

УДК 629.33

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.1/26>

Лисенко О.І.

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

Тачинина О.М.

Національний авіаційний університет

Пономаренко С.О.

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

Фуртат О.В.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гетьман О.В.

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

Подобєд В.В.

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

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ РЕГУЛЯРНОГО СПОСТЕРІГАЧА СТАНУ ДЛЯ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НЕСУЧИХ ГВИНТІВ МАЛОЇ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

У статті запропонована методика синтезу регулярного спостерігача стану для цифрових регуляторів електроприводів несучих гвинтів малої цивільної авіації. Виконано розрахунок параметрів регулярного спостерігача стану (спостерігача Льюїнбергера) та імітаційне моделювання його роботи в детермінованих умовах та при дії випадкових збурень. Імітаційним моделюванням підтверджено теоретичні положення про те, що за допомогою спостерігача Льюїнбергера може бути обчислена («відновлена») кутова швидкість обертання ротора двигуна постійного струму (ДПС). Це означає, що спостерігач виконує функцію алгоритмічного вимірювача кутової швидкості ротора ДПС і тим самим вдається уникнути необхідності використання такого спеціального громіздкого, енерговитратного та ненадійного механічного пристрою, як тахогенератор. В якості вхідної інформації для алгоритмів керування ДПС пропонується використовувати вихідний сигнал спостерігача Льюїнбергера. При цьому алгоритми керування та спостереження можуть бути запрограмовані у одному і тому самому мікропроцесорі.

Розрахунки та імітаційне моделювання підтвердили теоретичні положення про те, що за допомогою спостерігача Льюїнбергера може бути обчислена («відновлена») кутова швидкість обертання ротора двигуна постійного струму (ДПС). Це означає, що спостерігач виконує функцію алгоритмічного вимірювання кутової швидкості ротора ДПС і тим самим вдається уникнути необхідності використання такого громіздкого, енерговитратного та ненадійного механічного пристрою, як тахогенератор в цифрових регуляторах електроприводів несучих гвинтів малої цивільної авіації.

У більшості випадків автономно-прогнозне оцінювання в технічних системах для інформаційного забезпечення алгоритму керування не використовують, тому що на практиці неможливо отримати достатньо точні початкові умови $x(0)$ та параметри математичної моделі і тому не можливо виконати достатньо точний прогноз стану системи на прийнятний для практичного використання інтервал часу.

Для подолання недоліків спостереження за розімкненим циклом на практиці частіше використовують спостерігачі із спостереженням за замкненим циклом (алгоритмом).

Ключові слова: функції аскег; спостерігачі Льюїнбергера, електроприводи несучих гвинтів, сенсори, математична модель, регулярний спостерігач.

Постановка проблеми. Електроприводи несучих гвинтів малої цивільної авіації (ЕНГ МЦА) активно модернізуються завдяки використанню цифрових електроприводів. Кількість цифрових електроприводів несучих гвинтів «літаючого джипа» або «літаючого таксі» може перевищувати декілька десятків. Апаратна модернізація вже вичерпала свої можливості. Підвищити надійність цифрових електроприводів несучих гвинтів, зменшити масогабаритні показники при незначному збільшенні енергоспоживання можливо завдяки лише алгоритмічній модернізації. Для малої цивільної авіації, яка використовує електричну енергію акумуляторів, принципово важливо не бути енерговитратною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для реалізації законів керування як у випадку SISO LTI математичної моделі ЕНГ МЦА (в подальшому будемо називати системи), так і випадку MIMO LTI математичної моделі ЕНГ МЦА (в подальшому будемо називати системи) необхідно мати інформацію про компоненти вектору стану системи. Цю інформацію можливо отримати завдяки використанню датчиків первинної інформації (ДПІ або сенсорів), які вимірюють окремі компоненти вектору стану системи або із використанням ДПІ (сенсорів), математичної моделі системи та спеціального алгоритму обробки вихідних сигналів цих ДПІ (сенсорів), який називається спостерігач стану. Саме використання алгоритмічного способу вимірювання компонент вектору стану системи і дозволяє відмовитися від частини механічних датчиків і тим самим покращити показники надійності та ресурсної і енергетичної ефективності системи.

В загальному випадку під спостерігачем стану (СС) розуміють способи, процедури або алгоритми отримання первинної інформації про всі компоненти вектору стану системи за результатом вимірювання значень окремих компонент вектору стану системи або значень функцій від однієї або декількох компонент вектору стану системи. Спостерігачі стану поділяються на спостерігачі із спостереженням за розімкненим циклом (алгоритмом) та спостерігачі із спостереженням за замкненим циклом (алгоритмом). Перейдемо до математичного формулювання задачі дослідження.

Постановка завдання. Спостерігачі стану із спостереженням за розімкненим циклом

Спостереження за розімкненим циклом ще називають **прогнозним оцінюванням** або **евристичним спостереженням (евристичним спостерігачем)**.

В ідеальному випадку, якщо точно відомо $x(0)$ та керуючий вплив $u(n)$, $n = 0; 1; 2; \dots$, а також математична модель системи, наприклад, у вигляді рівнянь у просторі станів

$$\begin{cases} x(n+1) = Ax(n) + Bu(n), \\ y(n) = Cx(n), \end{cases} \quad (1)$$

де вважаємо що матриці A, B точно відомі і з часом не змінюються, і при цьому відсутні непередбачені зовнішні збурення, реальний вектор стану $x(n)$ можна оцінити (обчислити) за допомогою розв'язання першого рівняння системи (1) в режимі реального часу. Підкреслимо, якщо у рівнянні спостереження системи (1) $C = I$ (одична матриця), то це означає, що всі компоненти вектору стану безпосередньо вимірюються і при цьому вимірюються абсолютно точно.

Прогнозоване оцінювання вектору стану системи доцільно використовувати при тимчасових збоях у роботі ДПІ для отримання інформації протягом декількох кроків або для фільтрації аномальних впливів, коли значення поточного виміру порівнюють із прогнозованим на 1 крок значенням і відкидають цей вимір, якщо він виходить за встановлені межі. Крім того, наприклад, можливо такий режим «віртуального вимірювання» передбачити як режим кризового вимірювання у випадку аварійної ситуації.

У більшості випадків автономно-прогнозне оцінювання в технічних системах для інформаційного забезпечення алгоритму керування не використовують, тому що на практиці неможливо отримати достатньо точні початкові умови $x(0)$ та параметри математичної моделі (1) і тому не можливо виконати достатньо точний прогноз стану системи на прийнятний для практичного використання інтервал часу.

Виклад основного матеріалу. Для подолання недоліків спостереження за розімкненим циклом на практиці частіше використовують спостерігачі із спостереженням за замкненим циклом (алгоритмом).

Спостерігачі стану із спостереженням за замкненим циклом

Спостерігачі стану за замкненим циклом ще носять назву **регулярних спостерігачів**.

Задачею спостерігача стану є обчислення точного значення вектору стану або визначення його апроксимації (наближеного значення) за інформацією про виміри $y(n)$ та про математичну модель об'єкта керування. Це означає, що необхідно знайти такий функціонал F , що

$$\hat{x}(n) = F(y(i), i = 0; 1; 2; \dots; n) \approx x(n). \quad (2)$$

Після того, як вектор стану встановлено ($\hat{x}(n) \approx x(n)$), знайдене значення можна використовувати в законах керування.

Зазвичай, побудові спостерігача стану передує дослідження системи на спостерігаємість. Припустимо що умова спостерігаємість для системи (1) виконується. Перейдемо до побудови алгоритму функціонування регулярного спостерігача, який отримав назву спостерігач Льюїнбергера.

Під терміном **спостерігач Льюїнбергера** розуміють спеціальний алгоритм обробки вектору

вихідного сигналу системи (об'єкта керування (ОК)) (1) $y(n)$, який дозволяє отримати оцінку вектору стану у вигляді

$$\hat{x}(n+1) = A \cdot \hat{x}(n) + B \cdot u(n) + H \cdot (\hat{y}(n) - y(n)). \quad (3)$$

Підкреслимо, що в теорії спостерігача Льюїнбергера вважається, що сигнал $y(n)$ вимірюється абсолютно точно.

Матрицю H (матрицю зворотного зв'язку спостерігача) обирають, виходячи з умови

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\hat{y}(n) - y(n)) = \lim_{n \rightarrow \infty} (C \cdot \hat{x}(n) - C \cdot x(n)) = \lim_{n \rightarrow \infty} (C \cdot (\hat{x}(n) - x(n))) = 0.$$

Записана умова означає асимптотичне наближення з плином часу оцінки вектору стану $x(n)$ системи до істинного значення вектору стану системи $x(n)$.

Розглянемо один із можливих варіантів розрахунку кількісних значень елементів матриці H . Відніmemo від правої та лівої частин рівняння (3) відповідно праву та ліву частини першого рівняння системи (1). В результаті отримаємо різницеве рівняння, що описує зміну в дискретному часі помилки стеження $\Delta x(n)$ оцінки вектору стану системи $\hat{x}(n)$ за його істинним значенням $x(n)$

$$\Delta x(n+1) = A \cdot \Delta x(n) + H \cdot C \cdot \Delta x(n) = (A + H \cdot C) \cdot \Delta x(n), \quad (4)$$

де $\Delta x(n) = \hat{x}(n) - x(n)$.

Розв'язок різницевого рівняння (4) з плином часу прямує до нуля, якщо корені характеристичного рівняння

$$\det(z \cdot I - (A + H \cdot C)) = 0, \quad (5)$$

де I – одинична матриця, розташовані у середині кола одиничного радіусу, тобто модуль кожного кореня менший за одиницю. Якщо задати бажані значення коренів характеристичного рівняння, то можна обчислити кількісні значення елементів матриці H . Пам'ятаємо, що матриці A та C відомі, тому що відомою вважається математична модель системи у вигляді (1).

Як приклад, розглянемо процедуру обчислення кількісних значень елементів матриці H спостерігача Льюїнбергера, який пропонується використовувати в цифровій системі автоматичного керування (ЦСАК) двигуном постійного струму (ДПС), при умові, що спеціальним цифровим датчиком первинної інформації (ДПІ, сенсором) виконується вимірювання струму якоря ДПС, тобто в системі (1) матриці A , C мають вигляд [23]:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, C = [1 \ 0].$$

Характеристичне рівняння буде квадратним рівнянням

$$\det \left(\begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & z \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{bmatrix} \cdot [1 \ 0] \right) \right) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \det \left(\begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & z \end{bmatrix} - \left(\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h_{11} & 0 \\ h_{21} & 0 \end{bmatrix} \right) \right) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \det \left(\begin{bmatrix} z & 0 \\ 0 & z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} - h_{11} & a_{12} \\ a_{21} - h_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \right) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \det \left(\begin{bmatrix} z - (a_{11} - h_{11}) & -a_{12} \\ -(a_{21} - h_{21}) & z - a_{22} \end{bmatrix} \right) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (z - (a_{11} - h_{11})) \cdot (z - a_{22}) - a_{12} \cdot (a_{21} - h_{21}) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow z^2 - (a_{11} + a_{22} - h_{11}) \cdot z + (a_{22} \cdot (a_{11} - h_{11}) - a_{12} \cdot (a_{21} - h_{21})) = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow (z - z_{b1}) \cdot (z - z_{b2}) = 0,$$

де $z_{b1,2}$ – бажані значення коренів характеристичного рівняння, які задає дослідник.

Використовуючи співвідношення між коренями та коефіцієнтами алгебраїчного рівняння, отримаємо систему рівнянь, яка дозволяє обчислити елементи матриці $H = \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{21} \end{bmatrix}$ спостерігача Льюїнбергера:

$$\begin{cases} a_{11} + a_{22} - h_{11} = z_{b1} + z_{b2}; \\ a_{22} \cdot (a_{11} - h_{11}) - a_{12} \cdot (a_{21} - h_{21}) = z_{b1} \cdot z_{b2} \end{cases} \quad (6)$$

за відомими елементами матриці A та відомими бажаними значеннями коренів характеристичного рівняння $z_{b1,2}$. Підкреслимо, що структура матриці H обрана спеціально такого виду, щоб кількість рівнянь в системі (6) дорівнювала кількості невідомих.

Пошук значень елементів матриці H можна виконати із використанням функції **acker** системи комп'ютерної математики (СКМ) MATLAB, яка розв'язує рівняння вигляду

$$\det(z \cdot I - (A + B \cdot K)) = 0 \quad (7)$$

відносно невідомих елементів матриці K при умові, що матриці A, B та бажані значення коренів характеристичного рівняння (7) задані. Звернення до функції **acker** (при умові, що розглядається двовимірною математична модель ДПС) має вигляд **acker(A,B,[z_{b1} z_{b2}])**.

Рівняння (7) відрізняється від рівняння (5), яке необхідно розв'язати за допомогою функції **acker** розташуванням матриці, елементи якої необхідно обчислити. Тому перед застосуванням функції **acker** приведемо рівняння (5) до тієї структури, із якою узгоджено застосування функції **acker**, тобто матриця із невідомими елементами повинна бути розташована з права по відношенню до матриці із відомими елементами. Виконаємо транспонування матриць у виразі, що стоїть у дужках у рівнянні (5) (пам'ятаємо, що операція транспонування квадратної матриці не змінює коренів характеристичного рівняння, яке із цією матрицею пов'язане)

$$\det(z \cdot I - (A^T + C^T \cdot H^T)) = 0.$$

Остаточне звернення до функції **acker** в задачі розв'язання рівняння (5) відносно елементів матриці H може бути записане наступним чином

$$\text{acker}(A^T, C^T, [z_{b1} \ z_{b2}]).$$

Постановка задачі дослідження:

1) побудувати спостерігач Льюїнбергера для ДПС при умові, що вимірюється струм якоря ДПС за допомогою спеціального цифрового сенсора (цифрового ДПП);

2) підтвердити імітаційним моделюванням теоретичні положення, із яких випливає, що за допомогою спостерігача Льюїнбергера може бути обчислена («відновлена») кутова швидкість обертання ротора ДПС.

Розв'язання задачі дослідження Методика побудови (синтезу) спостерігача стану замкненого типу (спостерігача Льюїнбергера)

1. Задати вихідні дані (радати матриці A, C і визначити структуру матриці H).

2. Задати бажані значення коренів характеристичного рівняння спостерігача.

3. Обчислити елементи матриці H.

4. Побудувати в СКМ MATLAB+Simulink комп'ютерну математичну модель підключення спостерігача Льюїнбергера до системи (об'єкта) спостереження.

5. Виконати обчислювальний експеримент в умовах моделювання абсолютно точного вимірювання компонент вектору стану системи (об'єкту), для яких побудовано спостерігач Льюїнбергера.

6. Виконати імітаційне моделювання роботи спостерігача Льюїнбергера в умовах дії збурень, що пов'язані із роботою цифрового ДПП (похибка вимірювання та помилка квантування за рівнем АЦП).

7. Висновок.

Виконання етапів методики

Етап 1.

Задаємо вихідні дані із використанням дискретної (цифрової) математичної моделі ДПС [4,5,22]:

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

$$C=[1 \ 0]$$

Етап 2.

Задаємо однакові значення коренів характеристичного рівняння:

$$z_{b1}=0.5$$

$$z_{b2}=0.5$$

Етап 3.

Обчислюємо кількісні значення елементів матриці зворотного зв'язку спостерігача Льюїнбергера із використанням функції **acker** СКМ MATLAB+Simulink

$$H=(\text{acker}(A', C', [z_{b1} \ z_{b2}])))'$$

$$H05 =$$

$$0.1200$$

$$-0.6166$$

Етап 4.

Комп'ютерна математична модель підключення дискретного спостерігача Льюїнбергера до неперервної математичної моделі двигуна постійного струму (ДПС) представлена на рис. 1.

На рис. 1 позначено: 1 – блок моделювання першої керуючої дії (електрична напруга, що подається у ланцюг якоря ДПС); 2 – блок моделювання другої керуючої дії (гальмуючий момент, що діє на ротор ДПС); 3 – неперервна математична модель ДПС; 4 та 5 – нелінійні математичні моделі цифрових сенсорів (ДПП), які вимірюють керуючі

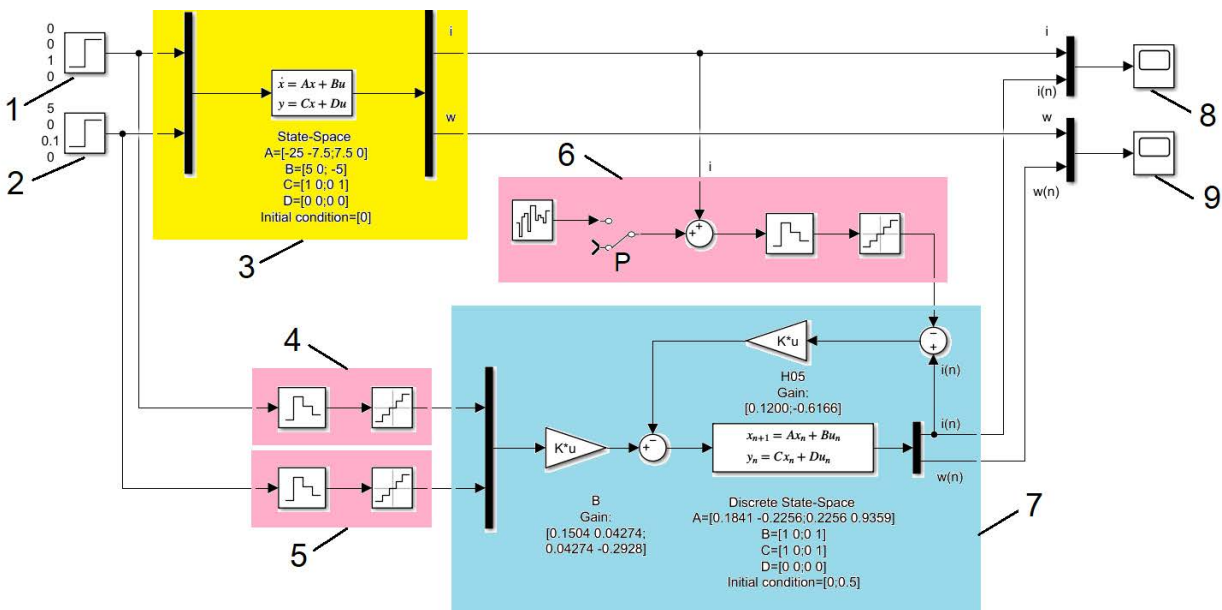


Рис. 1. Блок-схема виконання обчислювального та імітаційного експерименту в СКМ MATLAB+Simulink для перевірки теоретичних положень стосовно побудови та функціонування спостерігача Льюїнбергера

дії (період квантування за часом дорівнює 0.06 с, крок квантування за рівнем дорівнює 0.01 відносної одиниці); 6 – нелінійна математична модель цифрового сенсора (ДПС), який вимірює електричний струм у ланцюзі якоря ДПС (у відповідних блоках встановлено: період квантування за часом дорівнює 0.06 с та крок квантування за рівнем 0.01 відносної одиниці); P – перемикач, який дозволяє підключити випадковий процес типу білого шуму для імітації впливу зовнішнього збурення на результат вимірювання однієї з компонент вектору стану ДПС, якою є струм якоря (інтенсивність білого шуму встановлено 0.0001 відносної одиниці)); 7 – спостерігач Льюїнбергера (звертаємо увагу на те, що H05 – це той самий коефіцієнт зворотного зв'язку у спостерігачі Льюїнбергера,

який було обчислено за допомогою функції **acker**, а також на те, що зворотній зв'язок із матричним коефіцієнтом підсилення H05 є від'ємним, що досягається завдяки використанню знаку «мінус» у суматорі); 8 та 9 – осцилографи, які дозволяють спостерігати зміну в часі струму у ланцюзі якоря ДПС та швидкості його обертання.

Етап 5.

Результат обчислювального експерименту в умовах абсолютно точних вимірів представлено на рис. 2.

Етап 6.

Результат імітаційного моделювання в умовах дії зовнішніх випадкових збурень на сенсори, що вимірюють складові вектору стану системи (об'єкта) представлено на рис. 3.

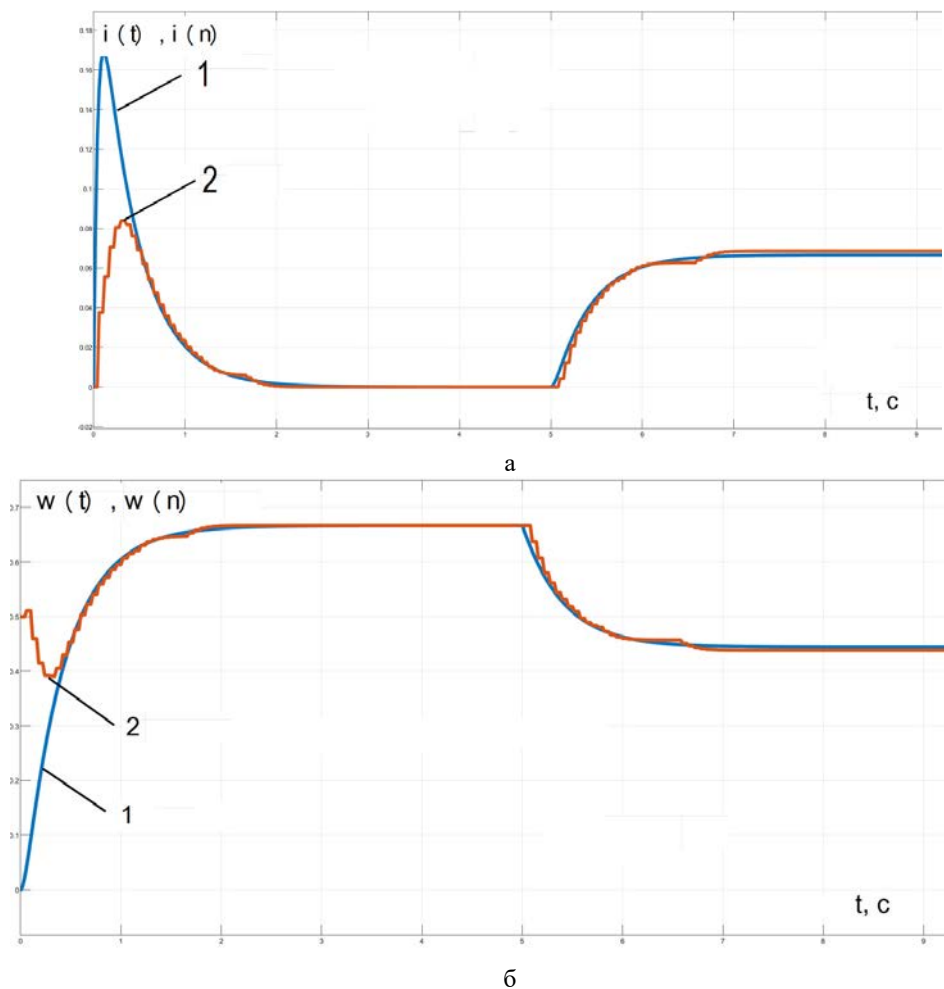


Рис. 2. Графіки зміни в часі вихідних сигналів математичних моделей 3 та 7 (див. рис. 1) при проведенні обчислювального експерименту в умовах абсолютно точного вимірювання струму якоря ДПС (перемикач P математичної моделі 6 цифрового сенсора вимірювання струму у ланцюзі якоря ДПС перебуває у нижньому положенні)

а) 1 – графік зміни в часі струму у ланцюзі якоря ДПС $i(t)$, тобто $i(t)$ вихідний сигнал неперервної математичної моделі 3; 2 – графік зміни в часі обчисленого за допомогою спостерігача Льюїнбергера струму у ланцюзі якоря ДПС $i(n)$, тобто $i(n)$ вихідний сигнал дискретного спостерігача Льюїнбергера 7;

б) 1 – графік зміни в часі кутової швидкості ротора ДПС $w(t)$, тобто $w(t)$ вихідний сигнал неперервної математичної моделі 3; 2 – графік зміни в часі обчисленої за допомогою спостерігача Льюїнбергера кутової швидкості обертання ротора ДПС $w(n)$, тобто $w(n)$ вихідний сигнал дискретного спостерігача Льюїнбергера 7

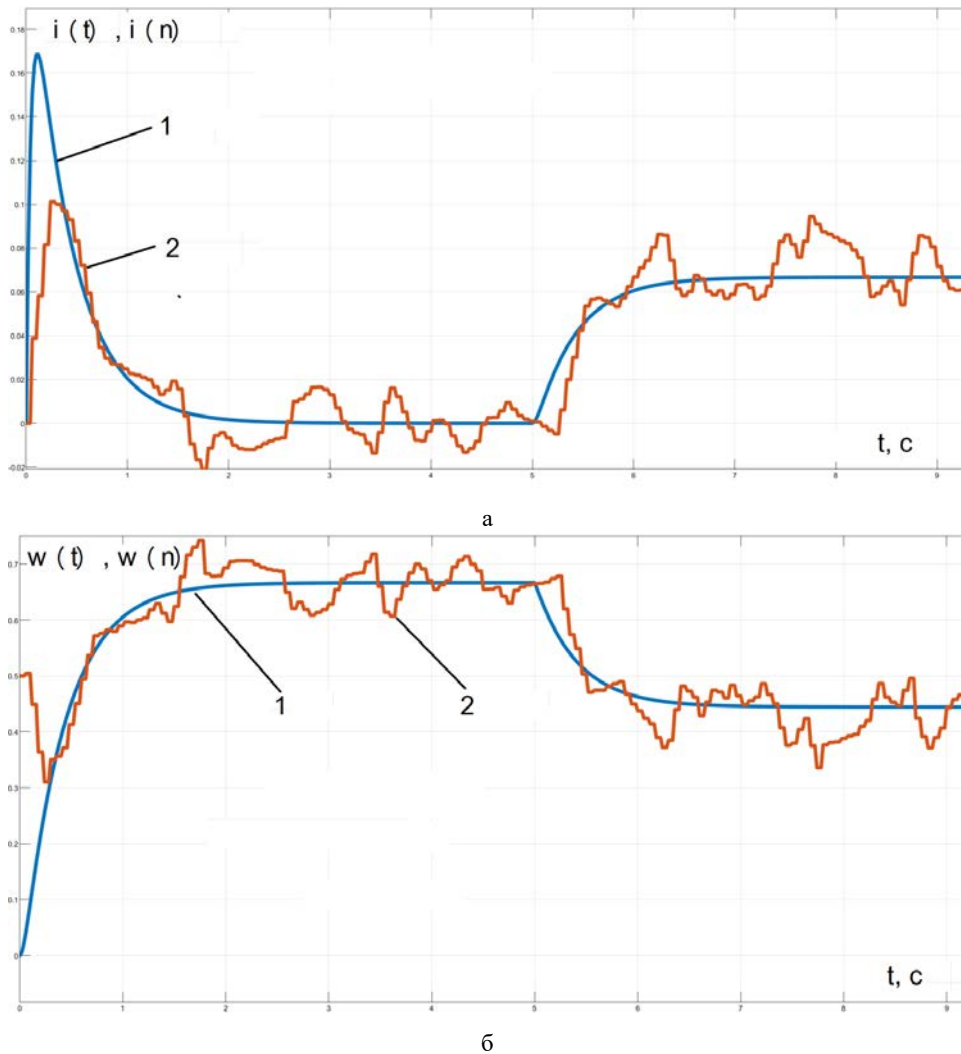


Рис. 3. Графіки зміни в часі вихідних сигналів математичних моделей 3 та 7 (див. рис. 15.1) при проведенні імітаційного моделювання роботи спостерігача Льюїнбергера в умовах збурених білим шумом вимірювань струму якоря ДПС цифровим сенсором (ДШ) 6 (перемикач Р математичної моделі 6 цифрового сенсора вимірювання струму у ланцюзі якоря ДПС перебуває у верхньому положенні)
 а) 1 – графік зміни в часі струму у ланцюзі якоря ДПС $i(t)$, тобто $i(t)$ вихідний сигнал неперервної математичної моделі 3; 2 – графік зміни в часі обчисленого за допомогою спостерігача Льюїнбергера струму у ланцюзі якоря ДПС $i(n)$, тобто $i(n)$ вихідний сигнал дискретного спостерігача Льюїнбергера 7;
 б) 1 – графік зміни в часі кутової швидкості ротора ДПС $w(t)$, тобто $w(t)$ вихідний сигнал неперервної математичної моделі 3; 2 – графік зміни в часі обчисленої за допомогою спостерігача Льюїнбергера кутової швидкості обертання ротора ДПС $w(n)$, тобто $w(n)$ вихідний сигнал дискретного спостерігача Льюїнбергера 7

Висновки. Розрахунки та імітаційне моделювання підтвердили теоретичні положення про те, що за допомогою спостерігача Льюїнбергера може бути обчислена («відновлена») кутова швидкість обертання ротора двигуна постійного струму (ДПС). Це означає, що спостерігач виконує функцію алгоритмічного вимірювання кутової швидкості ротора ДПС і тим самим вдається уникнути необхідності використання такого громіздкого, енерговитратного та ненадійного механічного пристрою, як тахогенератор в цифрових регуляторах електроприводів несучих гвинтів малої цивільної авіації.

1. В якості вхідної інформації для алгоритмів керування ДПС пропонується використовувати вихідний сигнал спостерігача Льюїнбергера. При цьому алгоритми керування та спостереження можуть бути запрограмовані у одному і тому самому мікропроцесорі.

2. Виконання умови стійкості спостерігача забезпечується відповідним вибором елементів матриці коефіцієнтів зворотного зв'язку спостерігача H .

3. В реальних умовах ДПС перебуває під впливом випадкових збурень, а це означає, що окрім того, що сенсор (ДШ) вимірює не всі компоненти

вектору стану ДПС, а лише ті, які доступні для вимірювання (в даному випадку це струм якоря ДПС), ці виміри будуть збурені дією шумів. Тому вихідний сигнал спостерігача буде завжди відрізнятися від реального стану ДПС. Спостерігач Льюїнбергера може виконувати і фільтруючі функції, але він не є оптимальним фільтром. Для досягнення найменшого значення дисперсії помилки, треба використовувати спеціальні оптимальні фільтри.

4. В якості вимірювача струму якоря ДПС пропонується використовувати алгоритмічний цифровий сенсор (ДП), у якому аналоговий сигнал з чуттєвого елемента спочатку подається на аналоговий фільтр низьких частот (який сигнали із низькими частотами пропускає), потім сигнал подається на аналогово-цифровий перетворювач, далі на оптимальний цифровий фільтр, який максимально подавляє збурення і мінімально спотворює корисний сигнал і вже після цього цифровий сигнал з виходу сенсора подається на вхід цифрового спостерігача.

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), <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:561097/FULLTEXT01.pdf>, last accessed 2023/03/10.
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), <https://doi.org/10.2514/6.2008-140>, last accessed 2023/03/10.
4. Tachinina O., Lysenko O., Alekseeva I., Sushyn I., Novikov V. Method of algorithmic correction of dynamic properties of special-purpose electric drive //October 03 - 07, 2022 Kharkiv, Ukraine. IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – IEEE, 2022. – С. 263-266. pubs-permissions@ieee.org IEEE Catalog Number: CFP22Z72-ART. ISBN: 979-8-3503-9920-2
5. Lysenko, O., Tachinina, O., Alekseeva, I., Guida, O., Novikov, V., Sushyn, I. (2023). Methodology of Energy-Efficient Algorithmic Modernization of Dynamic Characteristics of Digital Electric Drives of Mechatronic Devices for Small Civil Aviation. In: Ostroumov, I., Zaliskyi, M. (eds) Proceedings of the International Workshop on Advances in Civil Aviation Systems Development. ACASD 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 736. pp 152-165. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38082-2_12
6. Oleksandr Lysenko, Olena Tachinina, Valeriy Novikov, Oleksandr Guida, Fedir Kirchu, Ihor Sushyn. Methodology of synthesizing digital regulators in precision electric drives for orientation and stabilization target tracking system of mobile robot's directional sensors. CEUR Workshop Proceedings, 2023, Vol. 3513, pp. 51-63. ISSN 1613-0073. <https://ceur-ws.org/Vol-3513/> **Springer (Scopus)**
7. 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), <https://doi.org/10.2514/6.2019-4486>, last accessed 2023/03/10.
8. 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), <https://doi.org/10.2514/6.2018-5009>, last accessed 2023/03/10.
9. Sforza, P.: Commercial Airplane Design Principles. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford (2014).
10. 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), <https://doi.org/10.1177/0954410011419612>, last accessed 2023/03/10.
11. Sforza, P.: Manned Spacecraft Design Principles. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford (2015).
12. Aliofkhaezai, M., Makhlof, A. S. H.: Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Aerospace and Automotive Industries. Elsevier Science & Technology Books. Elsevier, Oxford (2015).
13. 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), <https://doi.org/10.2514/6.2009-629>, last accessed 2023/03/10.
14. Moir, I., Seabridge, A.: Design and Development of Aircraft Systems. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK (2012), <https://doi.org/10.1002/9781118469156>, last accessed 2023/03/10..
15. 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).

16. Lysenko, O., Tachynina, O., Ponomarenko, S., Guida O.: Optimal Branched Trajectories Theory. Igor Sikorsky KPI, Kyiv (2023), <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52094>, last accessed 2023/03/10.

17. 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).

18. Sforza, P.: Theory of Aerospace Propulsion. Elsevier Science & Technology Books, Oxford (2011).

19. 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), <https://doi.org/10.1155/2018/4258020>, last accessed 2023/03/10.

20. 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), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05581>, last accessed 2023/03/10.

Lysenko, O.: HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course [S084-Ukraine] Mathematical programming and operations research in telecommunications, 14 Lectures. Fall 2017. <https://www.hufocw.org/Course/263>

Lysenko, O.: HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course "Digital automatic control systems for information communications engineers", 14 Lectures. Spring 2020. <https://www.hufocw.org/Course/197>

21. Graham C. Goodwin, Stefan F. Graebe, Mario E. Salgado.: Control System Design. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2001. ISBN – 0-13-958653-9

**Lysenko O.I., Tachynyna O.M., Ponomarenko S.O., Furtat O.V., Hetman O.V., Podobyed V.V.
METHODOLOGY FOR THE SYNTHESIS OF A REGULAR CONDITION MONITOR
FOR DIGITAL REGULATORS OF THE ELECTRIC DRIVES OF THE MAIN ROTORS
OF SMALL CIVIL AVIATION**

The article proposes a method of synthesis of a regular status monitor for digital controllers of electric drives of the main rotors of small civil aviation. Calculation of the parameters of a regular state observer (Lewinberger observer) and simulation modeling of operation under specified conditions and under the influence of random disturbances were performed. Simulation modeling confirmed the theoretical proposition that the angular velocity of the rotor of a DC motor can be calculated ("restored") with the help of a Lewinberger observer. This means that the observer performs the function of an algorithmic meter of the angular velocity of the DPS rotor and thereby avoids the need to use such a special cumbersome, energy-consuming and unreliable mechanical device as a tachogenerator. It is proposed to use the output signal of the Lewinberger observer as input information for DPS control algorithms. At the same time, control and monitoring algorithms can be programmed in the same microprocessor.

Calculations and simulations confirmed the theoretical proposition that the angular velocity of the rotor of a direct current motor (DC motor) can be calculated ("reconstructed") with the help of a Lewinberger observer. This means that the observer performs the function of algorithmic measurement of the angular speed of the DPS rotor and thus it is possible to avoid the need to use such a cumbersome, energy-consuming and unreliable mechanical device as a tachogenerator in the digital controllers of the electric drives of the main rotors of small civil aviation.

In most cases, autonomous predictive evaluation in technical systems is not used for information support of the control algorithm, because in practice it is impossible to obtain sufficiently accurate initial conditions and parameters of the mathematical model (1) and therefore it is not possible to make a sufficiently accurate forecast of the system state acceptable for practical use time interval. To overcome the shortcomings of open-loop monitoring, in practice, closed-loop monitoring (algorithm) monitors are more often used.

Key words: acker functions, Lewinberger observers, propeller drives, sensors, mathematical model, regular observer.