

УДК 681.518:621.313:681.7.068
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.1/18>

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>
Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Чумаченко С.М.

<https://orcid.org/0000-0002-8894-4262>
Державний науково-дослідний інститут авіації
Міністерства оборони України

Кисельов В.Б.

<https://orcid.org/0000-0003-3437-2825>
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

Гуйда О.Г.

<https://orcid.org/0000-0002-2019-2615>
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

Омецинська Н.В.

<https://orcid.org/0000-0002-8938-7189>
Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського

КАСКАДНА SISO LTI СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВУЗЛА РУХОМОСТІ ВІЙСЬКОВОГО ГУМАНОЇДНОГО РОБОТА

У статті досліджується можливість застосування узагальненого інтегро-диференціюючого регулятора (УІД-регулятора) як ефективною альтернативою традиційному ПІД-регулятору в каскадних SISO LTI системах автоматичного керування мехатронними пристроями вузлів рухомості гуманоїдних роботів. Обґрунтовано доцільність використання саме каскадних (двоконтурних) систем, які забезпечують покращені показники якості керування, зокрема зменшення впливу зовнішніх і параметричних збурень, скорочення тривалості перехідних процесів та підвищення точності відтворення заданих рухів. Показано, що відмова від внутрішнього контуру призводить до погіршення динамічних характеристик системи, що є критичним для задач забезпечення плавності та безпечності рухів гуманоїдних роботів.

Розглянуто проблему складності параметричного налаштування великої кількості ПІД-регуляторів у багатоконтурних системах, характерних для сучасних робототехнічних комплексів, де кількість контурів може досягати тисяч. Встановлено, що класичні методи налаштування (Зіглера–Нікольса, Коена–Куна) потребують значних часових витрат, причому основна їх частина припадає на етап дооптимізації параметрів із використанням комп'ютерного моделювання.

Запропоновано використання УІД-регулятора, який реалізується у вигляді узагальненого інтегро-диференціюючого контуру або послідовного з'єднання ідеального інтегратора з компенсаторами упередження–затримки. Розроблено метод експрес-налаштування УІД-регулятора (МЕН УІДР), що дозволяє на основі відомої математичної моделі об'єкта керування отримати раціональні параметри регулятора вже на етапі первинного налаштування без необхідності подальшої оптимізації. Описано

основні етапи методу, включаючи формування розімкненого контуру, вибір структурних параметрів, визначення частоти зрізу та обчислення параметрів регулятора.

Наведено результати комп'ютерного моделювання, які демонструють, що застосування УІД-регулятора забезпечує покращення показників якості перехідних процесів, зокрема зменшення коливальності, відсутність перерегулювання та підвищення плавності рухів у порівнянні з ПІД-регуляторами. Доведено, що у ряді випадків достатньо використання лише одного УІД-регулятора у внутрішньому контурі для досягнення прийнятних характеристик системи. Запропонований підхід забезпечує суттєве скорочення часу налаштування, простоту реалізації та підвищення ефективності керування, що підтверджує перспективність використання УІД-регуляторів у системах керування гуманоїдними роботами з підвищеними вимогами до людиноподібності рухів.

Ключові слова: Система автоматичного керування, SISO LTI система, УІД-регулятор, ПІД-регулятор, інтегро-диференціюючий контур, компенсатор упередження-затримки, мехатронні системи, гуманоїдні роботи, вузли рухомості.

Постановка проблеми. Двокаскадні системи керування (рис.1) мають кращі показники якості керування порівняно із однокаскадними системами [8]. Тому їх потрібно використовувати там, де їх ще немає. Якщо відмовитися від двокаскадності керування в тих вузлах рухомості, де вона є, для того щоб зменшити кількість регуляторів, які підлягають налаштуванню, то будуть втрачені наступні позитивні властивості каскадного керування:

1. Зовнішні збурення, що діють на частину об'єкта керування, яка охоплена місцевим зворотнім зв'язком, будуть напряму впливати на вихідну координату, а не з зменшуватимуться у внутрішньому допоміжному контурі.
2. Параметричні збурення, які виникають у внутрішньому контурі будуть суттєво впливати на вихідний сигнал.
3. Значно збільшиться час перехідного процесу на виході системи, якщо буде відключено внутрішній зворотній зв'язок, завдяки якому відбувається корекція динамічних властивостей мехатронних пристроїв вузла рухомості.

В теперішній час у мехатронних пристроях вузлів рухомості гуманоїдних роботів використовуються (практично у 100 %) в якості регуляторів в обох каскадах ПІД – регулятори [8-12]. Як відомо, ПІД – регулятор формує свій вихідний

сигнал, як суму пропорційного, інтегрального та диференціального сигналів від помилки, що подається на його вхід. Для відображення математичної моделі алгоритму роботи ПІД – регулятора скористаємося так званою стандартною формою

$$W_{PIDj}(s) = k_{pj} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{ij} \cdot s} + \frac{T_{dj} \cdot s}{\tau_{dj} \cdot s + 1} \right),$$

де (згідно рекомендацій [8]) приймемо, що додаткова стала часу може бути обчислена із наступного співвідношення $\tau_{dj} = 0.15 \cdot T_{ij} (j=1,2)$.

Припустимо, що відома математична модель об'єктам керування $W_{Oj}(s) (j=1,2)$. В якості регулятора в обох каскадах планується використання ПІД – регулятора, тобто структура регулятора є відомою: $W_{Rj}(s) = W_{PIDj}(s) (j=1,2)$. За звичай, для такого налаштування параметрів обох ПІД – регуляторів, при якому в системі автоматичного керування реалізується плавність (людиноподібність) рухів використовується двоетапна процедура: на першому етапі виконують первинне налаштування методами Зіглера-Нікольса або Коена-Куна; на другому етапі методом комп'ютерного моделювання покращують результат первинного налаштування. Тривалість та результативність другого етапу суттєво залежить від первинного налаштування. Досвід налаштування ПІД – регулятора в цілому показує, що 90% часу (і при цьому не

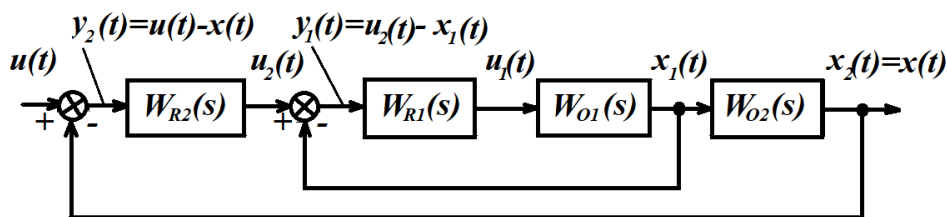


Рис. 1. Структурна схема каскадної (багатоконтурної) SISO LTI системи автоматичного керування мехатронними пристроями в вузлах рухомості гуманоїдних роботів: $W_{Rj}(s), W_{Oj}(s) (j=1,2)$ – скалярні неперервні передавальні функції, які відображають алгоритм роботи регулятора (індекс Rj) та математичну модель об'єкта керування (індекс Oj), що відносяться відповідно до першого каскаду (внутрішнього контуру, $j=1$) та другого каскаду (зовнішнього контуру, $j=2$) системи автоматичного керування

завжди із бажаним результатом) витрачається на другий етап налаштування [8-12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При побудові гуманоїдних роботів, що призначені для роботи поруч із людьми (домашні роботи, роботи медичні-сестри, обслуговуючі роботи в місцях обслуговування клієнтів) однією із головних вимог є реалізація принципу безпечної взаємодії гуманоїдних роботів і людей [1-6]. Цей принцип реалізується завдяки підходу, який можна назвати «плавність + чуттєвість» («П + Ч»): виконання роботами рухів, які нагадують (практично не відрізняються) рухи людини, тобто є плавними і чуттєвими у силовому відношенні [5-7].

Структура каскадних (багатоконтурних) SISO LTI систем автоматичного керування із властивостями квазіінваріантності (квазіадаптивності) до дії зовнішніх збурень найкращим чином забезпечує реалізацію підходу «П + Ч» [8-11] (див. рис.1).

Зазвичай, в кожному із каскадів використовують регулятори із параметричним налаштуванням із структурою різновидів ПД – регулятора (від пропорційного регулятора до повної структури із пропорційним, інтегральним та диференціальним сигналами) [12, 13].

Наявність інтегруючої ланки забезпечує властивість квазіінваріантності до зовнішніх збурень типу східчаста дія [8].

Враховуючи той факт, що у гуманоїдних роботів кількість вузлів рухомості перевищує сотні [6, 7, 9], а в каскадних системах автоматичного керування приводами у вузлах рухомості, як мінімум, використовується два каскади, то загальна кількість регуляторів, які потрібно налаштувати, може перевищувати тисячі. Зрозуміло, що постає актуальна інженерна проблема щодо швидкого налаштування (або переналаштування) регуляторів. Підкреслимо, що, якщо для параметричного налаштування використовуються комп'ютерні програми чисельного налаштування за алгоритмічно заданими критеріями, то актуальна задача швидкого налаштування регулятора перетворюється у актуальну задачу пошуку першого вдалого наближення, тобто пошуку початкових умов, з яких «стартують» комп'ютерні алгоритми налаштування [12, 14].

Постановка завдання. Постає науково-технічна задача: скоротити час, який витрачається на таке налаштування каскадної системи автоматичного керування мехатронними пристроями у вузлах рухомості, при якому забезпечується плавність рухів гуманоїдного робота, тобто відбувається досягнення практично людиноподібних рухів.

Інженерний досвід розв'язання задач налаштування структури та параметрів регуляторів вказує на два ефективні підходи: по-перше, забезпечити вдале перше наближення до прийнятних структури та параметрів регулятора (первинне налаштування); по-друге, після першого наближення виконувати доналаштування мінімальної кількості параметрів.

Виклад основного матеріалу.

Метод експрес-налаштування узагальненого інтегро – диференціуючого регулятора (МЕН УІД – регулятора)

Вихідними даними для розв'язання поставленої науково-технічної задачі є: структура каскадної SISO LTI системи автоматичного керування (САК) (рис. 1) та математична модель об'єкта керування $W_{oj}(s) (j=1,2)$.

В якості САК – прототипу, яку бажано покращити завдяки використанню УІД – регулятора, розглядається САК із ПД – регуляторами. ПД – регулятори підключені відповідно у внутрішній та зовнішній каскади (рис. 1).

Задача синтезу каскадної САК (рис.1) вважається розв'язаною, якщо синтезовано алгоритми роботи регуляторів у вигляді їх передавальних функцій $W_{rj}(s) (j=1,2)$.

Загальний підхід до синтезу передавальних функцій регуляторів $W_{rj}(s) (j=1,2)$ полягає в наступному. Спочатку відбувається синтез регулятора для внутрішнього каскаду (контур) із математичною моделлю алгоритму його роботи, який задається передавальною функцією $W_{r1}(s)$, де в якості математичної моделі об'єкта керування розглядається $W_{o1}(s)$ (рис.1). Після цього виконується синтез регулятора зовнішнього каскаду (контур), тобто знаходиться передавальна функція $W_{r2}(s)$. В якості математичної моделі об'єкта керування розглядається послідовне з'єднання передавальних функцій внутрішнього каскаду (контур) та $W_{o2}(s)$.

Для розв'язання поставленої вище науково-технічної задачі пропонується замінити ПД – регулятори в каскадній системі – прототипі узагальненими інтегро-диференціуючими регуляторами (УІД – регуляторами), для первинного налаштування яких використати спеціальний метод первинного експрес-налаштування із підвищеною якістю налаштування.

Зміст основного матеріалу: структура та параметри УІД – регулятора; метод експрес-налаштування УІД – регулятора; приклад первинного налаштування ПД та УІД – регуляторів для каскадної САК та порівняльне моделювання перехід-

них процесів у каскадній САК із синтезованими регуляторами.

Структура та параметри УІД – регулятора.

В якості альтернативи алгоритму ПІД – регулятора пропонується застосувати алгоритм, який задається передавальною функцією УІД – регулятора:

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

параметричний синтез якого (пошук параметрів $k_{UID} > 0; v, m_{1,2,3,4} \in \{0; 1; 2; \dots\}; T_{1,2,3,4} > 0$) пропонується виконати методом експрес-налаштування УІД – регулятора (МЕН УІД – регулятора). Ще раз підкреслимо, що МЕН УІД – регулятора розглядається як метод первинного параметричного налаштування регулятора.

Нагадаємо, що згідно термінології, яка використовується у національній або англійській науковій літературі, УІД – регулятор ще називають відповідно узагальненим інтегро-диференціюючим контуром або з'єднанням ідеального інтегратора із узагальненими компенсаторами упередження – затримки.

Етапи МЕН УІД – регулятора:

Етап 1. Побудувати математичну модель розімкненого контуру.

Розглянути розімкнений контур у вигляді послідовного з'єднання математичних моделей УІД – регулятора і об'єкта керування та обчислити передавальну функцію розімкненого контуру:

$$\begin{aligned} W_d(s) &= W_{UID}(s) \cdot W_o(s) = \\ &= k_{UID} \cdot \frac{(T_1s + 1)^{m_1} \cdot (T_3s + 1)^{m_3}}{(T_2s + 1)^{m_2} \cdot (T_4s + 1)^{m_4}} \cdot \frac{1}{s^v} W_o(s) = \\ &= W_{UID}^*(s) \cdot W_o^*(s), \end{aligned}$$

де $W_{UID}^*(s) = k_{UID} \cdot \frac{(T_1s + 1)^{m_1} \cdot (T_3s + 1)^{m_3}}{(T_2s + 1)^{m_2} \cdot (T_4s + 1)^{m_4}};$

$$W_o^*(s) = \frac{1}{s^v} W_o(s);$$

$W_o(s) = \frac{1}{s^l} \cdot \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$ – передавальна функція об'єкта керування. Нагадаємо, що вважаються відомими: l – кількість ідеальних інтеграторів у складі математичної моделі ОК; m та n – порядки поліномів чисельника і знаменника $W_o(s)$ та коефіцієнти цих поліномів при відповідних степенях s .

Етап 2. Задати структурні параметри передавальної функції $W_{UID}(s)$ УІД – регулятора v та $m_{1,2,3,4}$.

За звичай v та $m_{1,2,3,4} \in \{0; 1; 2\}$.

Обираємо v (v – кількість ідеальних інтеграторів у складі регулятора)

на виконання вимоги щодо забезпечення заданого порядку астатизму замкненого контуру (рис. 1) із врахуванням кількості ідеальних інтеграторів у складі об'єкта керування.

Обираємо $m_{1,2,3,4}$ із врахуванням властивостей компенсаторів упередження-затримки (КУЗ)

$$W_{12}(s) = \frac{T_1s + 1}{T_2s + 1} \text{ та } W_{34}(s) = \frac{T_3s + 1}{T_4s + 1}.$$

Аналіз амплітудних та фазових частотних характеристик компенсаторів упередження-затримки дозволяє зробити наступні висновки:

1. КУЗ із властивостями ланки упередження дозволяє збільшити запас за фазою.
2. КУЗ із властивостями ланки затримки дозволяє зменшити вплив високочастотних збурень.
3. Послідовне включення ланок упередження та затримки із піднесенням біномів до відповідного степеню $m_{1,2,3,4}$ дозволяє отримати та підсилити обидва позитивні ефекти.

Етап 3. Обчислити частоту зрізу ω_z для передавальної функції $W_o^*(s)$, тобто частоту, на якій $|W_o^*(j \cdot \omega_z)| = 1$.

Для побудови передавальної функції

$$W_o^*(s) = \frac{1}{s^{v+l}} \cdot \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

та обчислення частоти зрізу можна скористатися відповідними функціями системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink.

Етап 4. Обчислення параметрів УІД – регулятора.

За відомою частотою зрізу ω_z обчислити параметри передавальної функції УІД – регулятора:

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

Записані співвідношення дозволяють отримати вдале перше наближення до прийнятних значень параметрів УІД – регулятора при будь-яких значеннях його структурних параметрів v та $m_{1,2,3,4}$. Ці співвідношення отримані в результаті емпіричного узагальнення досвіду синтезу УІД – регуляторів.

Етап 5. Підбір структурних параметрів $m_{1,2,3,4}$ та коефіцієнта підсилення регулятора k_{UID} .

Перший крок: задати $m_{1,2,3,4} = 1$.

Побудувати комп'ютерну математичну модель та виконати імітаційний експеримент для підбору k_{UID} . Рекомендується: розпочати із значення

$k_{UID} \in [0.1 \cdot k_{PKZ-N}; 0.5 \cdot k_{PKZ-N}]$, де k_{PKZ-N} – коефіцієнт підсилення, який обчислено за методом коли-

вань Зіглера – Нікольса [8], і підібрати таке значення k_{UD} , при якому час тривалості перехідного процесу, коливальність та перерегулювання матимуть прийнятні для конкретної задачі значення.

Якщо вдалося підібрати k_{UD} , при якому вище означені параметри перехідного процесу задовольняють вимогам конкретної задачі, то вважаємо, що етап 5 завершено.

Якщо не вдалося задовольнити вимогам конкретної задачі, то змінюємо один із структурних параметрів $m_{1,2,3,4}$ і повторюємо підбір k_{UD} .

При первинному налаштуванні **етап 5** виконується в інтерактивному режимі «в ручну». Досвід показує, що достатньо не більше декількох «запусків» комп'ютерної математичної моделі для отримання прийнятної для практичного використання результату, тобто, до припинення налаштування в цілому. Підкреслимо, що «людноподібність» рухів оцінюють експерти, хоча формально плавність рухів можна задавати із використанням відомих стандартних форм [12].

Приклад первинного налаштування ПІД та УІД – регуляторів для каскадної САК та порівняльне моделювання перехідних процесів у каскадній САК із синтезованими регуляторами.

Розглянемо приклад первинного налаштування ПІД – та УІД – регуляторів для каскадної САК (рис. 1) та виконаємо порівняльне моделювання перехідних процесів у каскадній САК із синтезованими регуляторами.

Почнемо із первинного налаштування ПІД – регуляторів для каскадної САК (рис. 1).

Для первинного налаштування параметрів ПІД – регулятора (тобто, визначення коефіцієнта підсилення k_p , сталої інтегрування T_i та сталої диференціювання T_d) будемо використовувати добре відомі методи [8] : коливаний Зіглера – Нікольса (KZ-N); Зіглера – Нікольса при використанні перехідного процесу (Z-NPP); Коена – Куна при використанні перехідного процесу (K-KPP). Для демонстрації того, яким саме методом було визначено параметри ПІД – регулятора будемо використовувати для кожного із методів відповідні індекси: $k_{pKZ-N}, T_{iKZ-N}, T_{dKZ-N}$; $k_{pZ-NPP}, T_{iZ-NPP}, T_{dZ-NPP}$; $k_{pK-KPP}, T_{iK-KPP}, T_{dK-KPP}$.

Наведені вище методи вимагають проведення комп'ютерного або натурального експериментів [8-12]. За результатами експерименту визначаються допоміжні параметри, які будемо позначати $K_0, P_0; x_0(t_0), x_{0\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} x_0(t), t_0, t_1, t_2$. Фізичний та математичний зміст цих параметрів ілюструється за допомогою рис. 2 та 3.

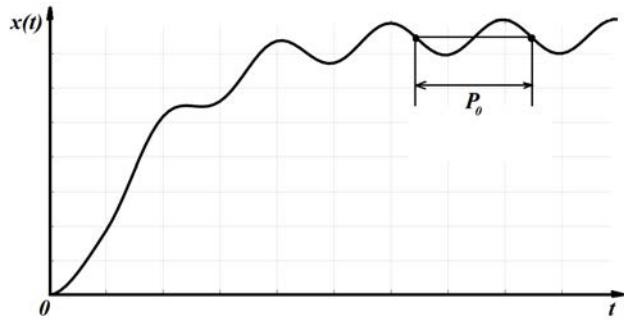


Рис. 2. Перехідний процес зі сталими коливаннями із періодом P_0 на виході замкненої системи, яка складається із пропорційного регулятора із коефіцієнтом підсилення K_0 та об'єкта керування: значення K_0, P_0 використовуються для обчислення параметрів (первинного налаштування) ПІД – регулятора методом коливаний Зіглера – Нікольса

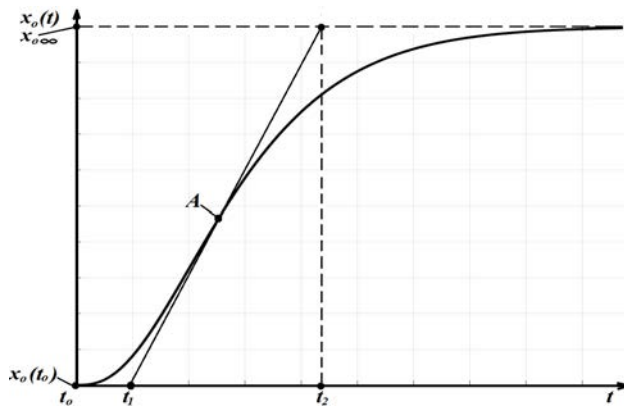


Рис. 3. Перехідний процес на виході об'єкта керування: значення $x_0(t_0), x_{0\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} x_0(t), t_0, t_1, t_2$ використовуються для обчислення параметрів (первинного налаштування) ПІД – регулятора методами Зіглера – Нікольса та Коена – Куна при використанні перехідного процесу (в точці А (точка перегину перехідного процесу) проведена дотична)

За відомими K_0, P_0 та $x_0(t_0), x_{0\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} x_0(t), t_0, t_1, t_2$ виконується обчислення параметрів ПІД – регулятора із використанням вище означених методів [8]:

$$k_{pKZ-N} = 0.6 \cdot K_0, T_{iKZ-N} = 0.5 \cdot P_0, T_{dKZ-N} = \frac{P_0}{8};$$

$$k_{pZ-NPP} = 1.2 \cdot \frac{D_2}{D_0 \cdot D_1}, T_{iZ-NPP} = 2 \cdot D_1, T_{dZ-NPP} = 0.5 \cdot D_1;$$

$$k_{pK-KPP} = \frac{D_2}{D_0 \cdot D_1} \cdot \left(0.9 + \frac{D_1}{12 \cdot D_2} \right),$$

$$T_{iK-KPP} = D_1 \cdot \frac{30 \cdot D_2 + 3 \cdot D_1}{9 \cdot D_2 + 20 \cdot D_1},$$

$$T_{dK-KPP} = \frac{4 \cdot D_1 \cdot D_2}{11 \cdot D_2 + 0.2 \cdot D_1},$$

де $D_0 = x_{0\infty} - x_0(t_0), D_1 = t_1 - t_0, D_2 = t_2 - t_1$.

Вважаємо, що математична модель мехатронного пристрою у кожному з вузлів рухомості задається неперервними передавальними функціями $W_{o1}(s)$ та $W_{o2}(s)$ (рис.1). Передавальна функція

$W_{o1}(s)$ може бути обчислена, як передавальна функція послідовно з'єднаних ланок спрямованої дії. Цими ланками є силовий перетворювач із передавальною функцією $W_f(s)$ та двигун постійного струму (ДПС) із передавальною функцією $W_{DPS}(s)$, де вихідним сигналом вважається кутова швидкість ротора, тобто:

$W_{o1}(s) = W_f(s) \cdot W_{DPS}(s)$. Перший каскад (контур) складається із регулятора із передавальною функцією $W_{R1}(s)$ та об'єкта керування із передавальною функцією $W_{o1}(s)$ (рис.1). Другий каскад складається із регулятора із передавальною функцією $W_{R2}(s)$ та об'єкта керування із передавальною функцією, що дорівнює добутку передавальної функції першого каскаду (контуру), $H_1(s) = \frac{W_{R1}(s) \cdot W_{o1}(s)}{1 + W_{R1}(s) \cdot W_{o1}(s)}$ на передавальну функцію $W_{o2}(s) = \frac{1}{s}$, де вихідним сигналом є кут повороту ротора ДПС.

При виконанні комп'ютерних експериментів були використані типові передавальні функції мехатронних пристроїв вузлів рухомості гуманоїдних роботів [8-12]:

$$W_f(s) = \frac{10}{0.0003 \cdot s^2 + 0.04 \cdot s + 1};$$

$$W_{DPS}(s) = \frac{1}{0.4 \cdot s^2 + 1.3 \cdot s + 1}.$$

Виконаємо первинне налаштування ПІД – регулятора першого каскаду вказаними вище методами. При первинному налаштуванні ПІД – регулятора першого каскаду (внутрішнього контуру) було отримано такі допоміжні значення параметрів:

$$K_0 = 3.5, P_0 = 0.72c;$$

$$x_0(t_0) = 0, x_{0\infty} = 10, t_0 = 0c, t_1 = 0.25c, t_2 = 2c.$$

Результат обчислення параметрів ПІД – регулятора першого каскаду (внутрішнього контуру):

$$k_{pKZ-N1} = 2.100, T_{iKZ-N1} = 0.3600c, T_{dKZ-N1} = 0.0900c;$$

$$k_{pZ-NPP1} = 0.8400, T_{iZ-NPP1} = 0.500c, T_{dZ-NPP1} = 0.1250c;$$

$$k_{pK-KPP1} = 0.6383, T_{iK-KPP1} = 0.6416c, T_{dK-KPP1} = 0.0907c.$$

Виконаємо первинне налаштування УІД – регулятора першого каскаду із використанням МЕН УІД – регулятора. Припустимо, що ν та $m_{1,2,3,4}$ дорівнюють одиниці. Виконаємо обчислення частоти зрізу та параметрів УІД – регулятора першого каскаду (внутрішнього контуру). Скористаємося положеннями МЕН УІД – регулятора і в результаті отримаємо: $\omega_{z1} = 2.61 \frac{rad}{c}$,

$$T_{11} = 1.2644c, T_{31} = 0.1161c, T_{21} = 0.0116c,$$

$$T_{41} = 0.0012c. \text{ Приймаємо, що } k_{UID1} = 0.1 \cdot k_{pKZ-N1} = 0.21.$$

Перед тим, як перейти до налаштування пара-

метрів регулятора другого каскаду (рис. 1), розглянемо перехідні процеси на виході двокаскадної САК при умові, що $W_{R2}(s) = 1$. З'ясуємо питання щодо необхідності ускладнювати загальну процедуру налаштування двокаскадної САК налаштуванням регулятора для другого каскаду. Виконаємо візуальний аналіз перехідних процесів (див. рис. 4) на виході двокаскадної САК (рис. 1). Цей аналіз показує: при використанні УІД – регулятора, первинне налаштування якого виконано за допомогою запропонованого методу, плавність рухів у вузлі рухомості гуманоїдного робота буде кращою ніж при використанні ПІД – регулятора. Таким чином, якщо немає потреби зменшувати перегулювання та тривалість перехідного процесу, то можна вважати, що каскадна САК може бути побудована із підключенням лише одного УІД – регулятора у внутрішній каскад САК (зовнішній каскад вважаємо таким, що до нього підключено пропорційний регулятор із коефіцієнтом підсилення, що дорівнює одиниці). Особливо підкреслимо, що доналаштовувати УІД – регулятор непотрібно: достатньо лише первинного налаштування.

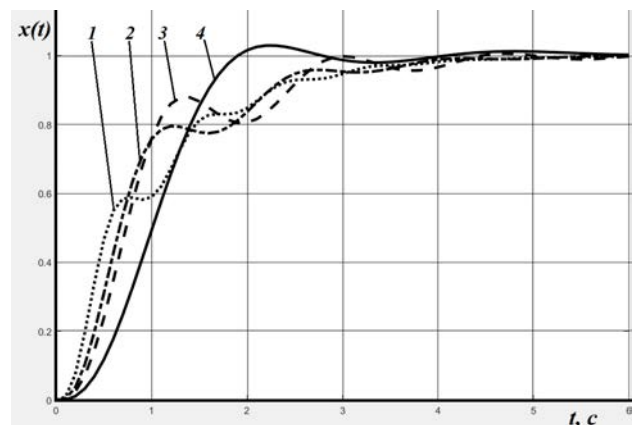


Рис. 4. Перехідні процеси на виході двокаскадної САК (рис. 1) при умові, що $W_{R2}(s) = 1$ та різних $W_{R1}(s)$: 1, 2, 3 – передавальна функція $W_{R1}(s)$ дорівнює передавальній функції ПІД – регулятора, параметри якого налаштовані методами відповідно коливаний Зіглера – Нікольса, Зіглера – Нікольса при використанні перехідного процесу, Коена – Куна при використанні перехідного процесу; 4 – передавальна функція $W_{R1}(s)$ дорівнює передавальній функції УІД – регулятора

Припустимо, що все ж таки існує необхідність зменшити час тривалості перехідного процесу при збереженні плавності рухів у вузлі рухомості. Тоді виконаємо первинне налаштування ПІД – та УІД – регуляторів для другого каскаду (контуру). Оскільки $W_{o2}(s) = \frac{1}{s}$, то для налаштування ПІД – регулятора можливо застосувати лише метод коливаний Зіглера – Нікольса.

При первинному налаштуванні ПІД – регулятора другого каскаду (зовнішнього контуру) було отримано такі допоміжні значення параметрів

$K_0 = 3.5, P_0 = 0.72c$. За цими значеннями було розраховано параметри ПІД – регулятора другого каскаду:

$$k_{PKZ-N2} = 1.800, T_{IKZ-N2} = 0.3300c, T_{dKZ-N2} = 0.0825c.$$

Перейдемо до налаштування УІД – регулятора. Припустимо, що ν та $m_{1,2,3,4}$ дорівнюють одиниці. При первинному налаштуванні УІД – регулятора другого каскаду (зовнішнього контуру) було отримано таку величину частоти зрізу

$\omega_{z2} = 0.99 \frac{rad}{c}$ та обчислено значення параметрів УІД – регулятора:

$$T_{12} = 3.3333c, T_{32} = 0.3061c, T_{22} = 0.0306c,$$

$$T_{42} = 0.0031c. \text{ Приймаємо, що } k_{UID2} = 0.2 \cdot k_{PKZ-N2} = 0.36.$$

Як бачимо (див. рис. 5), застосування у другому каскаді УІД – регулятора із первинним налаштуванням параметрів дозволяє отримати плавніші рухи у вузлі рухомості гіманоїдного робота порівняно із застосуванням первинно налаштованого ПІД – регулятора. Зауважимо, що і перегулювання буде майже відсутнє.

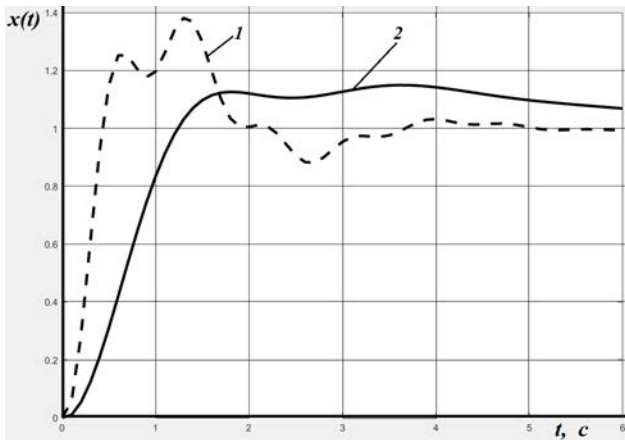


Рис. 5. Перехідні процеси на виході двокаскадної САК (рис. 1) при умові, що: 1 – передавальні функції $W_{R1}(s)$ та $W_{R2}(s)$ дорівнюють передавальним функціям ПІД – регуляторів, параметри яких налаштовані за методом коливань Зіглера – Нікольса; 2 – передавальні функції $W_{R1}(s)$ та $W_{R2}(s)$ дорівнюють передавальним функціям УІД – регуляторів при умові, що структурні параметри УІД – регуляторів ν та $m_{1,2,3,4}$ дорівнюють одиниці

Для покращення результату застосування УІД – регуляторів змінимо структурні параметри УІД – регуляторів в обох каскадах (контурах) (рис.1). Припустимо, що в обох каскадах $\nu = 1$ та $m_{1,2} = 1, m_{3,4} = 2$ при умові, що значення параметрів $T_{1j}, T_{3j}, T_{2j}, T_{4j}$ ($j = 1, 2$) та k_{UID1} залишилися незмін-

ними. Приймаємо, що $k_{UID2} = 0.5 \cdot k_{PKZ-N2}$. Час тривалості перехідного процесу вдалося зменшити майже у двічі при збереженні плавності руху та відсутності перегулювання (див. рис. 6).

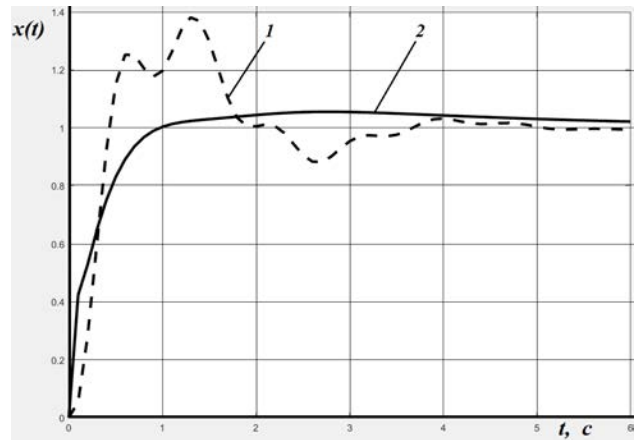


Рис. 6. Перехідні процеси на виході двокаскадної САК (рис. 1) при умові, що: 1 – передавальні функції $W_{R1}(s)$ та $W_{R2}(s)$ дорівнюють передавальним функціям ПІД – регуляторів, параметри яких налаштовані за методом коливань Зіглера – Нікольса; 2 – передавальні функції $W_{R1}(s)$ та $W_{R2}(s)$ дорівнюють передавальним функціям УІД – регуляторів при умові, що структурні параметри УІД – регуляторів ν та $m_{1,2,3,4}$ дорівнюють одиниці, а $m_{3,4} = 2$

Висновки

1. В якості альтернативи ПІД – регулятору для використання у каскадних SISO LTI системах автоматичного керування вузлами рухомості гуманоїдних роботів пропонується застосувати , регулятор, який задається узагальненим інтегродиференціуючим контуром або з’єднанням ідеального інтегратора із узагальненими компенсаторами упередження – затримки. Цей регулятор отримав назву узагальнений інтегродиференціуючий регулятор (УІД – регулятор).

2. Головна позитивна властивість УІД – регулятора порівняно із ПІД – регулятором полягає в тому, що при наявності SISO LTI математичної моделі об’єкта керування первинне параметричне налаштування УІД – регулятора дає практично прийнятний раціональний результат керування, який не потребує додаткового налаштування. Тому метод параметричного налаштування УІД – регулятора отримав назву метод експрес-налаштування узагальненого інтегродиференціуючого регулятора (МЕН УІД – регулятора).

3. МЕН УІД – регулятора забезпечує якість, простоту, зручність та економію часу при параметричному налаштуванні регулятора, що обґрун-

товує доцільність використання УІД – регулятора для керування мехатронними пристроями вузлів рухомості роботів в загалі і зокрема гуманоїдних роботів із підвищеними вимогами до людиноподібності рухів.

4. Наведений у статті комп'ютерний експеримент проілюстрував та підтвердив позитивні

властивості УІД – регулятора, які надають йому перевагу порівняно із ПІД – регулятором.

5. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку методу структурно-параметричного синтезу УІД – регулятора та його застосуванню в системах автоматичного керування із суттєвими нелінійностями.

Список літератури:

1 Viraktamath D. S. V. Humanoid Robot: A Review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2021. Vol. 9, no. 8. P. 2884–2894. URL: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.37890>

2 An Investigation on Humanoid Robots with Biped Locomotion and Walking / A. Pon Bharathi et al. *Design, Modelling and Fabrication of Advanced Robots*. 2022. Vol. 1, no. 1. P. 55–61. URL: <https://doi.org/10.46632/dmfar/1/1/9>

3 SUGIUCHI H., YONESHIMA J., KOHAMA S. Development of control system for small humanoid robot. *The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec)*. 2017. Vol. 2017. P. 2A1–C09. URL: <https://doi.org/10.1299/jsmermd.2017.2a1-c09>

4 Cabás Ormaechea L. M. Humanoid Robots. *Advanced Mechanics in Robotic Systems*. London, 2011. P. 1–18. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-85729-588-0_1

5 Biomechanics-Inspired Control Strategies for Humanoid Robots / S. Aswini et al. *2023 10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Gautam Buddha Nagar, India, 1–3 December 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/upcon59197.2023.10434421>

6 Mogos E. The fuzzy-based systems in the communication between a human and a humanoid robot. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2251, no. 1. P. 012003. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2251/1/012003>

7 Sulakshana Nishikant Bhatlawande, Prachi Prashant Kulkarni. Humanoid Robot. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. 2023. P. 32

8 Control system design, 1 st Edishen by GOODWIN, GRAHAM C.; GRAEBE, STEFAN F.; SALGADO, MARIO E. Prentice Hall, 2001.

9 Ірлик Ю. А., Стопакевич А. О. Аналіз перспектив застосування технологій штучного інтелекту для побудови автономних промислових систем автоматичного керування. *Automation of technological and business processes*. 2024. Т. 15, № 4. С. 8–13. URL: <https://doi.org/10.15673/atbp.v15i4.2578>

10 Development of a humanoid robot control system based on AR-BCI and SLAM navigation / Y. Wang et al. *Cognitive Neurodynamics*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s11571-024-10122-z>

11 Cetin O. Present Applications of Humanoid Robots and Fuzzy Control. *Toward Humanoid Robots: The Role of Fuzzy Sets*. Cham, 2021. P. 237–251. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67163-1_9

12 Методика синтезу регуляторів для цифрової системи автоматичного керування антропоморфним роботом / О. І. Лисенко та ін. *Problems of Informatization and Management*. 2021. Т. 4, № 68. С. 44–51. URL: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.68.16526>

13 Морнева М. О., Голубева С. М., Торопов А. С. Цифрові системи автоматичного керування в мехатронних системах. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2021. № 5 (269). С. 20–23. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-269-5-20-23>

14 Compliant Motion Control of Wheel-Legged Humanoid Robot on Rough Terrains / L. Zhao et al. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2023. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1109/tmech.2023.3320762>

Lysenko O.I., Tachynina O.M., Chumachenko S.M., Kyselov V.B., Guida O.H., Ometsynska N.V. CASCADE SISO LTI AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE ELECTRIC DRIVE OF A MOBILITY UNIT OF A MILITARY HUMANOID ROBOT

The paper investigates the possibility of applying a generalized integro-differentiating controller (GID controller) as an effective alternative to the conventional PID controller in cascade SISO LTI automatic control systems for mechatronic devices of mobility units in humanoid robots. The expediency of using cascade (two-loop) systems is substantiated, as they provide improved control performance, in particular reducing the influence of external and parametric disturbances, shortening transient response time, and increasing the accuracy of reproducing prescribed motions. It is shown that eliminating the inner loop leads to deterioration of the system's dynamic characteristics, which is critical for ensuring smoothness and safety of humanoid robot motions.

The problem of complexity in parametric tuning of a large number of PID controllers in multiloop systems typical for modern robotic complexes, where the number of loops may reach thousands, is considered. It is established that classical tuning methods (Ziegler–Nichols, Cohen–Coon) require significant time zampam, with the major portion spent on parameter refinement using computer simulation.

The use of the GID controller is proposed, implemented as a generalized integro-differentiating loop or a series connection of an ideal integrator with lead–lag compensators. A method for rapid tuning of the GID controller (rapid tuning method, RTM GID) is developed, which allows obtaining rational controller parameters at the initial tuning stage based on a known mathematical model of the plant, without the need for further optimization. The main stages of the method are described, including open-loop formation, selection of structural parameters, determination of the cutoff frequency, and calculation of controller parameters.

The results of computer simulation are presented, demonstrating that the application of the GID controller improves transient performance indicators, in particular by reducing oscillations, eliminating overshoot, and increasing motion smoothness compared to PID controllers. It is shown that in some cases the use of only one GID controller in the inner loop is sufficient to achieve acceptable system characteristics. The proposed approach provides a significant reduction in tuning time, ease of implementation, and improved control efficiency, confirming the перспективність of using GID controllers in humanoid robot control systems with enhanced requirements for human-like motion.

Keywords: *automatic control system, SISO LTI system, GID controller, PID controller, integro-differentiating loop, lead–lag compensator, mechatronic systems, humanoid robots, mobility units.*

Дата першого надходження статті до видання: 18.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026