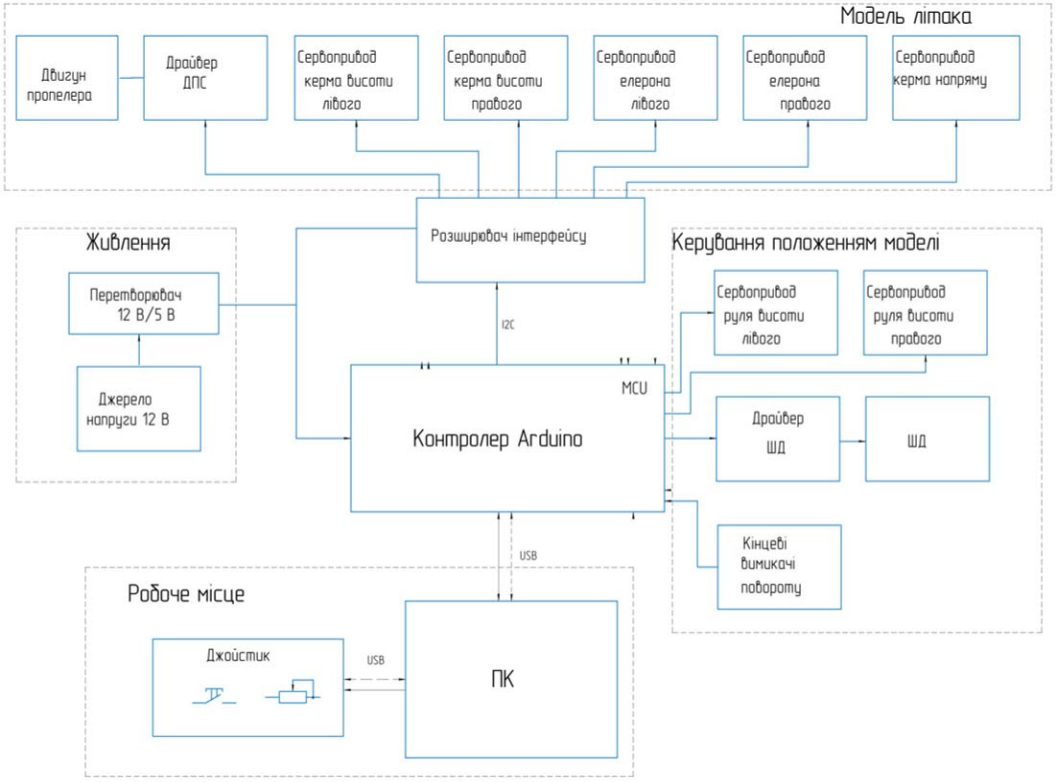

Рисунок 5. Функціональна схема програмно-апаратного комплексу

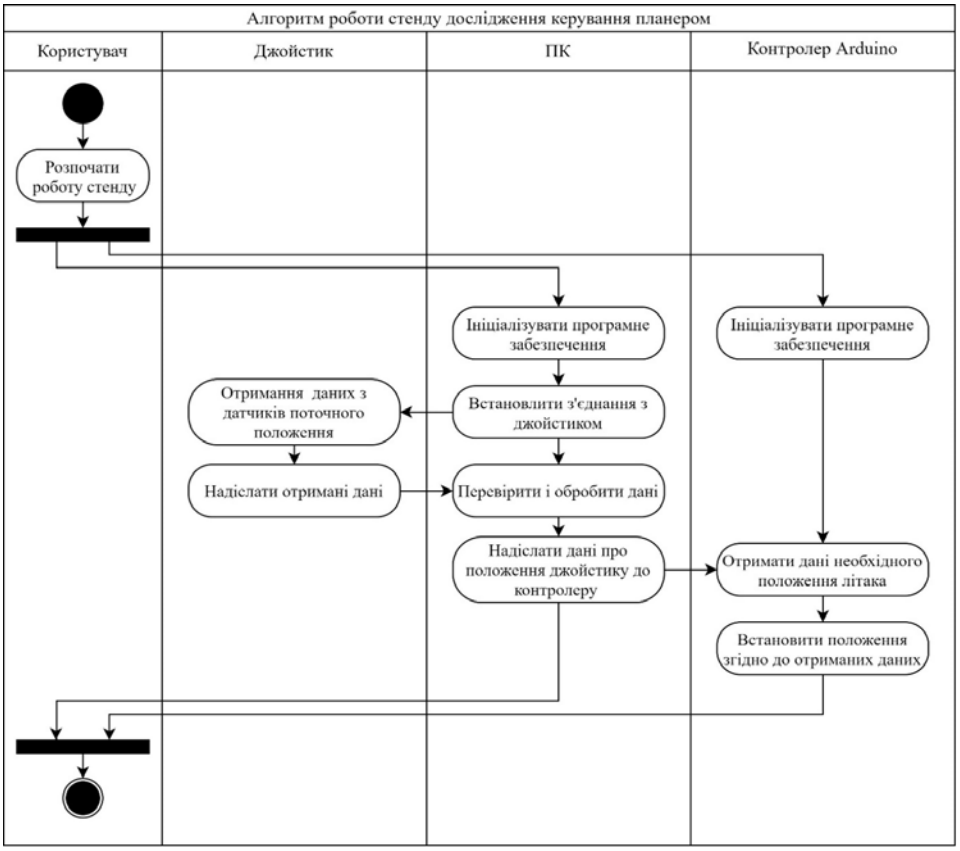

Рисунок 6. UML діаграма роботи ПАК

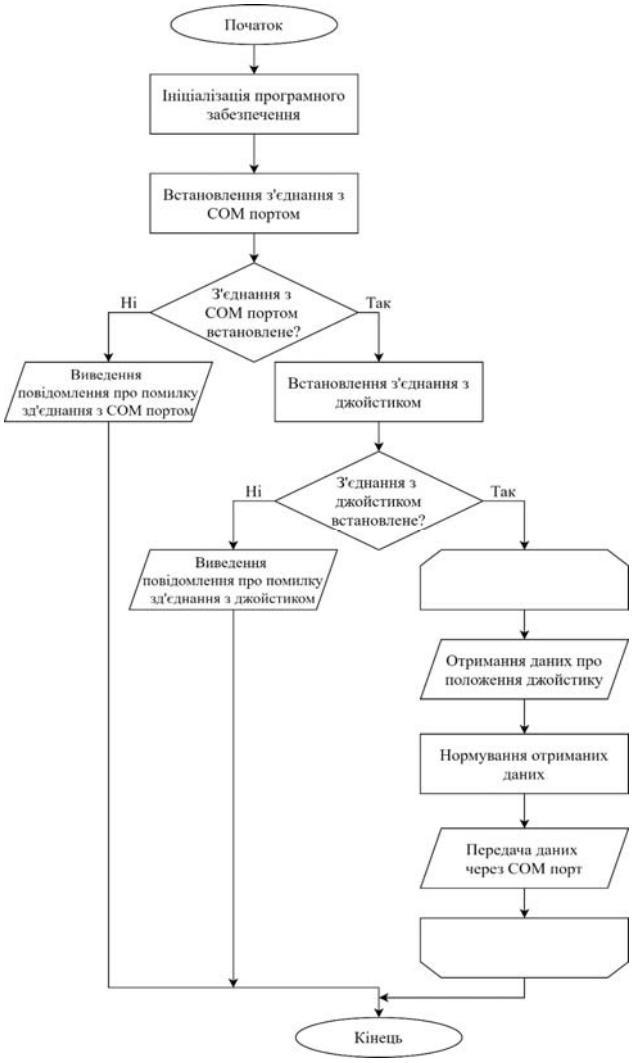

Рисунок 7. Алгоритм роботи програмного забезпечення комп'ютера у складі стенду

Рисунок 8. Фото лабораторного стенду

Контролер Arduino постійно перебуває в очікуванні даних щодо актуального положення джойстика у просторі. Після отримання даних він формує і надсилає відповідні команди до виконавчих механізмів (сервоприводів та крокового двигуна) для встановлення планеру у необхідне положення. Комунікація мікроконтролера з комп'ютером здійснюється за допомогою COM-порту – двонаправленого послідовного інтерфейсу обміну даних, передача в якому відбувається біт за бітом. Зазвичай його використовують для підключення пристроїв вводу на зразок миші та клавіатури, тому він може забезпечити доволі швидкий обмін даними. Фото моделі літального апарату типу «Планер» з мехатронною системою показано на рисунку 8. З метою підвищення подібності до реальних систем передбачено певну затримку (інерцію) між моментом впливу оператора на джойстик та реакцією планера.

V. ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження було визначено особливості керування планером та структуру механізмів, що забезпечують процес керування.

Розроблено програмно-апаратний комплекс у вигляді мехатронної системи на прикладі моделі літального апарата типу «Планер» для вивчення та дослідження процесів взаємодії органів керування та виконавчих механізмів польоту. Розроблено програмне забезпечення, особливістю якого є легке налаштування та швидкий запуск лабораторного стенду.

В подальшому планується удосконалення лабораторного стенду шляхом розширення апаратної частини для застосування в умовах нестабільного живлення мережі та відсутності персонального комп'ютеру; впровадження журналу використання стенду; впровадження інтерфейсу адміністратора підвищить зручність налаштування і використання системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] ICAO. Airplane upset prevention and recovery training aid [Electronic resource]. – Access mode: https://www.icao.int/safety/loci/AUPRTATablet/index.html.

[2] Nazarova, O. Mechatronic automatic control system of electropneumatic manipulator / V. Osadchyy, T. Hutsol, Sz. Glowacki, T. Nurek, V. Hulevskyi, I. Horetska // Scientific Reports, 2024. – Vol. 14. – P. 6970. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56672-4.

[3] Nae, C. Military Aircraft Flight Control / C. Nae, I. Nicolin, and B. Adrian Nicolin // Aeronautics - New Advances. IntechOpen, Dec. 21, 2022. doi: 10.5772/intechopen.105491.

[4] IVAO. Introduction to flight controls [Electronic resource]. – Access mode: https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/ Introduction_to_flight_controls.

[5] U.S. Department of Transportation. Aviation Instructor's Handbook. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/ aviation_instructors_handbook/aviation_instructors_handbook.pdf.

[6] Kern, D. Introduction to Fly-by-Wire Flight Control

Systems: The professional pilot's guide to understanding modern aircraft controls / D. Kern // Paperback, 2021. – 52 p.
[7] Dupeyroux, J. M2APix: A Bio-Inspired Auto-Adaptive Visual Sensor for Robust Ground Height Estimation / J. Dupeyroux, V. Boutin, J. R. Serres, L. U. Perrinet and S. Viollet // 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence, Italy, 2018. - pp. 1-4. doi: 10.1109/ISCAS.2018.8351433.
[8] Żokowski, M. Autodiagnositcs for Remotely Piloted Aircraft Systems / M. Żokowski // 2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM), Bialystok, Poland, 2020. - pp. 1-4. doi: 10.1109/MSM49833.2020.9201641.
[9] Wang, M. Integrated Design and Verification Method of Aircraft and Propulsion System / M. Wang, W. Gu, Z. Sun, Q. Zhang, J. Li // 2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Beijing, China, 2020. - pp. 1343-1347. doi: 10.1109/ICMA49215.2020.9233787.
[10] Liu, T. System modeling and simulation for flap system power drive unit of commercial aircraft / T. Liu, Y. Zhang, Y. Qian, J. Ju, W. Yu // CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS 2020), Online Conference, 2020. - pp. 318-323. doi: 10.1049/icp.2021.0268.
[11] Wang, M. Integrated Aircraft and Propulsion System Simulation for Control and Performance Optimization / M. Wang, W. Gu, L. Wei, L. Belmon // 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Tianjin, China, 2019. - pp. 1150-1154. doi: 10.1109/ICMA.2019.8816590.
[12] Кулинич, Е.М. Лабораторний стенд з бездротовим інтерфейсом для дослідження електроприводу постійного струму / Е.М. Кулинич, О.С. Назарова, Д.В. Гончаров, С.Г. Чернишев, В.В. Піскун // Електроенергетика та електротехніка, 2020. - №3. – С.24-36. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-3-3.
[13] Nazarova, O. S. Research of the microprocessor liquid level automatic control system / O. S. Nazarova, V. V. Osadchyy, B. Yu. Rudim // Applied Aspects of Information Technology, 2023. - Vol. 6. - No. 2. – pp. 163–174. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.12
[14] Nazarova, O. Software and Hardware Complex for The Study of Electropneumatic Mechatronic Systems / O. Nazarova, V. Osadchyy, S. Shulzhenko, M. Olieinikov // 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2022. - pp. 1-6. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005698.
[15] Sky Brary. Flight Controls, [Electronic resource]. – https://skybrary.aero/articles/flight-controls.
[16] Introduction to aircraft flight controls, [Electronic resource]. – https://www.flightliteracy.com/introduction-to-flight-controls.
[17] Arduino comparison. [Electronic resource]. – Access mode: https://diyi0t.com/technical-datasheet-microcontroller-comparison.

Стаття надійшла до редакції 14.05.2024

A MECHATRONIC SYSTEM FOR STUDYING CONTROL PROCESSES ON THE EXAMPLE OF A "GLIDE" TYPE AIRCRAFT MODEL

NAZAROVA O.S. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nazarova16@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0784-7621;

KULYNYCH E.M. Candidate of Technical Science, associate professor, associate professor of the Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kuliniched@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4415-4362;

BEREZHNYI O.U. Student of the group E-312-2 of the Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: 8357238@gmail.com

Purpose. *Development of a mechatronic system based on the example of a Glider type aircraft model for studying and researching its control processes.*

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

Findings. *In the course of the study, the main processes of glider control were considered and analyzed: the interaction of the pilot's controls and the operating mechanisms of the wing. An analysis of the shortcomings and advantages of existing developments on the subject under study was carried out, taking into account the issues of mobility, economy, simplicity and reliability of implementation, as well as the possibility of using it as a training stand. A laboratory stand has been developed in the form of a mechatronic system based on the example of a "Glider" type aircraft model for studying and researching the interaction processes of control bodies and flight executive mechanisms. The*

software and hardware complex is connected using the USB interface. A SOC platform with an ArduinoUno microcontroller was used to process processor commands and convert them into aileron movements. The Logitech Extreme 3D joystick was chosen as the control interface. In order to increase the similarity to real systems, a certain delay (inertia) is provided between the moment of the operator's impact on the joystick and the response of the glider. Styrofoam was used as the material of the glider model. Servo drives MG-90S and DS-37 are used to control the position of the moving parts of the glider model. The airframe is rotated using a 28BYJ-48 engine. Software has been developed, the feature of which is easy setup and quick start-up of the laboratory stand. Provide for the possibility of keeping a log, which will allow analysis of the actions of the stand operator. As a result of the conducted research, the features of glider control and the structure of the mechanisms that ensure the control process were determined.

Originality. *A mechatronic system of a "Glider" type aircraft model based on an ArduinoUno-based software-hardware complex has been proposed and developed, which differs from the existing ones by the presence of a program that provides easy setup and quick start-up of the aircraft, which allows you to study the interaction of control bodies and executive mechanisms flight.*

Practical value. *The developed laboratory stand based on the "Glider" type aircraft expands the possibilities of studying and researching electromechanical processes of automatic control systems of complex mechatronic objects.*

Keywords: mechatronic system, aircraft, glider, control system, laboratory stand, modeling, Arduino, C++.

REFERENCES

[1] ICAO. Airplane upset prevention and recovery training aid [Electronic resource]. – Access mode: https://www.icao.int/safety/loci/AUPRTATablet/index.html.

[2] Nazarova, O., Osadchyy, V., Hutsol, T., Glowacki, Sz., Nurek, T., Hulevskyi, V., Horetska I. (2024). Mechatronic automatic control system of electropneumatic manipulator. *Scientific Reports*, 14, 6970. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56672-4.

[3] Nae, C., Nicolin, I., Adrian, B. (2022). Nicolin Military Aircraft Flight Control. *Aeronautics - New Advances*. doi: 10.5772/intechopen.105491.

[4] IVAO. Introduction to flight controls [Electronic resource]. – Access mode: https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/ Introduction_to_flight_controls.

[5] U.S. Department of Transportation. Aviation Instructor's Handbook. [Electronic resource]. – Access mode: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/aviation_instructors_handbook/aviation_instructors_handbook.pdf.

[6] Kern, D. (2021). Introduction to Fly-by-Wire Flight Control Systems: The professional pilot's guide to understanding aircraft controls. Paperback, 52.

[7] Dupeyroux, J., Boutin, V., Serres, J. R., Perrinet, L. U. & S. (2018). Viollet M2APix: A Bio-Inspired Auto-Adaptive Visual Sensor for Robust Ground Height Estimation. *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 1-4. doi: 10.1109/ISCAS.2018.8351433.

[8] Żokowski, M. (2020). Autodiagnositcs for Remotely Piloted Aircraft Systems. *International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM)*, 1-4. doi: 10.1109/MSM49833.2020.9201641.

[9] Wang, M., Gu, W., Sun, Z., Zhang, Q., Li, J. (2020). Integrated Design and Verification Method of Aircraft and Propulsion System. *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Beijing, China, 1343-1347. doi: 10.1109/ICMA49215.2020.9233787.

[10] Liu, T., Zhang, Y., Qian, Y., Ju, J., Yu, W. (2020). System modeling and simulation for flap system power drive unit of commercial aircraft. *CSAA/IET International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS 2020)*, 318-323. doi: 10.1049/icp.2021.0268.

[11] Wang, M., Gu, W., Wei, L. (2019). Belmon Integrated Aircraft and Propulsion System Simulation for Control and Performance Optimization. *2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1150-1154. doi: 10.1109/ICMA.2019.8816590.

[12] Kulynych E., Nazarova, O., Goncharov, D., Chernyshev, S., & Piskun, V. (2020). Laboratory stand with wireless interface for investigation of automatic control systems of DC electric drives. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (3), 24–36. https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-3-3 (in Ukrainian).

[13] Nazarova, O. S., Osadchyy, V. V., Rudim B. Yu. (2023). Research of the microprocessor liquid level automatic control system. Applied Aspects of Information Technology, 6, 2, 163–174. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.12

[14] Nazarova, O., Osadchyy, V., Shulzhenko, S., Olieinikov M. (2022). Software and Hardware Complex for The Study of Electropneumatic Mechatronic Systems. *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, 1-6. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005698.

[15] Sky Brary. Flight Controls, [Electronic resource]. – https://skybrary.aero/articles/flight-controls.

[16] Introduction to aircraft flight controls, [Electronic resource]. – https://www.flightliteracy.com/introduction-to-flight-controls.

[17] Arduino comparison. [Electronic resource]. – Access mode: https://diyi0t.com/technical-datasheet-microcontroller-comparison.