

УДК 681.518:621.313:681.7.068

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/23>

Лисенко О.І.

<https://orcid.org/0000-0002-7276-9279>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тачиніна О.М.

<https://orcid.org/0000-0001-7081-0576>

Київський авіаційний інститут

Чумаченко С.М.

<https://orcid.org/0000-0002-8894-4262>

Державний науково-дослідний інститут авіації Міністерства оборони України

Пономаренко С.О.

<http://orcid.org/0000-0001-5512-3778>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фуртат С.О.

<https://orcid.org/0000-0001-5534-9769>

Київський фаховий коледж міського господарства

Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Фуртат О.В.

<https://orcid.org/0000-0001-8192-4026>

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ПРЕЦИЗИЙНИЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ОПТОВОЛОКОННИХ ЧУТТЄВИХ ЕЛЕМЕНТІВ АВІОНІКИ

У статті досліджується задача підвищення точності керування електроприводом механізму намотки оптоволокна під час виготовлення чуттєвих елементів волоконно-оптичних сенсорів (ВОС) авіоніки. Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком аерокосмічної галузі та зростанням попиту на ВОС, які широко застосовуються в навігаційних системах супутників, літальних апаратів та іншої високоточної техніки. Важливою технологічною операцією у виробництві таких сенсорів є намотування оптичного волокна на катушку з підтриманням заданих значень лінійної швидкості переміщення волокна та тягового зусилля. Порушення цих параметрів призводить до зниження стабільності поляризації оптичного сигналу та погіршення точності роботи сенсорних систем.

Показано, що традиційні системи керування намоткою, які базуються на використанні ПІД-регулятора в каналі керування швидкістю, забезпечують прийнятні результати лише за умов відсутності випадкових збурень. Проте у реальних умовах експлуатації значний вплив мають стохастичні та імпульсні збурення, пов'язані з неоднорідністю механічної пружності оптоволокна вздовж його довжини. Для вирішення цієї проблеми запропоновано структурно-алгоритмічне вдосконалення системи керування шляхом введення другого каналу регулювання тягового зусилля та використання двоканального регулятора.

У запропонованій структурі в каналі керування лінійною швидкістю оптоволокна застосовано ПІД-регулятор, що забезпечує компенсацію плавних параметричних збурень, пов'язаних зі зміною радіуса



намотування та моменту інерції системи. У каналі керування тяговим зусиллям запропоновано використати узагальнений інтегро-диференціюючий (УІД) регулятор, який характеризується розширеними можливостями компенсації випадкових збурень та підвищеною робастністю.

Ефективність запропонованого підходу підтверджена результатами математичного моделювання та комп'ютерного імітаційного експерименту. Дослідження проводилися для випадків дії імпульсних збурень обмеженої амплітуди та стохастичних впливів типу реального білого шуму. Показано, що використання вдосконаленої системи з УІД-регулятором у каналі тягового зусилля дозволяє зменшити амплітуду відхилень при імпульсних збуреннях більш ніж на порядок, а дисперсію відхилень при стохастичних збуреннях – майже на два порядки порівняно із системою-прототипом.

Отримані результати підтверджують принципову можливість реалізації прецизійного керування електроприводом механізму намотки оптоволокна та можуть бути використані для підвищення точності й надійності виготовлення чуттєвих елементів волоконно-оптичних сенсорів авіоніки.

Ключові слова: прецизійне керування електроприводом, система намотки навігаційного оптоволокна, волоконно-оптичні чуттєві елементи, волоконно-оптичні гіроскопи, навігаційне оптоволокно.

Постановка проблеми. Сукупний світовий об'єм ринку волоконно-оптичних сенсорів (ВОС) на сьогоднішній день перевищує 2.4 мільярди доларів [1, 2]. Доля ринку ВОС авіоніки складає приблизно 80% [3]. Враховуючи стрімке світове зростання аерокосмічної промисловості прогнозується геометричне зростання попиту на ВОС авіоніки [4]. В ВОС авіоніки за звичай використовують оптичне волокно (оптоволокно), яке зберігає стан лінійної поляризації. Для підтримки цього стану використовують спеціальний технологічний прийом, який називають асиметричне бокове напруження [4]. Підтримка цього напруження на розрахунковому рівні під час виготовлення чуттєвого елементу із складу ВОС забезпечує точність та стабільність роботи ВОС в цілому. Чуттєвий елемент ВОС – це катушка із намотаним на неї оптоволоконном. Для підсилення ефекту Саньяка в сучасних чуттєвих елементах ВОС авіоніки намотують на катушку спеціальним чином до декількох кілометрів (до 10 км) навігаційного оптоволокна [5]. Виконання підвищених вимог до намотування навігаційного оптоволокна на катушку завдяки точному слідуванню за заданими (номінальними) лінійною швидкістю та тяговим зусиллям електроприводу механізму намотки оптоволокна дозволило суттєво підвищити точність та надійність роботи ВОС на таких супутниках, як «Планк» та «Галілео» [6]. Однак продовжується пошук шляхів вдосконалення технології виготовлення чуттєвих елементів ВОС авіоніки [7]. Вдосконаленню однієї із технологічних операцій цієї технології і присвячена ця стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В існуючих системах намотування оптоволокна чуттєвих елементів ВОС [1-4] використовують дві катушки: перша – це та, з якої подають оптово-

локно; друга – це та, на яку подають оптоволокно. До першої катушки приєднано спеціальну тормозну електромагнітну муфту (ТЕМ), яка задає момент навантаження m . До другої катушки підключено електропривод із двигуном постійного струму (ДПС), який створює тяговий момент на валу двигуна M . Завдяки керуванню електроприводом ДПС та ТЕМ вдається підтримувати сталу лінійну швидкість оптоволокна та задане тягове зусилля (див. рис. 1).

В каналі керування лінійною швидкістю (блок C_1 , рис. 1) звичай використовують ПІД – регулятор [8-13].

Якщо $M = m$, то $I \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - m = 0$, де I – момент інерції. Це означає, що кутова швидкість ω буде дорівнювати бажаному заданому значенню. В системі-прототипі існують плавні параметричні збурення. Ці збурення пов'язані із зміною радіусу намотки оптоволокна. Зміна радіусу впливає на лінійну швидкість пересування оптоволокна та момент інерції на валу ДПС. Плавні параметричні збурення компенсуються квазіінваріантними властивостями ПІД – регулятора. Систему-прототип, модель якої представлено на рис. 1, можна вважати прийнятною для досягнення прецизійних показників регулювання при умові відсутності випадкових збурень у каналі, що керується ТЕМ. Але при їх наявності досягти прецизійного керування не можливо, тобто нехтувати цими випадковими збуреннями вже неможна. Випадкові збурення у каналі, що керується ТЕМ, виникають тому, що оптоволокно має різну механічну пружність, яка випадковим чином розподілена по його довжині [4-7].

Постановка завдання. Виникає науково-технічна задача щодо забезпечення прецизійного керування швидкістю просування оптоволокна та тяговим зусиллям на ньому в умовах дії випадкових збурень. Розглядаються збурення типу імпуль-

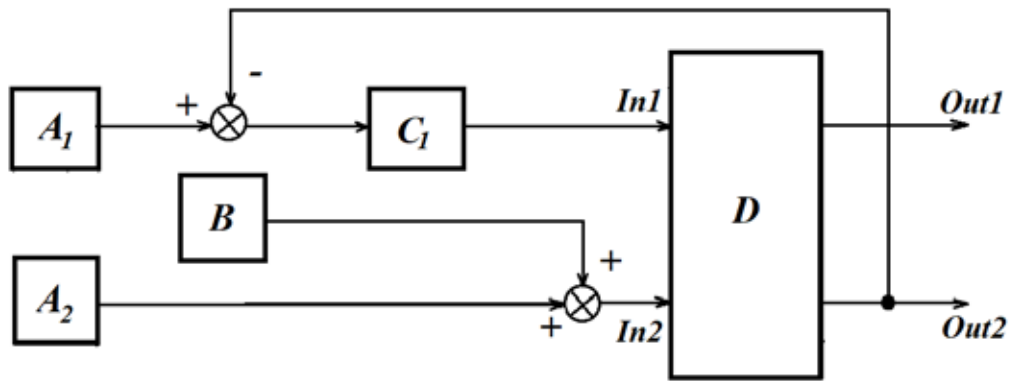


Рис. 1. Структурна схема моделі системи-прототипу намотки оптоволокна: в каналі керування швидкістю намотки (вихід out 2) A_1 є задатчиком номінальної швидкості намотки; в каналі керування тяговим зусиллям намотки (вихід out 1) A_2 є задатчиком номінального тягового зусилля намотки; B – блок моделювання зовнішнього збурення, яке пов’язано із зміною пружності оптоволокна; C_1 – регулятор в каналі керування лінійною швидкістю пересування оптоволокна; D – блок моделювання електроприводу; $In_{1,2}$ – відповідно входи у блок D за напругою, що подається у ланцюг якоря двигуна постійного струму (ДПС), та за тормозним навантаженням, що подається на ротор ДПС задатчиком тягового зусилля A_2 (тормозною електромагнітною муфтою)

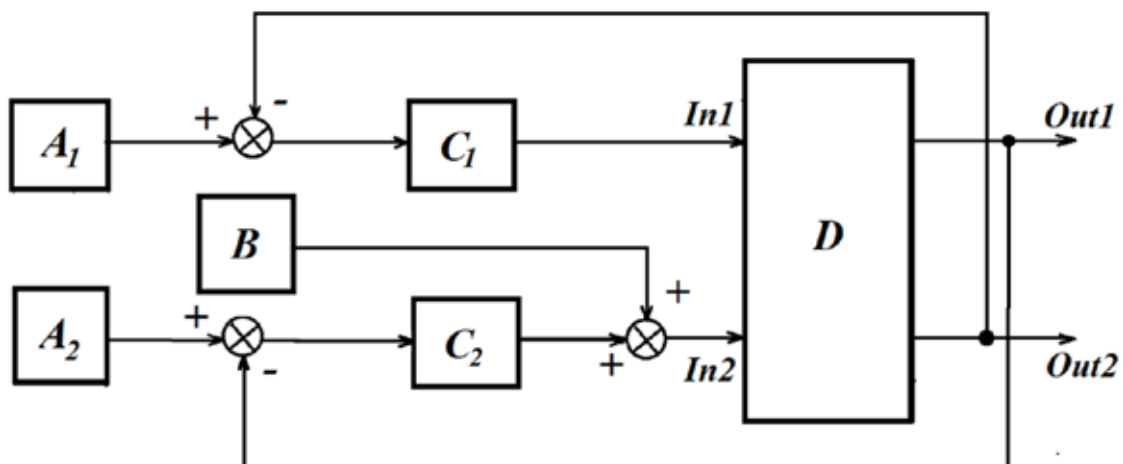


Рис. 2. Вдосконалена структурна схема моделі системи-прототипу намотки оптоволокна

сних впливів обмеженої амплітуди у випадкові моменти часу та реального білого шуму (дискретного білого шуму).

Виклад основного матеріалу. У статті пропонується: по-перше, структурно покращити систему – прототип завдяки підключенню регулятора у канал керування тяговим зусиллям (див. рис. 2, блок C_2); по-друге, використати у канал керування тяговим зусиллям УІД – регулятор замість ПІД – регулятора.

Після виконання переходу від структури системи-прототипу (рис. 1) до вдосконаленої структури (рис. 2) було проведено дослідження алгоритмів керування в наступній послідовності:

1) в позиції блоку C_2 вдосконаленої системи було розташовано ПІД – регулятор і проведено

дослідження щодо забезпечення точності керування лінійною швидкістю пересування оптоволокна та тяговим зусиллям електроприводу механізму намотки оптоволокна;

2) в позиції блоку C_2 вдосконаленої системи було розташовано УІД – регулятор і проведено дослідження щодо забезпечення точності керування лінійною швидкістю оптоволокна та тяговим зусиллям електроприводу механізму намотки оптоволокна.

Для порівняння ефективності запропонованих рішень була використана спеціальна методика перевірки забезпечення точності керування лінійною швидкістю оптоволокна та тяговим зусиллям електроприводу механізму намотки оптоволокна.

Етапи методики:

Етап 1. Побудова математичної моделі динаміки електроприводу системи намотки оптоволокна (в подальшому будемо використовувати позначення – електропривод D (рис. 1 та 2)).

Етап 2. Параметричне налаштування ПДД – регулятора системи-прототипу.

Етап 3. Параметричне налаштування УІД – регулятора для вдосконаленої системи (рис. 2).

Етап 4. Комп’ютерний імітаційний експеримент, який полягав у моделюванні імпульсного та стохастичного збурюючих впливів у каналі керування тяговим зусиллям:

Пункт 4.1. Дослідження системи прототипу (рис. 1) із ПДД – регулятором, який налаштовано при виконанні етапу 2 методики.

Пункт 4.2. Дослідження вдосконаленої системи (рис. 2) із ПДД – регуляторами у позиціях C_1 та C_2 (рис. 2). Параметри ПДД – регуляторів однакові і співпадають із параметрами ПДД – регулятора, який було налаштовано при виконанні етапу 2 методики.

Пункт 4.3. Дослідження вдосконаленої системи із ПДД – регулятором у позиції C_1 та із УІД – регулятором у позиції C_2 (рис. 2).

Підкреслимо, що при проведенні комп’ютерного експерименту лінійна швидкість та тягове зусилля вимірювалися у відносних одиницях.

Спочатку було виконано пункти 4.1, 4.2 та 4.3 етапу 4 методики при моделюванні імпульсного збурення у каналі керування тяговим зусиллям. Реакція систем (рис. 1 та 2) на імпульсне збурення аналізувалася із використанням графічних образів перехідних процесів та кількісних значень максимальних відхилень від номінальних значень лінійної швидкості оптоволокна та тягового зусилля на ньому.

Потім було виконано пункти 4.1, 4.2 та 4.3 етапу 4 методики при моделюванні стохастичного збурення типу реальний білий шум (дискретний білий шум) у каналі керування тяговим зусиллям. Реакція систем (рис. 1 та 2) на стохастичний вплив оцінювалася із використанням оцінки дисперсії відхилення від номінальних значень лінійної швидкості оптоволокна та тягового зусилля на ньому.

Розглянемо виконання етапів методики.

Етап 1.

Об’єктом керування є електропривод з двигуном постійного струму (ДПС). На структур-

них схемах (рис. 1 та 2) об’єкт керування позначено D.

МІМО LTI (багатовимірна лінійна стаціонарна) математична модель електроприводу D у неперервному просторі станів будується із використанням математичних моделей процесів, які відбуваються в її електричній, електронній та механічній частинах [11, 12]:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + Ri + e = U ;$$

$$e = C_e \omega ;$$

$$I \cdot \frac{d\omega}{dt} = M - m ;$$

$$M = C_M i ,$$

де L – індуктивність якірного ланцюга;
 R – активний опір якірного ланцюга;
 e – електрорушійна сила самоіндукції (ЕДС);
 U – напруга, яка прикладається до ланцюга якоря;
 C_e, C_M – коефіцієнти, що залежать від конструктивних параметрів ДПС;
 ω – швидкість обертання ротора;
 M – тяговий момент на валу двигуна;
 m – момент навантаження;
 I – сумарний момент інерції всіх механічних частин, приведений до ротора ДПС.

Підкреслимо, що за відомим діаметром технологічного матеріалу та геометричними параметрами катушки можливо обчислювати зміну у часі радіусу намотки і тим самими корегувати плавні параметричні збурення лінійної швидкості та тягового зусилля намотки.

Математична модель електроприводу D та рівняння виходу у неперервному просторі станів набувають вигляду

$$\begin{bmatrix} \frac{di(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{C_e}{L} \\ \frac{C_m}{I} & 0 \end{bmatrix}}_A \cdot \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{I} \end{bmatrix}}_B \cdot \begin{bmatrix} U(t) \\ m(t) \end{bmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t),$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} \Leftrightarrow y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t),$$

де

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U(t) \\ m(t) \end{bmatrix} ;$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{C_e}{L} \\ \frac{C_m}{I} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{I} \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

За звичай змінні у математичній моделі електроприводу D приводять до безрозмірного вигляду завдяки тому, що замінюють розмірні змінні на відносні, де ділення розмірних (абсолютних) значень відбувається на номінальні значення цих змінних. Припустимо, що після переходу до безрозмірних змінних параметри матриць A, B матимуть вигляд [14, 15, 16]:

$$A = \begin{bmatrix} -25 & -7.5 \\ 7.5 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & -5 \end{bmatrix}.$$

Етап 2.

Первинне налаштування ПД – регулятора (C_1 , рис. 1) для системи-прототипу було виконано методом Зіглера-Нікольса із використанням перехідного процесу об'єкта керування [17].

Потім первинне налаштування ПД – регулятора було покращено завдяки комп'ютерному моделюванню та чисельній оптимізації параметрів ПД – регулятора за критерієм мінімальності часу тривалості перехідного процесу при умові відсутності статичної помилки [16]. Остаточні параметри математичної моделі ПД – регулятора, яка була реалізована у адитивній формі, набули таких значень: коефіцієнт передачі за позиційним сигналом $Kp = 1$; коефіцієнт передачі за інтегральним сигналом $Ki = 2.6667$; коефіцієнт передачі за диференціальним сигналом $Kd = 0.0882$.

Етап 3.

Математична модель УД-регулятора має вигляд [18]

$$W_{GID}(s) = \frac{k_{GID}}{s^v} \cdot \frac{(T_1s + 1)^{m_1} \cdot (T_3s + 1)^{m_3}}{(T_2s + 1)^{m_2} \cdot (T_4s + 1)^{m_4}}.$$

На параметри математичної моделі накладаються наступні обмеження: $k_{GID} > 0$; $v, m_{1,2,3,4} \in \{0; 1; 2; \dots\}$; $T_{1,2,3,4} > 0$.

Нагадаємо, що згідно термінології, яка використовується у національній або англійській науковій літературі, УД – регулятор ще називають відповідно узагальненим інтегро-диференціальним контуром або з'єднанням ідеального інтегра-

тора із узагальненими компенсаторами упередження – затримки.

Для налаштування УД – регулятора скористуємося методом, який викладено в [18]. Покладемо, що $k_{GID} = Kp = 1$; $v = 1$, $m_{1,2,3,4} = 1$, де Kp – коефіцієнт передачі за позиційним сигналом в ПД – регуляторі, який налаштовано при виконанні етапу 2 методики.

Параметри УД – регулятора $T_{1,2,3,4}$ обчислимо за формулами

$$T_1 = \frac{3.3}{\omega_z}; T_3 = \frac{1}{3.3 \cdot \omega_z}; T_2 = \frac{1}{33 \cdot \omega_z}; T_4 = \frac{1}{330 \cdot \omega_z},$$

де ω_z – частота зрізу. Ця частота обчислюється за відомою матричною передавальною функцією електропривода D (рис. 1 та 2), математична модель якого побудована при виконанні етапу 1 методики:

$$W(s) = \begin{bmatrix} W_{11}(s) & W_{12}(s) \\ W_{21}(s) & W_{22}(s) \end{bmatrix},$$

де

$$W_{11}(s) = \frac{5s}{s^2 + 25s + 56.25};$$

$$W_{12}(s) = \frac{37.5}{s^2 + 25s + 56.25};$$

$$W_{21}(s) = \frac{37.5}{s^2 + 25s + 56.25};$$

$$W_{22}(s) = \frac{-5s - 125}{s^2 + 25s + 56.25}.$$

На діаграмах Бode (див. рис. 3) знаходимо точку, у якій логарифмічна амплітудно-частотна характеристика перехресного зв'язку приблизно дорівнює нулю: $\omega_z = 0.49 \text{ rad/s}$. Результат обчислення параметрів:

$$T_1 = \frac{3.3}{\omega_z} = 6.7347s; T_3 = \frac{1}{3.3\omega_z} = 0.6184s;$$

$$T_2 = \frac{1}{33\omega_z} = 0.0618s; T_4 = \frac{1}{330\omega_z} = 0.0062s.$$

Етап 4.

Результат виконання усіх пунктів четвертого етапу методики при дослідженні впливу імпульсного збурення.

Результат представлено на рис. 4 та 5, де цифрами 1, 2, 3 позначено перехідні процеси на виходах електроприводу D при виконанні відповідно пунктів 4.1, 4.2, 4.3 етапу 4 методики. Розглянемо хронологію імітаційного експерименту:

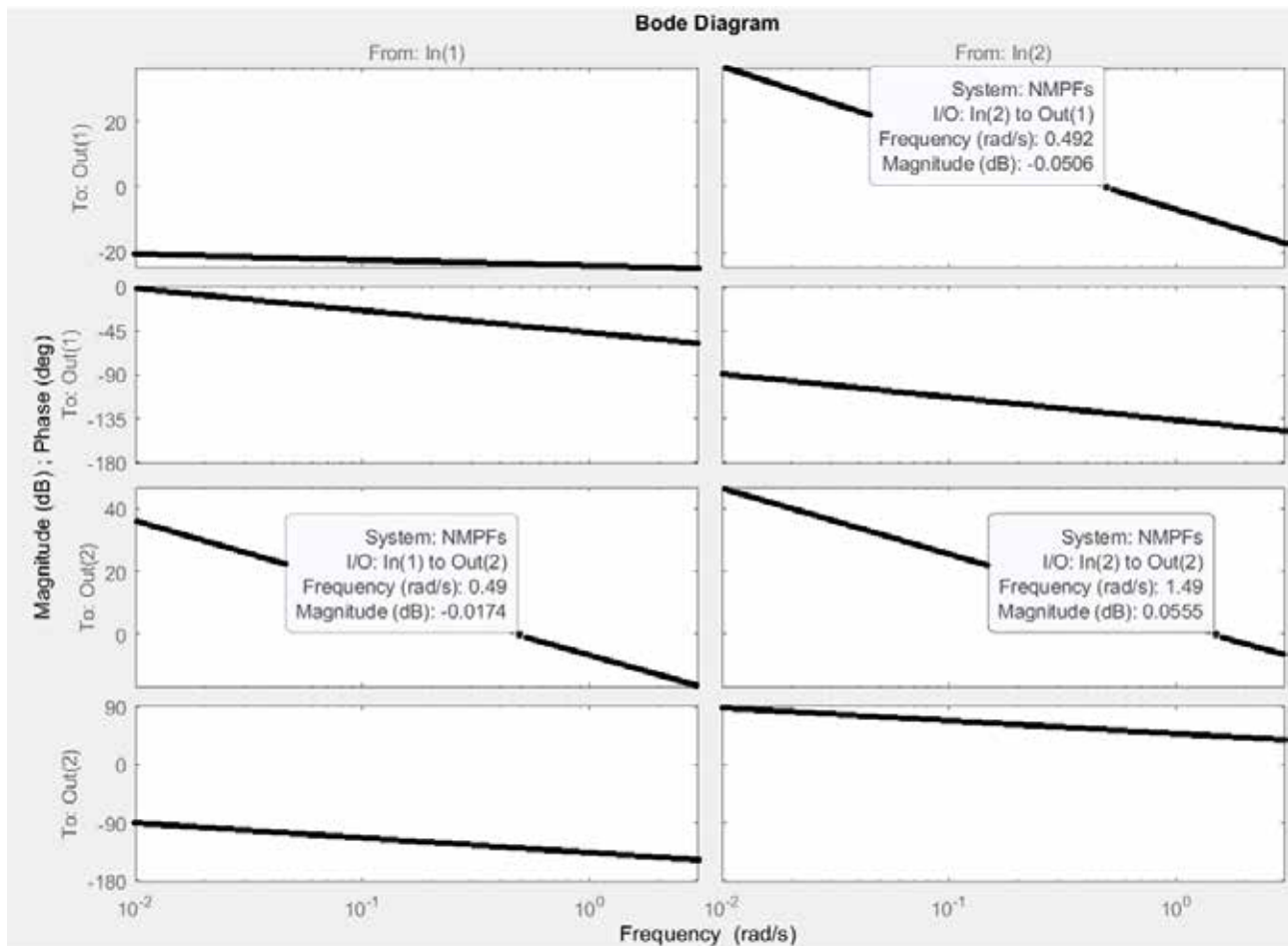


Рис. 3. Діаграми Бодє, що побудовані із використанням матричної передавальної функції електропривода D, яка на рисунках позначена NMPFs

– в момент початку імітаційного експерименту ($t=0$) блок A_1 задав номінальне значення лінійної швидкості намотування оптоволокна, яке дорівнює відносній одиниці, (рис. 1 та 2);

– на четвертій секунді після подачі східчастого керуючого сигналу у каналі керування швидкістю було подано східчастий керуючий сигнал у каналі керування тяговим зусиллям (блок A_2 задав номінальне значення тягового зусилля намотування оптоволокна, яке дорівнювало 0.1 відносної одиниці, рис. 1 та 2);

– на сьомій секунді блок B (рис. 1 та 2) подав позитивне імпульсне збурення тривалістю 1 с та амплітудою 0.1 відносних одиниць у каналі керування тяговим зусиллям.

Результат виконання усіх пунктів четвертого етапу методики при дослідженні впливу стохастичного збурення полягають у наступному.

Вплив реального білого шуму будемо оцінювати відповідно за дисперсіями відхилень лінійної швидкості оптоволокна та тягового зусилля на ньому від номінальних значень. Припускаємо,

що в часі відхилення змінюються як ергодичні процеси. Тому, для обчислення оцінок відповідних дисперсій (D_V – дисперсія лінійної швидкості намотування оптоволокна на катушку та D_F – дисперсія тягового зусилля), було використано формули із усередненням у часі квадратів відхилень лінійної швидкості оптоволокна та тягового зусилля на ньому від номінальних значень на інтервалі моделювання. Цей інтервал приймався рівним 100 с. В якості джерела стохастичного збурення використовувався генератор дискретного білого шуму із інтервалом дискретизації за часом 0.1 с та інтенсивністю (noise power) 0.01 відносних одиниць. Було отримано наступні значення оцінок дисперсій у відповідності до пунктів етапу 4 методики:

Пункт 4.1. Дисперсії у системі прототипі (рис. 1): $D_{V1}=0.02923$; $D_{F1}=0.01775$.

Пункт 4.2. Дисперсії у вдосконаленій системі (рис. 2 із використанням у позиціях $C_{1,2}$ ПІД – регуляторів): $D_{V2}=0.01235$ $D_{F2}=0.0005702$.

Пункт 4.3. Дисперсія у вдосконаленій системі(рис. 2 із використанням у позиції C_1

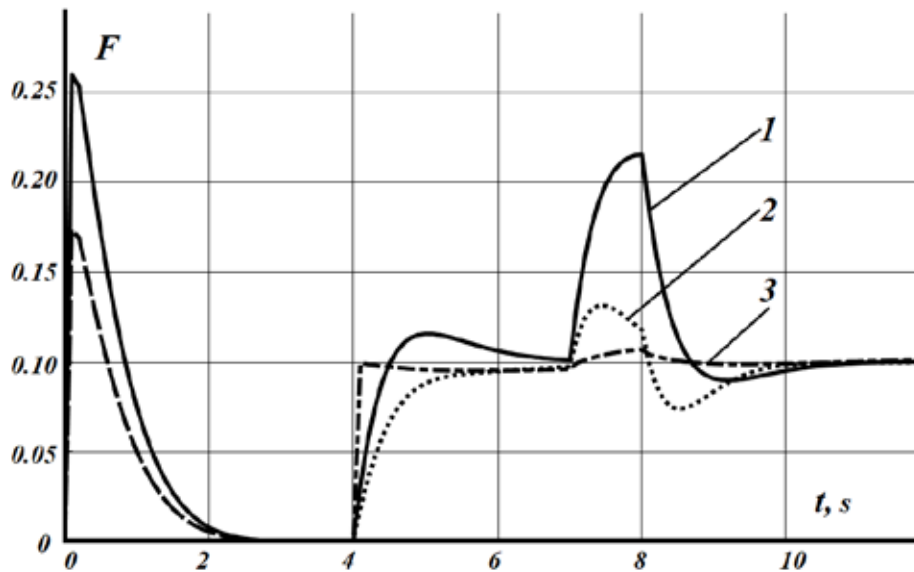


Рис. 4. Перехідні процеси за тяговим зусиллям: F – тягове зусилля у відносних одиницях, що створює електропривод D на виході 1 (рис. 1 та рис. 2); 1, 2, 3 – зміна тягових зусиль в часі при дії керуючого та збурюючого впливів згідно хронологічної програми подачі цих впливів при проведенні імітаційного експерименту

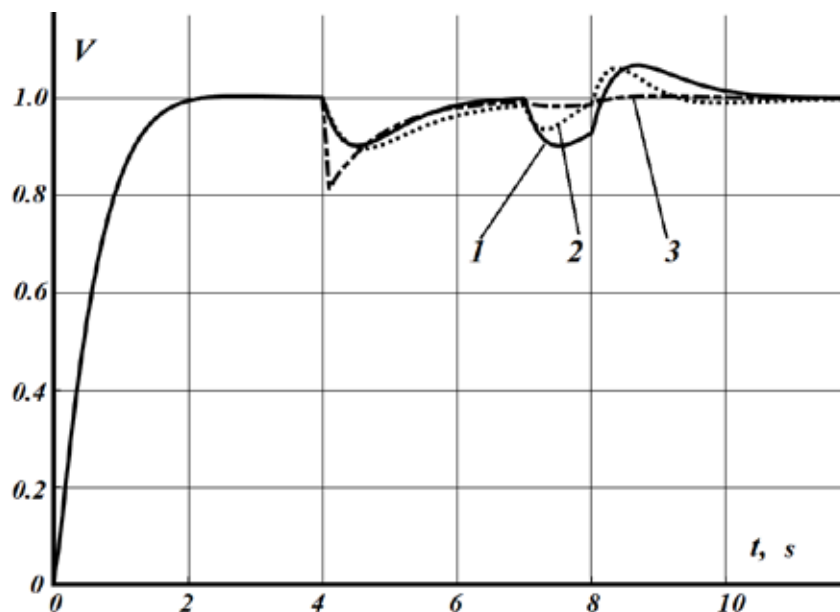


Рис. 5. Перехідні процеси за лінійною швидкістю переміщення оптоволокну: V – лінійна швидкість у відносних одиницях на виході 2 електроприводу D ; 1, 2, 3 – зміна лінійної швидкості в часі при дії керуючого та збурюючого впливів згідно хронологічної програми подачі цих впливів при проведенні імітаційного експерименту

ПД – регулятора та у позиції C_2 УІД – регулятора): $D_{V3} = 0.00159$ $D_{F3} = 0.0001162$.

Аналіз впливу імпульсного збурення.

Аналіз графіків (рис. 4 та 5) показує суттєве якісне та кількісне покращення процесу регулювання заданих значень лінійної швидкості пересування оптоволокну та тягового зусилля на ньому при

підключенні ПД – регулятора або УІД – регулятора у канал задавання тягового зусилля (позиція C_2 , рис. 2). Амплітуда сплеску тягового зусилля від дії імпульсного збурення у вдосконаленій системі із ПД – регулятором у позиції C_2 (рис. 2) у чотири рази менша ніж у системі – прототипі (графіки 1 та 2, рис. 4). А при підключенні УІД –

регулятора у вказану позицію відбувається зменшення амплітуди сплеску більш ніж у 10 разів (графіки 1 та 3, рис. 4). Крім того, відбувається плавний і практично миттєвий вихід вдосконаленої системи на задане тягове зусилля при його подачі на 4 – тій секунді із задатчика A_2 (графік 3, рис. 4).

Амплітуда сплеску лінійної швидкості пересування оптоволокна відповідно у два та п'ять разів менша у вдосконаленій системі порівняно із системою-прототипом при підключенні у позицію C_2 ПІД або УІД – регулятора ((розглядаємо графіки 1, 2, 3 на 7 – й секунді рис. 5).

Аналіз впливу стохастичного збурення.

Завдяки використанню у позиціях $C_{1,2}$ ПІД – регуляторів вдалося майже у 2.4 рази зменшити дисперсію лінійної швидкості оптоволокна та у 31 раз дисперсію тягового зусилля на ньому.

Завдяки використанню у вдосконаленій системі (рис. 2) у позиції C_1 ПІД – регулятора та у позиції C_2 УІД – регулятора) вдалося більш ніж у 18 разів зменшити дисперсію лінійної швидкості оптоволокна та майже у 153 рази дисперсію тягового зусилля на ньому.

Висновки. У статті показано принципову можливість досягнення прецизійного керування електроприводом механізму намотки оптоволокна на катушку при виготовленні чутливих елементів авіоніки.

У статті запропоновано двоканальний прецизійний регулятор для електроприводу механізму намотки оптоволокна чутливих елементів авіоніки, який дозволяє прецизійно керувати лінійною швидкістю оптоволокна та тяговим зусиллям на ньому

Прецизійність функціонування запропонованого регулятора порівняно із прототипом підтверджується зменшенням більш ніж на порядок впливу імпульсних епізодичних збурень і майже на два порядки впливу неперервних стохастичних збурень на лінійну швидкість оптоволокна та тягове зусилля на ньому.

Суть пропозицій по прецизійному керуванню полягає у структурно -алгоритмічному вдосконаленні системи – прототипу. В каналі керування лінійною швидкістю оптоволокна пропонується

використовувати існуючий у системі-прототипі ПІД – регулятор. В каналі керування тяговим зусиллям, яке діє на оптоволокно, пропонується використати УІД – регулятор.

Підкреслимо, що алгоритм прецизійного керування базується на квазіінваріантних властивостях інтегральних складових законів керування по кожному із каналів. При цьому враховано:

1) прецизійне керування тяговим зусиллям досягається завдяки квазіінваріантному керуванню моментом навантаження m , який створюється спеціальною керованою муфтою;

2) при прецизійному керуванні швидкістю намотки враховується, що в процесі намотки збільшується діаметр катушки механізму намотки оптоволокна. В результаті цього виникає параметричне збурення, що пов'язане із зміною моменту інерції катушки, та збільшується лінійна швидкість руху оптоволокна при постійній кутовій швидкості ротора двигуна електроприводу. Ці параметричні збурення компенсуються алгоритмічно.

Для інформаційного забезпечення функціонування запропонованого регулятора потрібні: точний вимірювач лінійної швидкості оптоволокна та тензометричний сенсор для вимірювання тягового зусилля на оптоволокні.

Подальші дослідження запропонованого регулятора це сукупність досліджень, які виконуються після з'ясування принципової можливості реалізації базової ідеї, яка викладена у цій статті: поглиблене вивчення параметричної чутливості електроприводу та тормозної електромагнітної муфти; з'ясування запасів стійкості за амплітудою та фазою по всіх каналах; аналіз впливу неточності вимірів лінійної швидкості та тягового зусилля, а також впливу на точність регулювання суттєво нелінійних елементів. Передбачається виконати дослідження стосовно: сумісного використання запропонованого регулятора та модального або лінійного квадратичного регуляторів, які корегують динамічні властивості двигуна постійного струму із складу електроприводу; застосування оптимальних спостерігачів для оцінювання лінійної швидкості оптоволокна та тягового зусилля на ньому.

Список літератури:

1. Facts & Factors. At 23.9% CAGR, Global Fiber Bragg Grating Market Size to Hit USD 5167.4 Million by 2028 | Fiber Bragg Grating (FBG) Industry Trends, Growth, Share, Analysis & Forecast Report by Facts & Factors. *GlobeNewswireNewsRoom*. URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2022/08/03/2491523/0/en/At-23-9-CAGR-Global-Fiber-Bragg-Grating-Market-Size-to-Hit-USD-5167-4-Million-by-2028-Fiber-Bragg-Grating-FBG-Industry-Trends-Growth-Share-Analysis-Forecast-Report-by-Facts-Factors.html>

2. Distributed Fiber Optic Sensor Market | Industry Report, 2023. *Market Research Reports & Consulting | Grand View Research, Inc.* URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/distributed-fiber-optic-sensor-sensing-dfos-market/toc>
3. Research and Markets. Distributed & Single Point Fiber Optic Sensing Systems, World Market Forecast to 2023. *GlobeNewswire News Room.* URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2019/11/12/1945182/28124/en/Distributed-Single-Point-Fiber-OpticSensing-Systems-World-Market-Forecast-to-2023.html>
4. Fiber Optic Sensors for Harsh and High Radiation Environments in Aerospace Applications / A. Rovera та ін. *Sensors.* 2023. Т. 23, № 5. С. 2512. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23052512>
5. Arditty, H.J.; Lefèvre, H.C. Sagnac Effect in Fiber Gyroscopes. *Opt. Lett.* 1981, 6, 401–403.
6. Girard S., Morana A., Ladaci A., Robin T., Mescia L., Bonnefois J.-J., Boutillier M., Mekki J., Paveau A., Cadier B. et al. Recent Advances in Radiation-Hardened Fiber-Based Technologies for Space Applications. *J. Opt.* 2018, 20, 093001.
7. Nayak J. Fiber-Optic Gyroscopes: From Design to Production [Invited]. *Appl. Opt.* 2011, 50, E152–E161.
8. Harnefors L., Saarakkala S. E., Hinkkanen M. Speed Control of Electrical Drives Using Classical Control Methods. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2013. Vol. 49, no. 2. P. 889–898. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2013.2244194>
9. Sato K. Feedforward element design using learning controller for precision control of linear synchronous motor with nonlinear characteristics. *Precision Engineering.* 2021. Vol. 72. P. 870–877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.08.005>
10. Segmented ternary composite control method considering time delay for high-speed and high-precision linear motor / W. Wang et al. *Precision Engineering.* 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2024.04.001>
11. Sato K. Practical high-precision motion control system based on nominal characteristic trajectory following control and simple feedforward element design methods. *Precision Engineering.* 2022. Vol. 75. P. 55–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.11.017>
12. The Urgency of Using Adaptive Observers to Identify the Parameters of the DC Electric Drive / V. Stopkin et al. *Smart Technologies in Urban Engineering.* Cham, 2022. P. 213–224. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_20
13. Research of subdivision driving technology for brushless DC motors in optical fiber positioning / Y. Kan et al. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*, Edinburgh, United Kingdom / ed. by R. Navarro, J. H. Burge. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2232204>
14. Репнікова Н.Б. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність: підручн. Н.Б. Репнікова. К.: НТУУ «КПІ», 2011. 328 с.
15. 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>
16. Цифрові системи автоматичного керування для телекомунікацій. Комп'ютерний практикум: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інженерія та програмування інфо-комунікацій» спец. 172 Електронні комунікації та радіотехніка / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: О. І. Лисенко, О. М. Тачиніна, В. С. Явіся, В. І. Новіков, І. О. Сушин. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 204 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67807>
17. Control system design, 1 st Edishen by GOODWIN, GRAHAM C.; GRAEBE, STEFAN F.; SALGADO, MARIO E. Prentice Hall, 2001.
18. Lysenko, O., Tachinina, O., Ponomarenko, S., Guida, O., Kutieпов, V. Two-Channel Precision Regulator for Electric Drive of Optical Fiber Winding Mechanism of Avionics Sensory Elements. In: Lytvynov, O., Pavlikov, V., Krytskyi, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2024. ICTM 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, 2025. vol 1473. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-94845-9_25

Lysenko O.I., Tachynina O.M., Chumachenko S.M, Ponomarenko S.O, Furtat S.O., Furtat O.V.
PRECISION CONTROLLER FOR THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MANUFACTURING FIBER-OPTIC SENSING ELEMENTS OF AVIONICS

The article addresses the problem of improving the precision control of the electric drive of an optical fiber winding mechanism used in the manufacturing of sensing elements of avionics fiber-optic sensors (FOS). The relevance of the research is обусловлена rapid development of the aerospace industry and the growing demand for fiber-optic sensors widely applied in navigation systems of satellites, aircraft, and other high-precision equipment. One of the key technological operations in the production of such sensors is the winding of optical fiber onto a coil while maintaining specified values of the fiber linear velocity and tensile force.

Deviations of these parameters lead to deterioration of polarization stability and a decrease in the accuracy of the sensor system operation.

It is shown that conventional winding control systems based on a PID controller in the velocity control channel provide acceptable performance only in the absence of random disturbances. However, in real operating conditions the system is affected by stochastic and impulse disturbances caused by the non-uniform mechanical elasticity of the optical fiber along its length. To solve this problem, a structural and algorithmic improvement of the control system is proposed by introducing a second control channel for tensile force and implementing a dual-channel controller.

In the proposed structure, a PID controller is used in the linear velocity control channel to compensate smooth parametric disturbances associated with changes in the winding radius and system inertia. In the tensile force control channel, a generalized integro-differentiating (GID) controller is proposed, which provides enhanced disturbance compensation capabilities and improved robustness.

The effectiveness of the proposed approach is confirmed by mathematical modeling and computer simulation experiments. The studies were carried out under impulse disturbances of limited amplitude and stochastic disturbances in the form of real white noise. The results demonstrate that the improved system with the GID controller in the tensile force control channel reduces the amplitude of deviations caused by impulse disturbances by more than one order of magnitude and decreases the variance of deviations under stochastic disturbances by almost two orders of magnitude compared to the prototype system.

The obtained results confirm the fundamental feasibility of implementing precision control of the electric drive of the optical fiber winding mechanism and can be used to improve the accuracy and reliability of manufacturing sensing elements for avionics fiber-optic sensors.

Keywords: *precision control of electric drive, navigation optical fiber winding system, fiber-optic sensing elements, fiber-optic gyroscopes, navigation optical fiber.*

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 10.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026