

Б. Л. Кончак<sup>1</sup>, А. П. Кушнір<sup>2</sup>, І. П. Кравець<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка»

<sup>2</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

## СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ДРОБОВОГО ПОРЯДКУ ДЛЯ СИСТЕМИ ПІДПОРЯДКОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОВОРОТОМ ЛЮЛЬКИ ПОЖЕЖНОГО АВТОПІДІЙМАЧА

Намагання отримати кращі динамічні та статичні характеристики кута повороту люльки призводить до ускладнення завдань, що виконуються системою автоматичного керування (САК) приводом повороту люльки. САК приводом повороту люльки повинна забезпечувати такі вимоги: високу швидкодію, плавність розгону і гальмування двигуна, статичну і динамічну точності відтворення заданих траєкторій, відсутність перерегулювання в перехідних режимах, необхідний запас стійкості, низьку чутливість до координатних і параметричних збурень тощо. Для забезпечення цих вимог проаналізовано ряд принципово відмінних САК і методів їх синтезу. В результаті аналізу вибрано систему підпорядкованого регулювання (СПР) поворотом люльки з урахуванням пружних властивостей стріли, яка синтезована методом узагальненого характеристичного полінома. Дослідження показали, що ця система дає змогу забезпечити аперіодичний перехідний процес кута повороту люльки з заданою швидкодією і низьку чутливість в усталеному режимі до дії збурень. Однак отримані в процесі синтезу СПР передавальні функції регуляторів кутової швидкості двигуна і люльки мають високий порядок та вийшли досить складними з точки зору практичної реалізації.

В статті пропонується замінити ці регулятори шляхом апроксимації їх еволюційними методами більш компактними П<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регуляторами або регуляторами дробового порядку.

На основі проведених у роботі досліджень показано, що регулятори дробового порядку мають переваги перед класичними, зокрема у випадку їх застосування для оптимізації електромеханічних систем з такими особливостями їх об'єктів керування: двомасовістю, у тому числі і з наявністю удару; люфтом; в'язкістю тертя валопривода; нелінійним навантаженням тощо.

Заміну регуляторів високого порядку кутової швидкості двигуна та люльки більш компактними П<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регуляторами або регуляторами дробового порядку здійснено за використання оптимізаційного пакета Optimization Toolbox в пакеті MATLAB. Це програмне забезпечення розроблено для апроксимації класичних ланок з передавальними функціями високого порядку ланками дробового порядку методом генетичного алгоритму або рою частинок за їх перехідними функціями.

Проведені дослідження на цифрових моделях підтверджують ефективність заміни регуляторів високого порядку кутової швидкості двигуна і люльки на П<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятори або регулятори дробового порядку, передавальні функції яких визначені шляхом апроксимації перехідних функцій регуляторів методом генетичного алгоритму.

**Ключові слова:** пожежний автопідіймач, механізм повороту, регулятор дробового порядку, метод генетичного алгоритму, комп'ютерна модель.

**Постановка проблеми.** Для проведення рятувальних робіт та гасіння осередків пожеж на значних висотах використовують різного роду спеціальні пожежні автодрабини як з люлькою, так і без, та автопідіймачі. Робота рятувальників з використанням такої техніки є небезпечною як для них, так і для потерпілих. Тому до підйомальної техніки висувають ряд жорстких вимог [1].

Конструктивно система переміщення люльки складається з таких основних механізмів: повороту платформи, підймання та розкладання

колін (стріли) для колінчастих автопідіймачів та механізмів підймання, розкладання і висування стріли для телескопічних автопідіймачів. Усі вони мають свою систему керування і в сучасних автопідіймачах об'єднані загальною системою керування, яка має вищий ієрархічний рівень. Від роботи усіх цих систем керування залежить якість переміщення люльки.

Оскільки стріла підйомального механізму не є абсолютно жорсткою, виникають пружні коливання. Демпфування цих коливань лише

механічними пристроями є малоефективним. Тому, поряд з механічними пристроями, перспективним способом щодо демпфування коливань, а отже переміщення та стабілізації люльки в заданих координатах за умови відпрацювання завдання, є використання системи автоматичного керування (САК) [2-4], що робить роботу рятувальників більш безпечною та ефективною.

САК поворотом люльки повинна працювати в режимі позиціонування та стабілізації. Під час повороту люльки можливі параметричні та координатні збурення. До параметричних збурень відносять: зміну мас моментів інерції внаслідок зміни положення люльки; зміну параметрів електрообладнання внаслідок зміни кліматичних умов навколишнього середовища та фізичного "старіння". Через пружні деформації стріли, недосконалість виготовлення механічних елементів та їх з'єднань, великі маси рухомих частин, неефективну роботу самої системи керування, реактивну дію вогнегасних речовин, вітрове навантаження при переміщенні люльки виникають пружні коливання як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах – так звані "координатні збурення".

Усі ці фактори негативно впливають на роботу системи, а отже ускладнюють роботу рятувальників. Тому САК поворотом люльки автопідіймача має бути мінімально чутливою до усіх цих збурень. САК повинна бути налаштована таким чином, щоб в ідеальному випадку забезпечити аперіодичний характер перехідного процесу координати швидкості і кута. В роботі [5] для забезпечення високих статичних і динамічних показників переміщення люльки було обґрунтовано необхідність заміни механічної редукторної системи повороту платформи електромеханічною безредукторною, побудованою на базі моментного вентильного двигуна.

Намагання отримати кращі показники переміщення призводить до ускладнення завдань, що виконуються системою керування приводом повороту люльки. САК електричним приводом повороту люльки повинна забезпечувати такі вимоги: високу швидкість, плавність розгону і гальмування двигуна, статичну і динамічну точність відтворення заданих траєкторій, відсутність перерегулювання в перехідних режимах, необхідний запас стійкості, низьку чутливість до координатних і параметричних збурень, високу надійність [3].

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Основною координатою керування привода повороту платформи є кут повороту люльки. Однак, до складу САК поворотом люльки входять також внутрішній контур керування швидкістю вихідного вала виконавчого двигуна та внутрішній контур керування швидкістю повороту люль-

ки. Від їх налаштувань суттєвим чином залежать кількісно-якісні показники координати кута повороту люльки.

Для забезпечення необхідних показників координати кута повороту люльки проаналізовано ряд принципово відмінних САК і методів їх синтезу. Необхідність забезпечення плавності руху може бути отримана за модального керування [6]. При синтезі системи модального регулювання (СМР) важливим аспектом вирішення задачі є вибір бажаних стандартних характеристичних поліномів. Проте, незважаючи на суттєві переваги такої системи, вона є складною під час налагодження та не дає можливості регулювати і обмежувати проміжні координати, а лише вихідну.

Таких недоліків можна позбутися при побудові САК за принципом підпорядкованого регулювання [6]. Традиційно система підпорядкованого регулювання (СПР) координат електроприводу синтезується виходячи з двох стандартних форм розподілу коренів характеристичного рівняння, а саме: згідно з модульним (технічним) оптимумом і згідно з симетричним оптимумом. Однак виникають проблеми забезпечення статичної та динамічної точності, а також чутливості щодо параметричних збурень. Крім того, на формування динамічних характеристик САК впливають полюси і нулі в їх передавальних функціях. Як показано в роботі [4], передавальна функція САК поворотом люльки має, окрім нулів, полюси.

Як і СПР синтезована на симетричній або модульній оптимум, так і СМР не дає змоги враховувати нулі передавальної функції. На практиці широко використовується спосіб усунення нулів передавальної функції електромеханічної системи за допомогою відповідних фільтрів, що під'єднуються до входу системи [6, 7]. Зрозуміло, що при цьому можна отримати весь спектр стандартних форм перехідних функцій, якщо б не виникала проблема, пов'язана із зниженням швидкодії та запасу стійкості за амплітудою системи. Так, в СПР, налаштованій на симетричний оптимум, введення на вхід системи фільтра першого порядку приводить до зниження запасу стійкості за амплітудою. Наявність фільтра другого і вищих порядків часто робить проблематичним використання синтезованих систем.

Високих показників САК можна досягнути за комбінованого принципу керування [7]. Однак, недоліком такого підходу є те, що використовується декілька методів синтезу при розгляді однієї позиційної СПР та порушена уніфікація синтезу і налаштування контурів синтезованої СПР.

Альтернативним варіантом побудови САК поворотом люльки є СПР, синтезована методом узагальненого характеристичного полінома [6]. У роботі [4] на цифровій моделі проведено дос-

лідження синтезованої триконтурної СПР поворотом люльки з урахуванням пружних властивостей стріли, без введення зворотного зв'язку за пружним моментом, за умови налаштування її на стандартну біноміальну форму. Дослідження показали, що ця система дає змогу забезпечити аперіодичний перехідний процес повороту люльки з заданою швидкістю і стабілізувати її в заданій точці. Окрім цього, при дії збурюючих впливів система є нечутливою в статичному режимі. Однак, отримані в процесі синтезу СПР передавальні функції регуляторів кутової швидкості двигуна і люльки мають високий порядок та вийшли досить складними з точки зору практичної реалізації.

**Постановка задач дослідження.** У цій статті для реалізації регуляторів кутової швидкості двигуна і люльки триконтурної СПР поворотом люльки, яка дає змогу забезпечити задані динамічні та статичні характеристики переміщення люльки за умови дії на неї керуючих та збурюючих впливів, пропонується замінити їх шляхом апроксимації еволюційними методами більш компактними  $\Pi^\lambda D^\mu$ -регуляторами або регуляторами дробового порядку.

**Виклад матеріалу дослідження.** Мета роботи [4] полягала в синтезі методом узагальненого характеристичного полінома позиційної триконтурної СПР поворотом люльки з врахуванням пружних властивостей стріли, без введення зворотного зв'язку за пружним моментом, яка дала змогу забезпечити аперіодичний перехідний процес повороту люльки з заданою швидкістю і низьку чутливість, в усталеному режимі, до дії збурень. В результаті було отримано такі передавальні функції регуляторів кутової швидкості двигуна  $W_{p_{u1}}(p)$ , люльки  $W_{p_{u2}}(p)$  і кута повороту люльки  $W_{pn}(p)$ :

$$\left. \begin{aligned} W_{p_{u1}}(p) &= \frac{\alpha_1 \omega_0 (T_u p + 1)}{K_{u1} K_{e1}} \left[ J_1 + \frac{J_2 (b_{12} p + C_{12})}{J_2 p^2 + b_{12} p + C_{12}} \right], \\ W_{p_{u2}}(p) &= \frac{\alpha_2 \omega_0 K_{u1}}{\alpha_1 K_{u2}} \left( \frac{J_2 p}{b_{12} p + C_{12}} + \frac{1}{p} \right), \\ W_{pn}(p) &= \frac{\omega_0 K_{u2}}{\alpha_2 K_n} \end{aligned} \right\} (1)$$

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що передавальні функції регуляторів кутової швидкості двигуна, люльки складні і мають високий порядок. Це ускладнює їх практичну реалізацію.

На основі проведених у роботі [8] та ін. досліджень показано, що регулятори дробового порядку мають переваги перед класичними, зокрема у випадку їх застосування для оптимізації

електромеханічних систем (ЕМС) з такими особливостями їх об'єктів керування: двомасовістю, у тому числі і з наявністю удару; люфтом; в'язкістю тертя валопривода; нелінійним навантаженням тощо. В [9] показано, що в ЕМС, крім механічних коливань, можливі також і електро-механічні. Внутрішнє в'язке тертя у валоприводі, аналогічне втратам у якірному колі, робить ці коливання згасаючими.

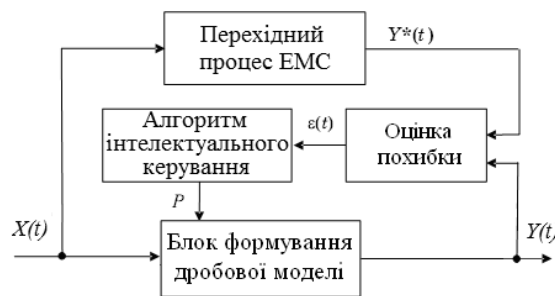
Використання регуляторів дробового порядку і, зокрема,  $\Pi^\lambda D^\mu$ -регулятора є ефективним засобом оптимізації ЕМС з врахуванням двомасовості її об'єкта керування та нелінійності реактивного навантаження за використання інтелектуальних методів [10]

$$W_p(p) = K_p + \frac{1}{T_i s^\lambda} + T_d s^\mu, \quad (2)$$

де  $K_p, T_d, T_i$  – значення пропорційної, диференціальної та інтегральної складових.

Замінимо регулятори кутової швидкості двигуна (РШ1) та люльки (РШ2) високого порядку з передавальними функціями  $W_{p_{u1}}(p)$  і  $W_{p_{u2}}(p)$  (1) більш компактними  $\Pi^\lambda D^\mu$ -регуляторами (2) або регуляторами дробового порядку шляхом їх апроксимації еволюційними методами [11].

На рис. 1.1 показана запропонована функціональна схема процедури апроксимації за використання методів рою частинок і генетичного алгоритму (ГА) [11].

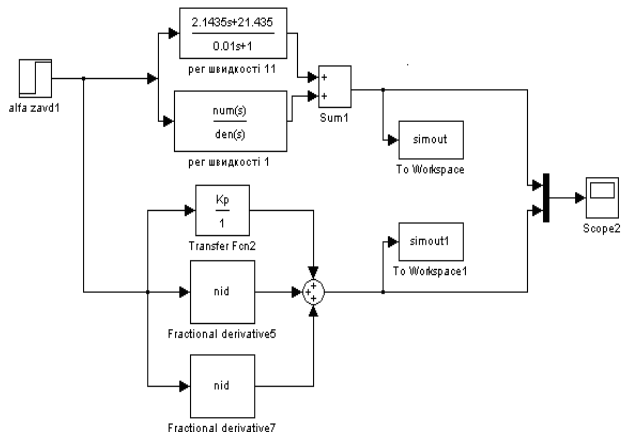


**Рисунок 1** – Функціональна схема процедури апроксимації цілочисельної передавальної функції високого порядку дробовими моделями за використання інтелектуальних методів

Процедура апроксимації об'єкта керування ЕМС за використання інтелектуальних методів, зокрема рою частинок і ГА, полягає в порівнянні синхронізованих у часі перехідного процесу вихідної координати досліджуваної ЕМС  $Y^*(t)$  і перехідної функції з «блоку формування дробової моделі»  $Y(t)$ , що відповідає поточному налаштуванню параметрів дробової моделі. Розбіжність між миттєвими значеннями цих двох функцій у дискретні моменти часу аналізує блок «оцінки похибки», через який «інтелектуальний метод» рою частинок

або ГА проводить корекцію параметрів «блока формування дробової моделі» до досягнення заданої похибки розбіжності. «Блок формування дробової моделі» за досягнення бажаної точності фіксує параметри дробової моделі, яка апроксимує задану перехідну функцію.

Для перевірки ступеня адекватності заміни класичного регулятора високого порядку РШІ з передавальною функцією  $W_{pud}(p)$  (1) ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятором (2) реалізовано структурну схему в пакеті MATLAB для симуляційного моделювання (рис. 2).



**Рисунок 2** – Структурна схема в пакеті MATLAB Simulink для перевірки ступеня адекватності регулятора РШІ з передавальними функціями (1) і (2) у процесі симуляційного моделювання

Заміну регулятора високого порядку РШІ з передавальною функцією  $W_{pud}(p)$  (1) здійснено за використання програмного забезпечення, розробленого для апроксимації класичних ланок з передавальними функціями високого порядку ланками дробового порядку методом ГА за їх перехідними функціями [11]. Метод ГА реалізовано за використання оптимізаційного пакету Optimization Toolbox.

Пошук параметрів ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора здійснювався в межах, наведених у табл. 1.

**Таблиця 1**

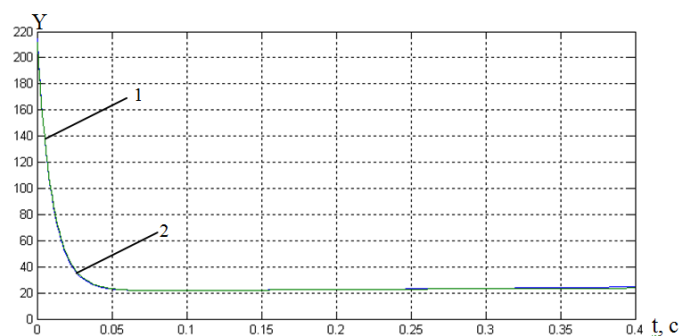
Межі зміни параметрів ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора

Параметр	Межі зміни
$K_p$	[1, 50]
$K_i = 1/T_i$	[0, 100]
$\lambda$	[0, 0,999]
$T_d$	[0, 100]
$\mu$	[0, 0,999]

У результаті отримано таку передавальну функцію ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора кутової швидкості двигуна:

$$W_{pud}'(p) = 12,197 + 12,241p^{-0,185} + 2,434p^{0,957} \quad (3)$$

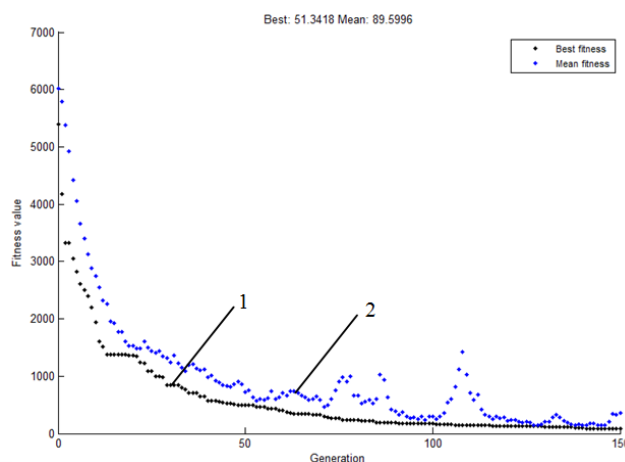
На рис. 3 показано перехідні функції регулятора РШІ з передавальною функцією  $W_{pud}(p)$  (1) (крива 1) і отриманого за використання ГА ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора з передавальною функцією  $W_{pud}'(p)$  (3) (крива 2).



**Рисунок 3** – Перехідні функції регулятора кутової швидкості двигуна:

крива 1 – з передавальною функцією (1),  
крива 2 – з передавальною функцією (3)

На рис. 4 показано апроксимаційний процес, який відбувається під час синтезу параметрів ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора, згідно із моделлю з бажаною якістю перехідного процесу за використання ГА, як залежності функції якості від номера ітерації. Розмір популяції – 50.



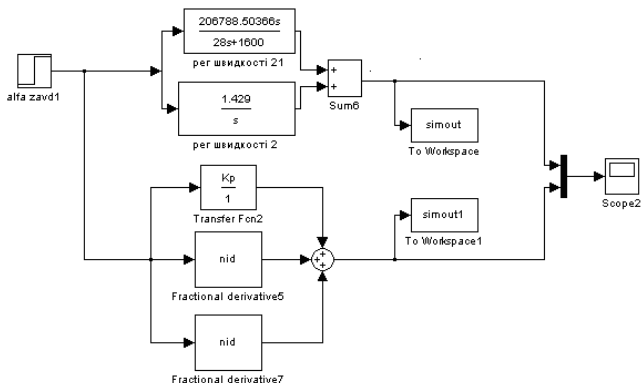
**Рисунок 4** – Апроксимаційний процес при синтезі параметрів ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора за використання ГА (залежність функції якості від номера ітерації)

Програма виділяє найкращі (best) (крива 1) і середні значення (крива 2) функції якості  $J$ , а шляхом контролю їх величин можна фіксувати момент завершення процесу апроксимації. Крім цього, кінцевий результат оцінюємо за абсолютним середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_{\Pi}$ .

Проведені дослідження підтверджують ефективність заміни регулятора високого порядку РШІ з передавальною функцією  $W_{pud}(p)$  (1) ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятором (3), передавальна функція якого ви-

значена шляхом апроксимації перехідної функції регулятора з передавальної функції (2) методом ГА.

На наступному етапі проводимо заміну класичного регулятора високого порядку РШ2 з передавальною функцією  $W_{pu2}(p)$  (1) ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятором (2) на основі реалізованої вище структурної схеми в пакеті MATLAB для симуляційного моделювання (рис. 5).



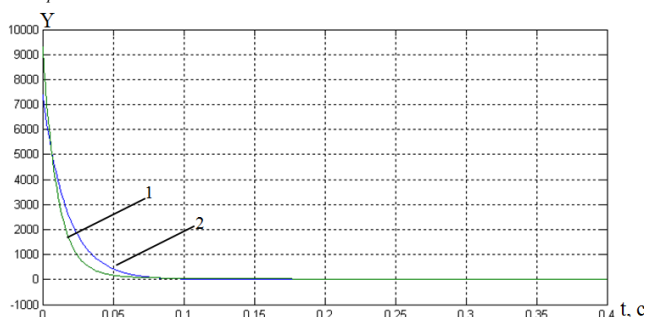
**Рисунок 5** – Структурна схема в пакеті MATLAB Simulink для перевірки ступеня адекватності регулятора РШ2 з передавальними функціями (1) і (2) в процесі симуляційного моделювання

Використавши оптимізаційний пакет Optimization Toolbox для синтезу методом ГА і задавши еталонним перехідним процесом, який відповідає ланці РШ2 (1), проведемо синтез ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора дробового порядку методом ГА.

У результаті отримано таку передавальну функцію ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора кутової швидкості люльки

$$W_{pu2}'(p) = 0,135 + 52,848p^{-0,931} + 60,539p^{0,978}. \quad (4)$$

На рис. 6 показано перехідні функції регулятора РШ2 з передавальною функцією  $W_{pu2}(p)$  (1) (крива 1) і отриманого за використання ГА ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора з передавальною функцією  $W_{pu2}'(p)$  (4) (крива 2).

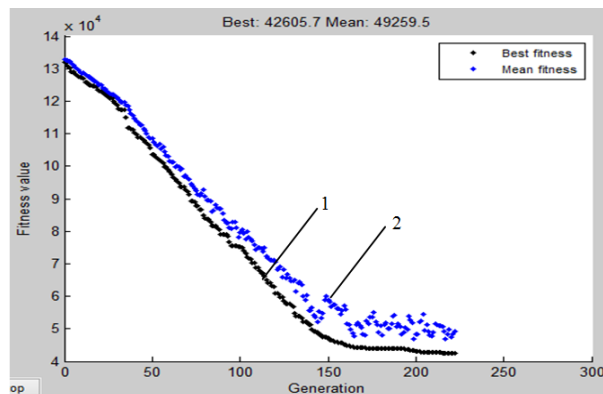


**Рисунок 6** – Перехідні функції регулятора кутової швидкості люльки:

крива 1 – з передавальною функцією (1),  
крива 2 – з передавальною функцією (4)

На рис. 7 показано апроксимаційний процес, який відбувається під час синтезу параметрів

ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора, згідно із моделлю з бажаною якістю перехідного процесу за використання ГА як залежності функції якості від номера ітерації. Розмір популяції – за замовчуванням 100.



**Рисунок 7** – Апроксимаційний процес при синтезі параметрів ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятора за використання ГА (залежність функції якості від номера ітерації)

Аналіз отриманого результату апроксимації регулятора РШ2 з передавальними функціями (1) і (4) у процесі симуляційного моделювання показав задовільну точність, проте для випадку коли б вона нас не задовольняла, розглянемо ще один варіант.

В роботі [12] запропоновано проводити апроксимацію передавальної функції високого порядку за використання передавальної функції дробового порядку з нулем і полюсом:

$$W(p) = k \frac{b_1 p^{\beta_1} + 1}{a_1 p^{\alpha_1} + 1}. \quad (5)$$

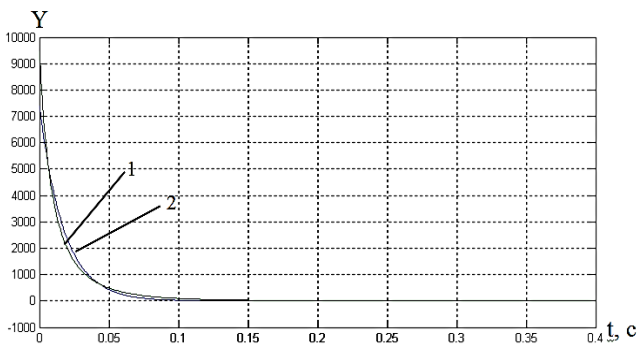
Адаптувавши структурну схему рис. 5 до передавальної функції (5) та використавши оптимізаційний пакет Optimization Toolbox для синтезу методом ГА і задавши еталонним перехідним процесом, який відповідає ланці РШ2 (1), проведемо синтез дробового регулятора (5) методом ГА.

У результаті отримано таку передавальну функцію дробового регулятора:

$$W_{pu2}^{\partial}(p) = 14,953 \frac{9,466p^{0,912} + 1}{23,311p^{-0,949} + 1}. \quad (6)$$

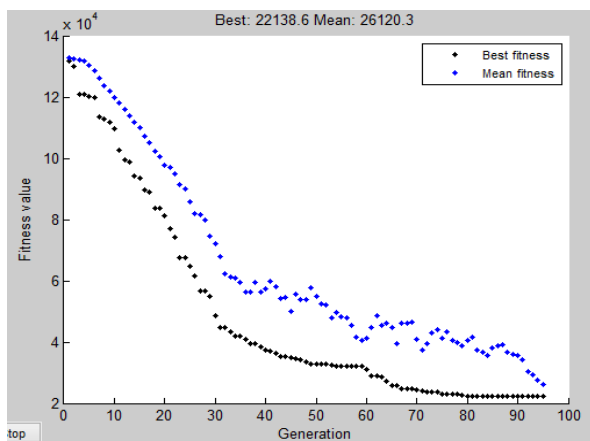
На рис. 8 показано перехідні функції регуляторів РШ2 з передавальною функцією  $W_{pu2}(p)$  (1) (крива 1) і отриманого за використання ГА з передавальною функцією (6) (крива 2).





**Рисунок 8** – Перехідні функції регулятора кутової швидкості люльки:  
крива 1 – з передавальною функцією (1),  
крива 2 – з передавальною функцією (6)

На рис. 9 показано апроксимаційний процес, який відбувається під час синтезу параметрів дробового регулятора, згідно із моделлю з бажаною якістю перехідного процесу за використання ГА як залежності функції якості від номера ітерації. Розмір популяції – за замовчуванням 100.



**Рисунок 9** – Апроксимаційний процес при синтезі параметрів дробового регулятора за використання ГА (залежність функції якості від номера ітерації)

Отримані результати досліджень підтверджують ефективність заміни регуляторів РШ1 і РШ2 з передавальними функціями високого порядку  $W_{pu1}(p)$ ,  $W_{pu2}(p)$  (1) ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регуляторами або регуляторами дробового порядку, передавальні функції яких –  $W_{pu1}'(p)$  (3),  $W_{pu2}'(p)$  (4),  $W_{pu2}^0(p)$  (6) – визначаються шляхом апроксимації перехідної функції регулятора з передавальних функцій (2) і (5) методом ГА.

### Висновки

Перехідні функції регуляторів кутової швидкості двигуна і люльки, які були отримані в процесі синтезу методом узагальненого характеристичного полінома триконтурної СПР поворотом люльки, мають високий порядок та вийшли

досить складними з точки зору практичної реалізації. Однак запропонована СПР дає змогу забезпечити задані динамічні та статичні характеристики переміщення люльки за умови дії на неї керуючих та збурюючих впливів. Тому замінено ці регулятори, шляхом апроксимації еволюційними методами, більш компактними ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регуляторами або регуляторами дробового порядку. Проведені дослідження на цифрових моделях підтверджують ефективність заміни регуляторів високого порядку кутової швидкості двигуна і люльки на ПІ<sup>λ</sup>Д<sup>μ</sup>-регулятори або регулятори дробового порядку, передавальні функції яких (3), (4), (6) визначені шляхом апроксимації перехідних функцій регуляторів з передавальних функцій (2) і (5) методом генетичного алгоритму.

### Список літератури

1. Автодрабини пожежні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування (EN 14043:2005, IDT) : ДСТУ EN 14043:2008. – [Чинний від 2008-12-26]. – К. ; Держспоживстандарт України, 2008. – 176 с. – (Національний стандарт України)
2. Innovative technologies and intelligent solutions. [Електронний ресурс] / – Режим доступу : <http://www.magirusgroup.com/de/en>.
3. Марущак Я. Ю. Синтез систем автоматичного керування підйомного механізму для рятувальних робіт / Марущак Я. Ю., Кушнір А. П. // Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика” науково-технічного журналу “Електроінформ” – Львів : ЕКОінформ, 2009. – С. 178-180.
4. Кушнір А. П. Синтез системи автоматичного керування поворотом люльки пожежного автопідйомача з урахуванням пружних властивостей стріли / Кушнір А. П., Оксентюк В.М., Кравець І.П., Войцех М. В. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2016. – №29. – С.93-99.
5. Марущак Я. Ю. Вентильний електропривод механізму повороту платформи пожежного автопідйомника / Марущак Я. Ю., Кушнір А. П., Оксентюк В. М. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2014. – №24. – С. 103-110.
6. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням: навчальний посібник / Марущак Я. Ю. – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2005. – 208 с.
7. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
8. Бушер В. В. Покращення якості електротехнічних систем з дробовими інтегрально-диференціальними ланками : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.09.03 / Бушер В. В. – Одеса, 2013. – 37 с.

9. Шевченко І. С. Спеціальні питання теорії електропривода. Динамічні процеси в складних механічних системах: навч. посіб. для студентів ВНЗ / І. С. Шевченко, Д. І. Морозов. - Київ: Кафедра, 2014. – 199 с.

10. Копчак Б. Л. Аналіз і синтез електро-механічних систем, які описуються дробовими інтегрально-диференціальними ланками: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.09.03 / Копчак Б. Л. – Львів, 2017. – 40 с.

11. Копчак Б. Л. Апроксимація перехідних функцій поліномами дробового порядку / Б. Л. Копчак // Одеський національний політехнічний університет. Наук.-техн. журнал «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – 2014. – №14. – С. 20–27.

12. Kopchak B. Application of fractional order transfer function with zero and pole in approximation of electromechanical systems high order objects / B. Kopchak, M. Kopchak // Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH) : proceedings of XIV-th International conference, Polyana, April 18–22, 2018. – 2018. – P. 23–27.

### References

1. *Autostairs are fire. General technical requirements and methods of test* (EN 14043:2005, IDT): DSTU EN 14043:2008/ Kyiv: Derzspozuvstandart of Ukraine 2004 (in Ukr.).

2. Innovative technologies and intelligent solutions. Retrieved from: <http://www.magirusgroup.com/de/en>.

3. Marushchak, Ya. Yu., and Kushnir, A. P. (2009). “Synthesis of lifting mechanism automatic control system for rescue works”. *Problemy avtomatyzovanogo elektropryvodu. Teoriya i praktyka* (Problems of automatic electric drive. A theory and practice): *Elektroinform*. Lviv : EKOinform, pp. 178-180. (in Ukr.).

4. Kushnir, A. P., Oksentyuk, V. M., Kravec', I. P. and Vojceh, M. V. (2016). “Automatic control system synthesis of basket turning fire lifts with taking into account elastic properties of arrows”. *Pozhezhna bezpeka (Fire of safety)*. Lviv State University of Life Safety, no. 29, pp. 93-99. (in Ukr.).

5. Marushchak, Ya. Yu., Kushnir, A. P., and Oksentyuk V. M. (2014). “Switched electrical drive of platform's rotation mechanism of aerial appliance”. *Pozhezhna bezpeka (Fire of safety)*. Lviv State University of Life Safety, no 24, pp. 103-110 (in Ukr.).

6. Marushchak, Ya. Yu. (2005). *Synteza elektromekhanichnykh system z poslidovnym ta paralelnym koryuvannyam* [Synthesis of electromechanical systems with serial and parallel adjustment]. Lviv : National university “Lviv polytechnic” (in Ukr.).

7. Kljuchev, V.Y. (2001). *Teoriya elektropryvodu* [Electric drive theory]. Energoatomizdat. Moscow, Russia.

8. Busher, V. (2013). “An improvement in the quality of Electrotechnical systems with the fractional integral and differential components”. Thesis abstract for Dr. Sc. (Technical.). 05.09.03, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

9. Shevchenko, I. S. and Morozov, D. I. (2014). *Special'ni pytannya teorii elektropryvodu. Dynamichni procesy v skladnykh mekhanichnykh systemax* [Special questions in the theory of electric drive. Dynamic processes in complex mechanical systems]. Kyiv: Kafadra (in Ukr.).

10. Kopchak B. L. (2017). “Analysis and synthesis of electromechanical systems described by fractional integral-differential units”. Thesis abstract for Dr. Sc. (Technical.). 05.09.03, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

11. Kopchak B. L. (2014). “Approximation of transition functions by polynomials of fractional order”. *Elektrotekhnichni ta kompyuterni systemy (Electrical and computer systems)*. Odessa National Polytechnic University, no. 14, pp. 20-27. (in Ukr.).

12. Kopchak, B. and Kopchak, M. Application of fractional order transfer function with zero and pole in approximation of electromechanical systems high order objects. *Perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH) : proceedings of XIV-th International conference*, Polyana, April 18–22, 2018. pp. 23–27.

*B. L. Kopchak, A. P. Kushnir, I. P. Kravets*

### SYNTHESIS OF FRACTIONAL ORDER CONTROLLERS FOR MULTI-LUPP CONTROL STRUCTURE OF FIRE LIFT BASKET TURNING

**Introduction.** The attempt to get the best dynamic and static characteristics of the basket turn angle complicates the tasks performed by the automatic control system (ACS) basket turn drive. The ACS of the basket turn should meet the following requirements: high speed, smooth acceleration and breaking of the motor, static and dynamic accuracy of the reproduction of tasks trajectories, no overregulation in transition modes, required stability reserve, low sensitivity to coordinate and parametric disturbances, etc. A number of fundamentally different ACSs and methods for their synthesis have been analyzed to provide these requirements. As a result of the analysis, there has been selected a two-loop feedback control system (FCS) of the basket turn with regard to the elastic properties of the arrow, which is synthesized by

the method of the generalized characteristic polynomial. Studies have shown that this system allows to provide an aperiodic transition process of the basket turn angle with a given speed and low sensitivity in steady state to the perturbation effect. However, the synthesized FCS transfer functions of the controllers of angular velocity of the motor and the basket have a high order and turned out to be quite complicated in terms of practical implementation.

**Purpose.** In the article it is proposed to replace these controllers, by approximating them through evolutionary methods, with more compact fractional  $PI^\lambda D^\mu$ -controllers or fractional order controllers.

**Results.** The studies carried out in this work have shown that fractional order controllers are quite advantageous in comparison with the over classical ones, particularly in the case of their application for optimization of electromechanical systems with the following features of their control objects: two masses, including those with the presence of impact; backlash viscosity of the drive friction; nonlinear load and so on.

Replacement of the high-order motor and basket angular speed controllers with more compact  $PI^\lambda D^\mu$  controllers or fractional order controllers has been performed using Optimization Toolbox optimization package in the MATLAB package. This software has been developed for approximation of classical parts with high-order transfer functions by fractional order parts, using a genetic algorithm or a particle swarm optimization for their transition functions.

**Conclusion.** The conducted research on digital models has confirmed the efficiency of the replacement of high-order motor and basket angular velocity controllers with  $PI^\lambda D^\mu$ -controllers or fractional order controllers, whose transfer functions are determined by approximating the transition functions of the controllers by the genetic algorithm method.

**Keywords:** fire lifts, turning mechanism, fractional order controller, genetic algorithm method, computer model.