

УДК 629.33

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/21>

Лисенко О.І.

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

Тачинина О.М.

Національний авіаційний університет

Фуртат С.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Фуртат О.В.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Галай О.Ф.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

МЕТОДИКА АЛГОРИТМІЧНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МЕХАТРОННИХ ПРИСТРОЇВ МАЛОЇ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

Стаття присвячена викладу методики алгоритмічної модернізації цифрових електроприводів мехатронних обладнань малої цивільної авіації.

Мета статті заключається в зменшенні часу перехідного процесу в каналі управління кутовою швидкістю обертання ротора електропривода, поліпшення показників квазіінваріантності по відношенню до зовнішньої обурюючої дії.

Авіаційна електромеханіка малої цивільної авіації активно модернізується завдяки використанню цифрових мехатронних пристроїв. Кількість цифрових електроприводів мехатронних пристроїв на борту «літального джипа» перевищує декілька сотень. Апаратна модернізація практично досягла свого переділу. Істотно збільшити швидкодію і надійність цифрових електроприводів мехатронних пристроїв, зменшити масогабаритні показники та енергоспоживання можна тільки завдяки алгоритмічній модернізації. Для сегменту малої цивільної авіації, яка використовує тільки електричну енергію або гібридні джерела енергії, вкрай важливо не бути енерговитратною. Мала цивільна авіація управляється на 80% не професіоналами, а любителями (аналогічно легковому автомобільному транспорту). Для малої цивільної авіації має первинне значення підвищення безпеки польотів. З цієї причини алгоритмічна модернізація цифрових електроприводів мехатронних обладнань малої цивільної авіації, спрямована на підвищення надійності цих пристроїв шляхом заміни механічних датчиків на алгоритмічні (спостерігачі стану), зменшення (у межі зведення до нуля) запізнення в механізмах оброблення сигналів управління є актуальним.

В результаті отримано зменшення амплітуди сплеску швидкості обертання ротора, викликаного зовнішнім обуренням, і тривалістю цього сплеску, мінімізація додаткових витрати енергії, які викликані алгоритмічною корекцією динамічних характеристик електроприводу, поліпшення експлуатаційних характеристик електроприводу, підвищення надійності і зменшення масогабаритних характеристик електроприводу завдяки заміні механічного вимірювача швидкості обертання ротора на алгоритмічний.

Стаття вносить істотний внесок у розвиток перспективних інженерних методик проектування нових і модернізації існуючих цифрових систем управління електроприводами мехатронних обладнань малої цивільної авіації.

Ключові слова: цифрове автоматичне управління електроприводом, моделювання в просторі станів, корекція динамічних характеристик електроприводів.

Постановка проблеми. Авіаційна електромеханіка малої цивільної авіації активно модернізується завдяки використанню цифрових мехатронних пристроїв. Кількість цифрових

електроприводів мехатронних пристроїв на борту «літального джипа» перевищує декілька сотень. Апаратна модернізація практично досягла свого переділу. Істотно збільшити швидкодію і надій-

ність цифрових електроприводів мехатронних пристроїв, зменшити масогабаритні показники та енергоспоживання можна тільки завдяки алгоритмічній модернізації. Для сегменту малої цивільної авіації, яка використовує тільки електричну енергію або гібридні джерела енергії, вкрай важливо не бути енерговитратною. Мала цивільна авіація управляється на 80% не професіоналами, а любителями (аналогічно легковому автомобільному транспорту). Для малої цивільної авіації має первинне значення підвищення безпеки польотів. З цієї причини алгоритмічна модернізація цифрових електроприводів мехатронних обладнань малої цивільної авіації, спрямована на підвищення надійності цих пристроїв шляхом заміни механічних датчиків на алгоритмічні (спостерігачі стану), зменшення (у межі зведення до нуля) запізнення в механізмах оброблення сигналів управління є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мета дослідження: нині, цифрове управління електроприводами мехатронних обладнань малої цивільної авіації здійснюється, у кращому разі, цифровими ПД-регуляторами. Ці ПД-регулятори параметрично налаштовуються на математичні моделі під час проведення періодичних регламентних робіт або за запитом пілота, або за результатами аналізу записів об'єктивного контролю. Алгоритмічна корекція динамічних характеристик електроприводу не виконується. Для виміру кутової швидкості обертання ротора або кута повороту ротора електроприводу використовуються спеціальні механічні сенсори (датчики первинної інформації), які не мають досить високої надійності і, при цьому, збільшують масу електроприводу. Таким чином, актуальним є завдання розробки методики алгоритмічної модернізації цифрового електроприводу мехатронних обладнань малої цивільної авіації.

Об'єкт дослідження: розглянемо управління швидкістю обертання одного з 24 гвинтів повітряного двомісного літака вертолітного типу.

Предмет дослідження: перехідний процес в каналі управління гвинтом, поліпшення показників квазіінваріантності по відношенню до зовнішньої обурюючої дії (зменшити амплітуду сплеску швидкості обертання гвинта, викликаного зовнішнім обуренням, і тривалість цього сплеску); мінімізувати додаткові витрати енергії, які викликані алгоритмічною корекцією динамічних характеристик електроприводу гвинта; підвищити експлуатаційні характеристики електроприводу гвинта (завдяки заміні механічного

вимірника швидкості обертання гвинта на алгоритмічний).

Постановка завдання.

Хід роботи:

1. Вибір вихідної структури цифрової системи автоматичного керування в якості прототипу (ЦСАК-прототип) для подальшої модернізації.

2. Параметрична оптимізація ЦСАК-прототипу за обраним критерієм.

3. Корекція динамічних властивостей (характеристик) об'єкту керування (побудова внутрішнього корегуючого контуру).

4. Параметрична оптимізація модернізованого ЦСАК, тобто ЦСАК-прототипу з об'єктом керування із скорегованими динамічними властивостями.

5. Синтез спостерігача Льюїнбергера та його підключення до зовнішнього контуру ЦСАК-прототипу та внутрішнього і зовнішнього контурів модернізованого ЦСАК.

6. Обчислювальний експеримент стосовно оцінки якості функціонування ЦСАК із спостерігачем Льюїнбергера.

7. Висновки.

Виклад основного матеріалу. У якості ЦСАК-прототипу обираємо систему, що складається із двигуна постійного струму (ДПС) та ЦПД-регулятора. ДПС обертає несучий гвинт. Такого типу ЦСАК є найуживанішими в мехатронних системах малої цивільної авіації. ЦСАК із ЦПД-регулятором має властивість астатизму першого порядку.

В якості математичної моделі безперервного об'єкту управління, яким є двигун постійного струму, розглядається безперервна МІМО ЛПІ (багатовимірний стаціонарний) математична модель. Кількісні значення параметрів безперервної математичної моделі ДПС вказані на мал. 1 (див. блок 4). Вхідними сигналами блоку 4 являються: напруга підводиться до якоря ДПС (управління по ланцюгу якоря), яке подається з виходу ЦПД-регулятора (блок 3), і гальмівний момент, який подається з блоку 2. Вихідними сигналами блоку 4 являються: струм якоря $i(t)$ і кутова швидкість обертання якоря(ротора) ДПС $w(t)$. Для виміру $w(t)$ в ЦСАК-прототипі використовується спеціальний сенсор(механічний датчик первинної інформації, яким є тахогенератор).

Налаштування ЦПД-регулятора (пошук значень його параметрів близьких до оптимальних) може бути виконано із використанням будь якого із методів чисельної оптимізації. У запропонованій методиці, на даному етапі і в подальшому,

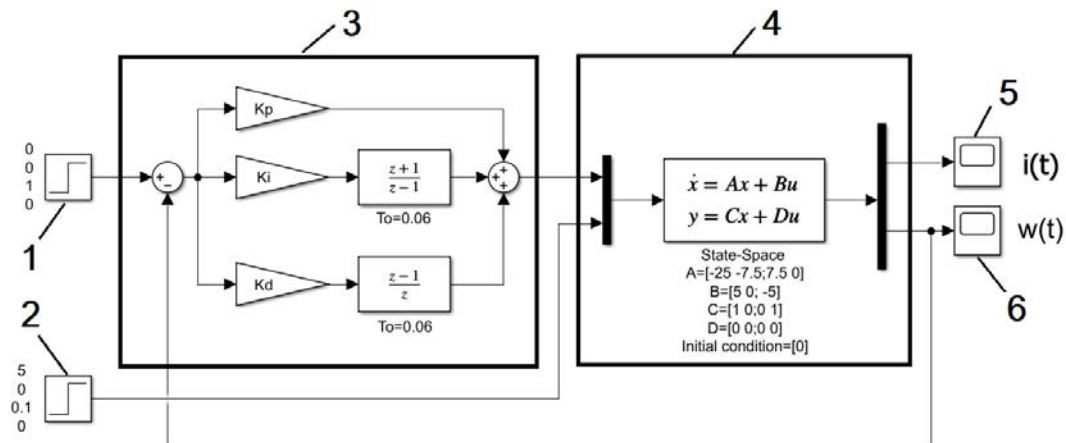


Рис. 1. Комп’ютерна математична модель ЦСАК-прототипу

1 – керуючий сигнал, який задає значення кутової швидкості обертання ротора ДПС і подається на перший керуючий вхід; 2 – збурення, що діє на іншому керуючому вході; 3 – цифровий пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор; 4 – неперервний об’єкт керування (двигун постійного струму (ДПС)); 5, 6 – осцилографи для спостереження зміни в часі відповідно струму якоря ДПС $i(t)$ та кутової швидкості обертання ротора (якори) ДПС $w(t)$

було обрано критерієм оптимальності година тривалості перехідного процесу, який потрібно мінімізувати; застосовано метод чисельної оптимізації, який має назву метод Хука-Дживса; знайдено перше наближення до оптимальних значень параметрів ЦПД-регулятора методом Зіглера-Ніколса. Аналіз перехідного процесу в каналі керування кутовою швидкістю обертання якоря(ротора) ДПС підтверджує відомий факт, що процес є аперіодичним та ЦСАК-прототип має астатизм першого порядку.

Завдяки використанню внутрішнього контуру зворотного зв’язку забезпечити задані значення коренів характеристичного рівняння для математичної моделі внутрішнього контуру ЦСАК ДПС.

Як відомо, метод модального регулювання дозволяє знайти значення елементів матричного коефіцієнту зворотного зв’язку Km , при яких корені характеристичного рівняння для математичної моделі внутрішнього контуру ЦСАК ДПС будуть дорівнювати наперед заданим значенням.

Алгоритм корекції складається із трьох послідовно діючих алгоритмів. Перший – алгоритм модального аналізу (АМА). АМА перетворює реальні виміри вихідних координат вектору стану об’єкту керування у віртуальні виміри в уявному просторі завдяки застосуванню матриці лінійного перетворення T .

Другий – алгоритм модального регулювання (АМР). АМР обчислює віртуальний вектор керування із використанням матричного коефіцієнта підсилення Kmr .

Третій – алгоритм модального синтезу (АМС).

АМС обчислює реальний вектор керування із використанням матричного коефіцієнта підсилення Kms .

Таким чином $K32=Kms \cdot Kmr \cdot T$.

Обчислимо, Kmr , Kms , $K32$ із використанням функцій системи комп’ютерної математики MATLAB+Simulink(припустимо, що бажані значення коренів характеристичного рівняння для математичної моделі внутрішнього контуру ЦСАК ДПС дорівнюють 0.5): $[V, L]=\text{eig}(A)$; $T=\text{inv}(V)$; $Kmr=L \cdot [0.5 \ 0; 0 \ 0.5]$; $Kms=\text{inv}(T \cdot B)$.

У результаті розрахунків отримано:

$$V=[-0.9487 \ 0.3163; 0.3163 \ -0.9487];$$

$$L=[0.2593 \ 0; 0 \ 0.8607];$$

$$T=[-1.1860 \ -0.3955; -0.3955 \ -1.1860];$$

$$Kmr=[-0.2407 \ 0; 0 \ 0.3607];$$

$$Kms=\text{inv}(T \cdot B)=[-5.7616 \ 1.1356; -1.9215 \ 3.4057];$$

$$K32=[-1.8068 \ -1.0343; -1.0344 \ -1.6399].$$

Корекція динамічних властивостей об’єкта керування методом лінійного квадратичного регулювання стану.

Завдяки використанню внутрішнього контуру зворотного зв’язку виконати таку корекцію динамічних властивостей об’єкта керування методом лінійного квадратичного регулювання стану, при якій квадратичний критерій якості

$$J = x^T(N) \cdot Q \cdot x(N) + \sum_{n=0}^{N-1} (x^T(n) \cdot Q \cdot x(n) + u^T(n) \cdot R \cdot u(n)),$$

досягає свого найменшого значення при переводі системи

$$x(n+1) = A \cdot x(n) + B \cdot u(n)$$

із початкового стану $x(0)$ у кінцевий стан $x(N)$ де матриці Q, R – симетричні і відповідно додатньо-напіввизначені та додатньовизначені

Будуємо квазіоптимальний регулятор із сталим матричним коефіцієнтом підсилення [20]:

$$u(n) = -K_0 \cdot x(n),$$

де $K_0 = (R + B^T \cdot P_0 \cdot B)^{-1} \cdot B^T \cdot P_0 \cdot A$;

$$P_0 = \lim_{N \rightarrow \infty} P(N - j) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow P_0 = Q + A^T \cdot P_0 \cdot (I - B \cdot (B^T \cdot P_0 \cdot B + R)^{-1} \cdot B^T \cdot P_0) \cdot A.$$

Задаємо матриці

$$A = [0.1841 \ -0.2256; 0.2256 \ 0.9359];$$

$$B = [0.1504 \ 0.04274; 0.04274 \ -0.2928];$$

$Q = [1 \ 0; 0 \ 1]$; $R = [0.7 \ 0; 0 \ 0.3]$ та за допомогою функції `dlqr` системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink обчислюємо стале значення матричного коефіцієнта підсилення лінійного квадратичного регулятора K_0 та матрицю P_0 :

$$[K_0, P_0] = \text{dlqr}(A, B, Q, R);$$

$$P_0 = [1.1215 \ 0.2625; 0.2625 \ 2.1414];$$

$$K_{33} = K_0 = [0.0731 \ 0.0623; -0.2964 \ -1.1854].$$

У результаті отримано наступні значення параметрів ЦПД-регуляторів для кожного із варіантів корекції динамічних властивостей об'єкта керування:

Корекція динамічних властивостей об'єкта керування методом регулювання стану із бажаним(заданим) характеристичним рівнянням:

$$K_{p41} = 5; K_{i41} = 0.8; K_{d41} = 2.47.$$

Корекція динамічних властивостей об'єкта керування методом модального регулювання стану:

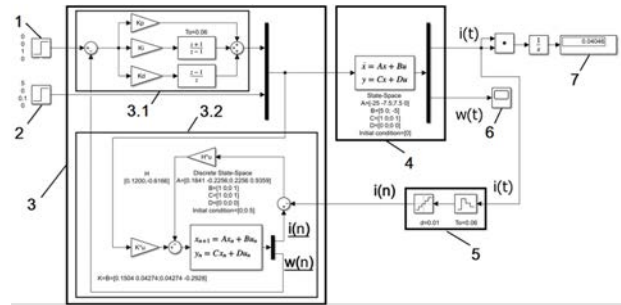
$$K_{p42} = 18; K_{i42} = 5.5; K_{d42} = 2.25.$$

Корекція динамічних властивостей об'єкта керування методом лінійного квадратичного регулювання стану:

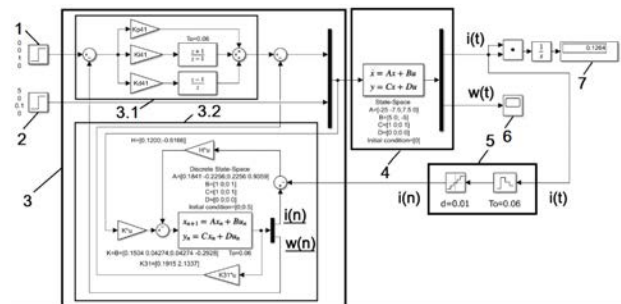
$$K_{p43} = 18; K_{i43} = 5; K_{d43} = 5.62.$$

Модернізованими будемо називати ЦСАК, у яких виконана корекція динамічних властивостей ДПС та налаштовані параметри ЦПД-регуляторів за критерієм мінімального години тривалості перехідного процесу у двоконтурній ЦСАК ДПС.

Виконаємо підключення спостерігача Льюїнбергера до комп'ютерних математичних моделей ЦСАК-прототипу та модернізованих ЦСАК.



Комп'ютерна математична модель підключення спостерігача Льюїнбергера до ЦСАК-прототипу.



По фізичному сенсу процесів, що відбуваються в електроприводі, зрозуміло, що досягти підвищення інтенсивності переходу об'єкта управління з одного стану в інший можна тільки за рахунок додаткових витрат енергії. Порівняльний аналіз значень величини Q для досліджених варіантів алгоритмічної корекції динамічних характеристик ДПС підтверджує цей факт. З цієї причини пропонується з усіх варіантів модернізації вважати найкращим той, для реалізації якого додаткові витрати енергії будуть найменшими.

Позитивним є те, що алгоритмічний вимір кутової швидкості обертання ротора ДПС за допомогою спостерігача Льюїнбергера дозволяє зменшити вагу і габарити ЦСАК і підвищити її надійність. Поліпшення пояснюється відмовою від використання механічного тахогенератора в ланцюзі зворотного зв'язку ЦСАК. Для виміру струму в ланцюзі якоря ДПС пропонується використати малогабаритний цифровий сенсор, який має набагато меншу вагу і габарити в порівнянні з тахогенератором і більш високою надійністю. Цифровий сенсор струму подає інформацію на вхід спостерігача Льюїнбергера, для функціонування якого має бути відома досить «груба» МІМО ЛГІ математична модель ДПС.

Висновки. Рекомендація до практичного застосування результатів досліджень, викладених у цій статті полягає в наступному. В процесі функціонування об'єкту, на якому встановлюється привід гвинта, що розглядається в статті, виділити два режими: номінальний і форсований. У номінальному режимі використати ЦСАК-прототип з під-

ключенням спостерігача Льюїнбергера до алгоритму ПД-регулятора. У форсованому режимі використати модернізовану ЦСАК із корекцією динамічних властивостей об'єкта керування методом регулювання стану із бажаним (заданим) характеристичним рівнянням та підключенням спостерігача Льюїнбергера.

Використання запропонованих рекомендацій дозволить досягти поставлених в статті цілей: поліпшити динамічні характеристики електроприводу мехатронного пристрою при незначному збільшенні витрат енергії; підвищити надійність і зменшити масогабаритні показники електроприводу.

Список літератури:

1. Lundstrom, D.: Aircraft Design Automation and Subscale Testing – With Special Reference to Micro Air Vehicles. Linköping Studies in Science and Technology, Dissertations No. 1480(2012), URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:561097/FULLTEXT01.pdf>.
2. Gudmundsson, S.: General Aviation Aircraft Design : Applied Methods and Procedures. Butterworth – Heinemann(2021).
3. Lundstrom, D., Amadori, K., Krus, P.: Distributed Framework for Micro Aerial Vehicle Design Automation. In: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, pp. 1-10. Reston, Virginia(2008). URL: <https://doi.org/10.2514/6.2008-140>.
4. Dantsker, O., Imtiaz, S., Caccamo, M.: Electric Propulsion System Optimization for Long – Endurance and Solar – Powered Unmanned Aircraft. In: AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, Indianapolis, IN, pp. 1-11. Reston, Virginia(2019). URL: <https://doi.org/10.2514/6.2019-4486>.
5. Dantsker, O., Theile, M., Caccamo, M.: A High – Fidelity, Low – Order Propulsion Power Model for Fixed – Wing Electric Unmanned Aircraft. In: 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, Cincinnati, Ohio, pp. 1-14. Reston, Virginia(2018). URL: <https://doi.org/10.2514/6.2018-5009>.
6. Sforza, P.: Commercial Airplane Design Principles. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford(2014).
7. Amadori, K., Lundström, D., Krus, P.: Automated design and fabrication of micro – air vehicles. J. Aerosp. Eng. 226(10), 1271-1282. SAGE Publications Inc., London(2011), URL: <https://doi.org/10.1177/0954410011419612>.
8. Sforza, P.: Manned Spacecraft Design Principles. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford(2015).
9. Aliofkhaezrai, M., Makhlouf, A. S. H.: Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford(2015).
10. Lundström, D., Amadori, K., Krus, P.: Automation of Design and Prototyping of Micro Aerial Vehicle. In 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition(pp. 1-16). Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics(2009), URL: <https://doi.org/10.2514/6.2009-629>.
11. Moir, I., Seabridge, A.: Design and Development of Aircraft Systems. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK(2012). URL: <https://doi.org/10.1002/9781118469156>.
12. Lysenko, O., Tachynina, O., Guida, O., Furtat, O., Furtat, S., Sushyn, I.: Engineering Methodology of Express Synthesis of Digital Automatic Control System for Precision Mechatronic Devices of Mobile Sensor Networks. In: Proceedings of Vernadsky National University of Crimea. Technical Sciences Series. Vol. 33(72), No. 5, pp. 11-19. Odessa, Ukraine: Helvetika Publishing(2022).
13. Lysenko, O., Tachynina, O., Ponomarenko, S., Guida O.: Optimal Branched Trajectories Theory. Igor Sikorsky KPI, Kyiv(2023). URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52094>.
14. Hassanalian M., Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. Progress in Aerospace Sciences. 2017. Vol. 91. pp. 99-131. Elsevier, Oxford(2017).
15. Sforza, P.: Theory of Aerospace Propulsion. Elsevier Science & Technology Books, Oxford(2011).
16. Papageorgiou, A., Tarkian, M., Amadori, K., Olvander, J.: Multidisciplinary Design Optimization of Aerial Vehicles : A Review of Recent Advancements. International Journal of Aerospace Engineering, Vol. 2018, pp. 1-21. Hindawi Limited, London(2018), URL: <https://doi.org/10.1155/2018/4258020>.
17. Rajendran, S., Pagel, E.: Recommendations for emerging air taxi network operations based on online review analysis of helicopter services. Heliyon, 6(12), e05581. Cell Press, Cambridge(2020), URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05581>.
18. Lysenko, O.: HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP(Republic of Korea). Course [S084 – Ukraine] Mathematical programming and operations research in telecommunications, 14 Lectures. Fall 2017. URL: <https://www.hufocw.org/Course/263>.
19. Lysenko, O.: HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP(Republic of Korea). Course «Digital automatic control systems for information communications engineers», 14 Lectures. Spring 2020. URL: <https://www.hufocw.org/Course/197>.
20. Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe, Mario E. Salgado.: Control System Design. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2001.

Lysenko O.I., Tachynyna O.M., Furtat S.O., Furtat O.V. METHODOLOGY OF ALGORITHMIC MODERNIZATION OF DIGITAL ELECTRIC DRIVES OF MECHATRONIC DEVICES OF SMALL CIVIL AVIATION

The article is devoted to the presentation of the method of algorithmic modernization of digital electric drives of mechatronic devices of small civil aviation.

The purpose of the article is to reduce the time of the transition process in the control channel of the angular velocity of rotation of the rotor of the electric drive, to improve the indicators of quasi-invariance in relation to the external disturbing action.

Aviation electromechanics of small civil aviation is being actively modernized due to the use of digital mechatronic devices. The number of digital electric drives of mechatronic devices on board the «flying jeep» exceeds several hundreds. Hardware modernization has practically reached its redistribution. It is possible to significantly increase the speed and reliability of digital electric drives of mechatronic devices, reduce weight and size indicators and energy consumption only thanks to algorithmic modernization. For the segment of small civil aviation that uses only electric energy or hybrid energy sources, it is extremely important not to be energy-intensive. 80% of small civil aviation is operated not by professionals, but by amateurs (similar to passenger car transport). For small civil aviation, increasing flight safety is of primary importance. For this reason, the algorithmic modernization of digital electric drives of mechatronic devices of small civil aviation, aimed at increasing the reliability of these devices by replacing mechanical sensors with algorithmic (state monitors), reducing (within the limit of reduction to zero) the delay in control signal processing mechanisms is relevant.

As a result, a reduction in the amplitude of the burst of rotor rotation speed caused by external disturbance and the duration of this burst, minimization of additional energy consumption caused by the algorithmic correction of the dynamic characteristics of the electric drive, improvement of the operational characteristics of the electric drive, increased reliability and reduction of the mass-dimensional characteristics of the electric drive thanks to the replacement of the mechanical speed meter were obtained rotor to algorithmic.

The article makes a significant contribution to the development of promising engineering methods for the design of new and modernization of existing digital control systems for electric drives of mechatronic devices of small civil aviation.

Key words: *digital automatic control of an electric drive, modeling in the space of states, correction of dynamic characteristics of electric drives.*