

УДК 681.5.013

doi:10.20998/2413-4295.2018.26.30

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ "GREY WOLF" В ЗАДАЧІ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЧИСТИХ ПРИМІЩЕНЬ

Ю. С. ПІРГАЧ, О. В. СТЕПАНЕЦЬ*

кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, УКРАЇНА

*email: stepanets.av@gmail.com

АНОТАЦІЯ У роботі розглядається можливість оптимізації систем автоматичного регулювання технологічних параметрів неперервних процесів. Проведено огляд сучасних пошукових алгоритмів оптимізації, подібних до роботи біологічних та фізичних об'єктів і структур. Розглянуто особливості чистих приміщень як об'єкта керування, вказані основні причини нестаціонарності динамічних характеристик, що призводять до необхідності корекції параметрів налаштувань регуляторів. Досліджено метод оптимізації «Grey wolf» у застосуванні до системи автоматичного регулювання технологічних параметрів вентиляції чистих приміщень. Процес та результати оптимізації Grey Wolf Optimizer порівняно з методом оптимізації Хука—Дживса. Показані особливості та переваги від застосування методу для налаштування каскадної структури системи автоматичного керування з двома ПІД-регуляторами на задані показники якості.

Ключові слова: оптимізація систем автоматичного регулювання; Grey Wolf Optimizer; налаштування ПІД-регуляторів

GRAY WOLF OPTIMIZATION METHOD FOR AUTOMATIC VENTILATION SYSTEMS OF CLEAN ACCESSORIES

O. PIRHACH, Y. STEPANETS

Department of Automation of heat-and-power engineering processes, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The manufacturing processes complication leads to cost increasing of equipment service and maintenance costs. An important role in overcoming these factors is played by modern automatic control systems, regulators optimization and adaptation of control systems to changing conditions. Today, the actual problem remains the adjustment and optimization of automatic control systems, especially complex structures.

The article researches the population optimization algorithm "Gray wolf" as applied to the search for optimal PID-controller settings. A cascade automatic control system with two PID regulators optimized for a minimum of integral IAE, ISE quality criteria, as well as control time is considered. The advantage of the method under investigation is shown in a comparing with the Hook-Jeeves zero-order optimization method. The mathematical modeling of the automatic control system of air temperature in a clean room with the "Grey wolf" optimization method is performed. Attention is focused on the convenience of using the method, since it does not require an accurate setting of the initial parameters of the regulators. This eliminates the need for an a priori knowledge of the customizable system dynamics by the user.

The commissioning of control parameters optimizing systems will help to increase the efficiency of the equipment in conditions of variable operating modes. The recommended area of the method used is the complex structures of automatic control systems, where the search for optimal settings by classical methods is difficult or does not exist.

Key words: automatic control system optimization; Grey Wolf Optimizer; PID-controller adjustment

Вступ

Загальні тенденції розвитку промисловості свідчать про безперервне посилення вимог до якості та безпеки продукту, що виробляється, до часу, який витрачається на його виробництво і до собівартості його отримання. На високий рівень піднімається питання про неприпустимість виникнення аварійних зупинок технологічних процесів і надійність обладнання. Умови ринкових відносин швидко навчили приватний бізнес, що витрати на ремонт і відновлення процесу виробництва – це втрата часу, а втрачений час – це не зароблені гроші, тобто гроші, фактично віддані конкуренту.

У сформованих непростих обставинах стає очевидним, що звичайних систем автоматичного

управління технологічними процесами, які забезпечують дотримання регламентних змінних в заданих діапазонах, вже не досить. Необхідним стало вивчення можливості прогнозування роботи технологічної системи, вивчення властивостей технологічного процесу. Важливим фактором у вирішенні описаної проблеми стає стабільність як властивість технологічного процесу. Очевидно, що амортизація елементів і вузлів технологічного обладнання, залежність їх характеристик від таких умов експлуатації, як температура і вологість, запиленість та хімічна агресивність, навколишнього середовища, режимів роботи відчутно впливають на динамічну точність і стійкість САУ.

У той же час цілком очевидно, що ефективність використання САУ багато в чому визначається

виконанням вимог щодо забезпечення стабільності показників якості в широкому діапазоні змін умов функціонування, що викликають в САУ різні параметричні збурення.

При синтезі САУ постає задача визначення оптимальних параметрів системи, які задовольняють мінімуму заданого критерію якості. Ці задачі можна вирішувати на основі єдиного підходу, заснованого на пошуковій процедурі, організованій за певним алгоритмом. У даний час відома велика кількість таких алгоритмів, причому їх різноманітність викликана, з одного боку, прагненням отримати алгоритм, що забезпечує досить швидко збіжність пошукової процедури, а з іншого, - з урахуванням тих чи інших особливостей рельєфу цільової функції або відсутності будь-яких відомостей про рельєф. У залежності від числа пошукових змінних розрізняють одновимірний і багатовимірний пошуки. В якості самостійної процедури одновимірний пошук застосовують доволі рідко, проте його часто використовують як важливий елемент багатовимірною пошуку.

Чисте приміщення [1] - це середовище, в якому мінімальна кількість мікроорганізмів і шкідливих речовин, що згубно впливають на людське здоров'я. Саме при таких умовах відбувається виробництво лікарських засобів, операції і лікування хворих, переливання крові, виробництво годинників та оптики, збирається мікроелектроніка, здійснюється обробка їжі.

Вентиляція в чистому приміщенні сприяє зменшенню поширення мікроорганізмів, подачі чистого повітря, запобігання надходження забрудненого повітря, контролю рівня температури і вологості.

Мета роботи

Задачі оптимізації відрізняються великою різноманітністю та складністю, у зв'язку з чим відсутній універсальний метод їхнього рішення.

Усі методи розв'язання оптимізаційних задач можна розбити на дві великі групи: методи класичного аналізу та методи математичного програмування [2].

Методи, розроблені в класичній математиці, засновані на розв'язанні систем алгебраїчних рівнянь, отриманих при прирівнюванні нульових частинних похідних досліджуваної функції по оптимізуючих параметрах. Ці методи дозволяють розв'язувати задачі пошуку оптимуму тільки при відсутності обмежень на оптимізовані параметри або при обмеженнях у вигляді рівностей (метод множників Лагранжа).

Методи класичного аналізу застосовують у тому випадку, коли аналітичний вигляд критерію оптимізації й обмежень відомий, і рівняння можна виразити в явній формі. Інакше застосовують методи математичного програмування, коли розв'язання некласичних оптимізаційних задач здійснюється за допомогою визначеної програми дій, тобто алгоритму,

що вказує послідовність операцій, у зв'язку з чим ці методи іноді називають також алгоритмічними.

Методи МП класифікують відповідно до типів некласичних оптимізаційних задач, ефективність розв'язання яких залежить від природи цільової функції $f_0(\vec{u})$. Залежно від постановки задачі оптимізації розрізняють методи безумовної та умовної оптимізації. Залежно від здатності алгоритму шукати локальний або глобальний екстремум виділяють методи локальної та глобальної оптимізації.

Нині значна увага дослідників приділяється алгоритмам, пошук у яких здійснюється по аналогії з фізичними чи біологічними процесами.

Одним із таких алгоритмів глобальної оптимізації, є алгоритм імітації відпалу [3]. У ньому процедура пошуку глобального розв'язку імітує фізичний процес відпалу. Алгоритм ґрунтується на імітації фізичного процесу, який відбувається при кристалізації речовини з рідкого стану в твердий, у тому числі при відпалі металів. За допомогою моделювання такого процесу шукається така точка або множина точок, на яких досягається мінімум деякої числової функції. У багатьох практичних ситуаціях, де наявні алгоритми не працюють, моделювання відпалу має великі плюси: загальність застосування і простота реалізації.

Також існують алгоритми випадкового пошуку [4], що відносяться до алгоритмів нелінійного математичного програмування. Такі алгоритми здобули собі широку популярність під час вирішення практичних інженерних задач. Найпростіший алгоритм – локальний неадаптивний алгоритм випадкового пошуку. Задається початкова точка, надається їй прирощення, після чого порівнюються значення цільової функції в двох точках і краща стає поточною. Так відбувається поки не виконається умова зупинки. Перевагами даного алгоритму є його простота, стійкість і інтуїтивна зрозумілість. Недоліками – низька швидкість збіжності, а також невизначеність у виборі умови зупинки.

Існують також адаптивні алгоритми випадкового пошуку екстремуму. Їх основна ідея полягає в тому, що пошук ведеться не з якоїсь однієї початкової точки, а по всій області, і в процесі його виконання змінюється закон розподілу генерації вектора робочих параметрів (точок, в яких обчислюється значень цільової функції). Зазвичай на початкових етапах розподіл є рівномірним, а потім щільність ймовірності збільшується в районі передбачуваного оптимуму.

Останні роки все більше набувають популярності біологічні методи оптимізації. Дані алгоритми відносяться до класу стохастичних пошукових. У багатьох джерелах [5] також можна зустріти такі визначення, як поведінковий, інтелектуальний, метаевристичний або популяційний.

Популяційні алгоритми поділяються на такі категорії: еволюційні, включаючи генетичні, що імітують поведінку живої природи (наприклад,

алгоритм оптимізації роєм світлячків, пошук зозулі та ін.), алгоритми, що імітують поведінку неживу природу (наприклад, алгоритм гравітаційного пошуку), алгоритми, засновані на поведінці людського суспільства (наприклад, алгоритм еволюції розуму).

Одним із таких перспективних алгоритмів є алгоритм оптимізації, що імітує поведінку зграї сірих вовків - Grey Wolf Optimizer (GWO) [6]. Алгоритм імітує ієрархію лідерства і механізм полювання сірих вовків в природі. Чотири типи сірих вовків, таких як альфа, бета, дельта і омега використовуються для моделювання ієрархії лідерства. Крім того, існують три основні етапи полювання, такі як пошук здобичі, оточення здобичі та атака здобичі, що реалізуються для виконання оптимізації.

Метою роботи є дослідження можливості застосування та ефективності роботи алгоритму оптимізації Grey Wolf Optimizer у задачі для пошуку оптимальних параметрів налаштування регуляторів каскадної системи регулювання температури в чистих приміщеннях [7].

Виклад основного матеріалу

Сірий вовк належить до сімейства собачих та вважаються вершиною хижаків, а це означає, що вони знаходяться на вершині харчового ланцюга. Сірі вовки в основному віддають перевагу жити в зграї. Розмір групи 5-12 особин в середньому. Особливий інтерес в тому, що вони мають дуже сувору соціальну домінуючу ієрархію [8].

Лідерів чоловічої і жіночої зграї називають альфи. Альфа особини відповідають за прийняття рішення про полювання, спальне місце, час пробудження, і так далі. Цікаво, що альфа особини не обов'язково найсильніші члени зграї, але найкращі з точки зору управління зграєю. Це показує, що організація і дисципліна зграї набагато важливіша, ніж його сила.

Другий рівень в ієрархії сірих вовків – бета особини – підлеглі вовки, які допомагають альфа в процесі прийняття рішень або інших видів діяльності зграї. Бета-вовк може бути чоловічої чи жіночої статі, і він чи вона, ймовірно, є найкращим кандидатом, щоб бути альфа в разі, якщо один з альфа-вовків зникає або стає дуже старий.

Найнижчий рівень зграї сірих вовків – омеги. Омега-вовки повинні підкорятися усім іншим домінуючим особинам. Це останні вовки, яким дозволено з'їсти здобич.

Якщо вовк не є альфа, бета або омега, він називається підлеглим (або дельта). Дельта вовки повинні підкорятися альфа і бета, але вони домінують над омега. Розвідники, вартові, старійшини, мисливці і доглядачі відносяться до цієї категорії. Вони несуть відповідальність за кордони території і попереджують зграю в разі будь-якої небезпеки. Вартові захищають і гарантують безпеку зграї. Мисливці допомагають альфа і бета особинам при полюванні здобичі. І,

нарешті, доглядачі несуть відповідальність за слабких, хворих і поранених вовків в зграї. Основні фази полювання сірого вовка наступні [9]: відстеження, погоня, наближення до здобичі, оточення, наступ, виснаження здобичі, атака здобичі.

Між кількістю пошукових агентів (вовків) та часом відпрацювання алгоритму, якістю оптимізації та кількістю шуканих розв'язків є певна залежність – чим більша кількість пошукових агентів, тим результат оптимізації кращий, але із значною затримкою по часу виконання оптимізації. Тому кількість пошукових агентів потрібно обирати відповідно до поставлених задач як компроміс між швидкістю пошуку рішення та його точністю.

Основною вимогою до чистих приміщень є забезпечення наступних параметрів повітря [10]:

- 1.Кратність повітрообміну
- 2.Перепади тиску між сусідніми приміщеннями
- 3.Температура
- 4.Вологість
- 5.Концентрація часток в приміщенні

Кратність повітрообміну показує інтенсивність вентиляції приміщення, тобто кількість обмінів повітря у приміщенні, яке подається або витягується протягом однієї години.

Перепади тиску важливі для того, щоб повітря з менш чистих приміщень не потрапляло в більш чисте, а також для забезпечення певної концентрації часток в повітрі. Перепад задається залежно від конфігурації приміщення та процесів, які там відбуваються, та підтримується за допомогою автономного регулятора перепаду.

Залежно від допустимої концентрації часток є різні класи чистоти. Для процесів, які мають відбуватись в повністю стерильному приміщенні є клас А (найвищий), а для робіт з найнижчою стерильністю - клас К.

У кожній вентиляційній установці є щонайменше 4 фільтри. З часом фільтр забруднюється, що призводить до падіння тиску на ньому. Часто різниця падіння тиску між чистим та забрудненим фільтром може бути аж в два рази. Із падінням тиску буде падати витрата повітря і порушуватись аеродинамічний баланс. Щоб з цим боротись, після розгалуження магістрального повітропроводу на кожну гілку встановлюють автоматичні регулятори витрати повітря. Для забезпечення постійної витрати повітря на групу приміщень в центральній магістралі підтримується надлишковий тиск, а локальні регулятори прикриваючи жалюзі не пропускають повітря більше ніж потрібно, і відкриваються більше, коли падіння на фільтрах збільшується. Забезпечити необхідний тиск на центральній магістралі можна, встановивши на вентилятор перетворювач частоти, а на виході з установки датчик статичного тиску.

Для чистих приміщень характерне значне тепловідлення від виробничого обладнання, а так як допустимі температури – 20...25°C, щоб їх

компенсувати необхідно робити високі кратності повітрообміну.

Керування температурою в чистому приміщенні здійснюється за допомогою калорифера та компресорно-конденсаторного блоку. Можливий вигляд установки показано на рис. 1. Більшу частину року в Україні система вентиляції чистого приміщення працює в режимі нагріву повітря. Тому дослідження проводитимуться на контурі регулювання температури повітря в приміщенні за допомогою зміни кількості теплоносія, що проходить через водяний калорифер.



Рис. 1 – Схематичне зображення об'єкта керування

Вентильовані приміщення є інерційними об'єктами, тому для регулювання застосована каскадна система, де інерційним контуром є температура повітря в приміщенні, а випереджуючим – температура повітря в припливному повітропроводі після усіх теплообмінників.

Моделі об'єктів представлені у вигляді передавальних функцій інерційного (1) та випереджаючого (2) контурів.

$$W(s) = \frac{0,15}{330s+1} e^{-10s} \quad (1)$$

$$W(s) = \frac{0,4}{50s+1} e^{-2s} \quad (2)$$

Показниками якості регулювання температури виступають мінімум інтегральних критеріїв якості, зокрема, інтегрального квадратичного та інтегрального модульного критеріїв якості, а також значення часу регулювання каскадної системи автоматичного регулювання (САР) (рис. 2, рис 3) [11].

Дослідження

Дослідження роботи методу оптимізації GWO порівняне із популярним методом нульового порядку Хука-Дживса (НЮ). Для методу оптимізації Хука-Дживса початкові налаштування регуляторів визначені за експрес-методикою [12]. Індикація параметрів показує приналежність до конкретного регулятора: «1» - коректуючий регулятор температури повітря в приміщенні, «2» - стабілізуючий регулятор температури повітря на виході з вентиляційної установки.

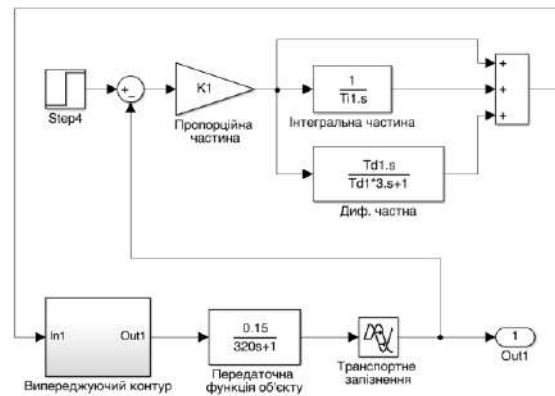


Рис. 2 – Схема каскадної системи автоматичного регулювання

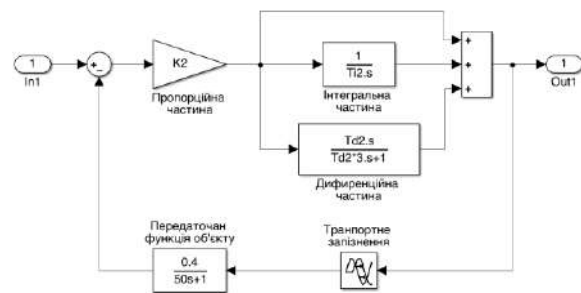


Рис. 3 – Схема випереджаючого контуру каскадної системи автоматичного регулювання

$$\begin{aligned} K_1 &= 16.8 & K_2 &= 2.33 \\ T_{i1} &= 110 & T_{i2} &= 121.2 \\ K_2 &= 0.001 & T_{d2} &= 0.66 \end{aligned}$$

Метод оптимізації GWO не потребує жорстко заданих початкових параметрів для роботи алгоритму [13]. Перед початком пошуку оптимальних параметрів задаються межі, в яких буде відбуватись пошук кожного з параметрів системи для пошуку мінімуму цільової функції. Існує можливість задавати початкові параметри одним набором чисел і їх пошук буде відбуватись у певній околиці цього набору. Однак, у цьому випадку можуть бути знайдені неприпустимі для конкретної задачі величини, наприклад, від'ємні значення параметрів регулятора. Отже, межі були обрані наступні:

$$\begin{aligned} K_1 &= [0.001; 100] & K_2 &= [0.001; 60] \\ T_{i1} &= [0.001; 500] & T_{i2} &= [0.001; 500] \\ T_{d1} &= [0.001; 1] & T_{d2} &= [0.001; 1] \end{aligned}$$

Також для методу оптимізації GWO була встановлена кількість пошукових агентів (вовків), яка становить 20 [14]. Нижче наведені графіки перехідних процесів деяких кроків оптимізації алгоритмів GWO та Хука-Дживса (рис. 4 – рис. 6). Проміжні кроки ілюструють динаміку пошуку оптимальних налаштувань у прив'язці до впливу поточних значень

на перехідні процеси. Зважаючи на інерційність об'єкта керування, а також природу пошукового алгоритму GWO його не можна використовувати для on-line оптимізації. Однак на етапі проектування системи, якщо модель об'єкта визначена аналітично, або під час пуско-налагоджувальних робіт, коли проведена ідентифікація контуру, застосування методу для налаштування складних структур шляхом математичного моделювання цілком виправдане.

Максимальна кількість ітерацій пошуку обома методами була обмежена значенням 30.

Як цільові функції методів оптимізації, значення яких потрібно мінімізувати впродовж процедури оптимізації, використані інтегральний квадратичний (ISE), інтегральний модульний (IAE) критерії якості АСР та час перехідного процесу.

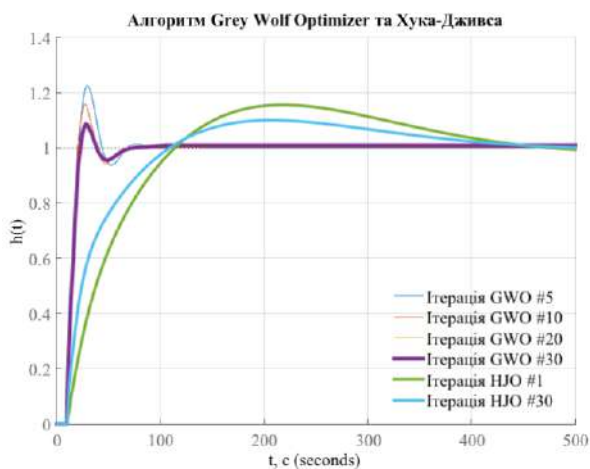


Рис. 4 – Перехідні характеристики САР на деяких кроках алгоритму GWO та Хука-Джівса для оптимізації інтегрального модульного критерію якості

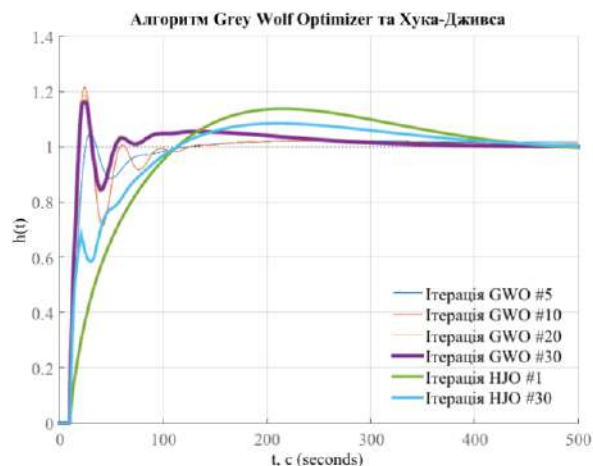


Рис. 5 – Перехідні характеристики САР на деяких кроках алгоритму GWO та Хука-Джівса для оптимізації інтегрального квадратичного критерію якості

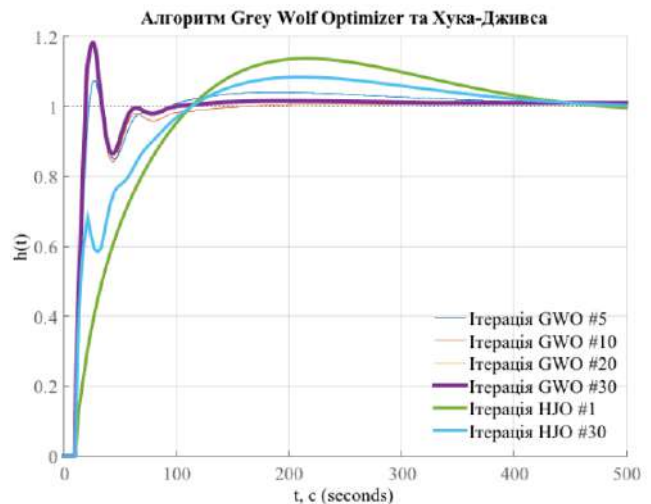


Рис. 6 – Перехідні характеристики САР на деяких кроках алгоритму GWO та Хука-Джівса для оптимізації часу регулювання системи

Результати оптимізації по інтегральному квадратичному (ISE), інтегральному модульному (IAE) критерію якості АСР та часу регулювання системи зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати оптимізації

Метод		GWO						
Крит.	Парам.	Знач.	K_1	T_{i_1}	Td_1	K_2	T_{i_2}	Td_2
	IAE		16,57	94.2	466.12	0.98	1.79	113.78
ISE		12.84	51.1	77.72	1	4.33	418.95	1
Час регулювання		92	90.07	334.9	1	2.3	172.45	1
Метод		HJ						
Крит.	Парам.	Знач.	K_1	T_{i_1}	Td_1	K_2	T_{i_2}	Td_2
	IAE		55.31	19.001	109.42	0.62	4.37	120.37
ISE		18.81	19.9484	109.72	3.12	5.461	118.88	3.42
Час регулювання		220	20.1	109.6	3.13	5.5	119.2	3.41

Таблиця містить показники якості роботи системи та параметри налаштувань регуляторів.

Як видно з перехідних характеристик та результатів порівняння, наведених у таблиці 1, метод оптимізації GWO очікувано [15] має кращі результати мінімізації ISE, IAE та часу регулювання. Крім того, область вхідних даних методу GWO встановлена у широкому діапазоні, але наближення до результату мінімізації відбулось вже на перших 15 кроках алгоритму. На рис. 7 – 9 показані залежності мінімізованого параметру від ітерацій алгоритму.

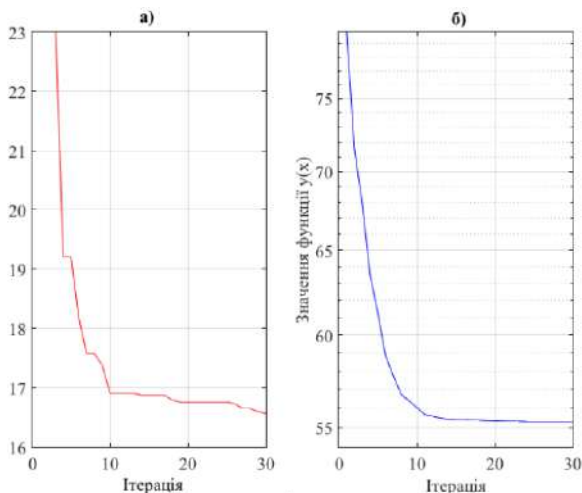


Рис. 7 – Залежність мінімізованого параметру IAE від ітерацій алгоритму.

а) для алгоритму GWO, б) для алгоритму Хука-Дживса

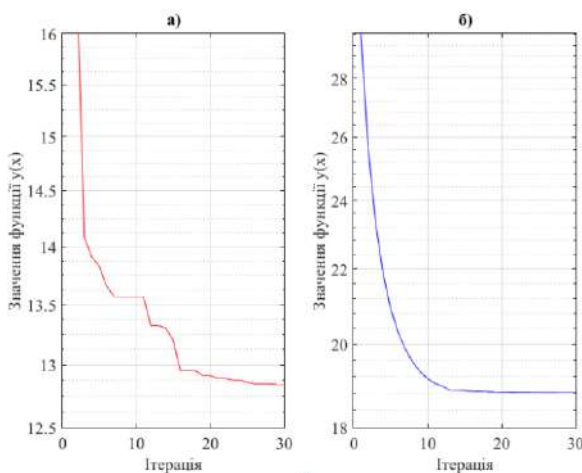


Рис. 8 – Залежність мінімізованого параметру ISE від ітерацій алгоритму.

а) для алгоритму GWO, б) для алгоритму Хука-Дживса

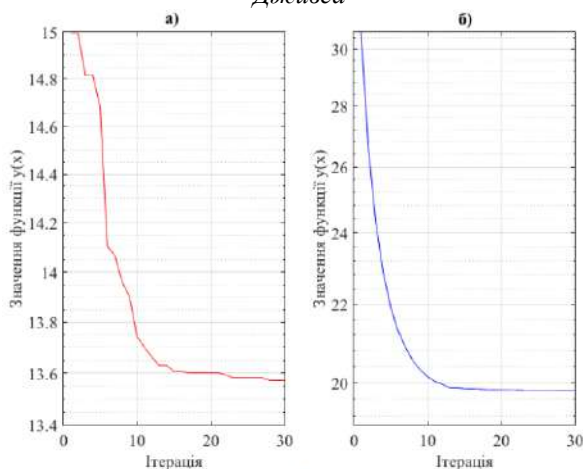


Рис. 9 – Залежність мінімізованого параметру часу регулювання від ітерацій алгоритму.

а) для алгоритму GWO, б) для алгоритму Хука-Дживса

Висновки

Існує велика кількість алгоритмів, які базуються на випадковому пошуку екстремумів і всі вони з успіхом застосовуються на практиці з огляду на їх простоту, стійкість роботи, відсутність необхідності обчислення похідних, наочності і задовільною і хорошою збіжністю, особливо на задачах великої розмірності. Дослідження популяційного алгоритму пошуку екстремумів функцій Grey Wolf Optimizer (GWO) як методу оптимізації для автоматичної системи керування вентиляцією чистого приміщення показало його ефективність у пошуку оптимальних налаштувань складних структур керування зі значною кількістю параметрів.

Результати оптимізації GWO порівнювались із результатами методу Хука-Дживса. Для об'єктивності порівняння максимальна кількість ітерацій була встановлена 30. Загальний час виконання операцій алгоритму GWO для пошуку мінімуму інтегрального модульного та інтегрального квадратичного критеріїв якості дещо більший ніж у алгоритму Хука-Дживса. Це пояснюється високою обчислювальною складністю та кількістю пошукових агентів алгоритму, який зазвичай використовується для оптимізації більш складних систем.

Отже, результати мінімізації інтегральних критеріїв якості перехідних процесів каскадної АСУ наступні: інтегральний модульний критерій (IAE) для методу GWO становить 16,47, для методу Хука-Дживса – 55,31; інтегральний квадратичний критерій (ISE) для методу GWO становить 12,84, для методу Хука-Дживса – 18,81, час регулювання системи для методу GWO становить 92с, для методу Хука-Дживса – 220с. Із результатів видно, що метод GWO виконав оптимізацію краще. Так, можна зробити висновок, що алгоритм Grey Wolf Optimizer може використовуватись для складних задач оптимального налаштування автоматичних регуляторів в системах керування складної структури.

Список літератури

1. Федотов, А. Е. Чистые помещения. Проблемы, теория, практика / А. Е. Федотов. - М.: Асинком, 2003. - 576 с.
2. Вдовин, М. Л. Математичне програмування: теорія та практикум : навч. посібн. / М. Л. Вдовин, Л. Г. Данилюк. – Львів : “Новий Світ-2000”, 2015. - 160с.
3. Джонс, М. Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / М. Т. Джонс. — М.: ДМК Пресс, 2004. - 312 с.
4. Жалдак, М. Л. Основы теории і методів оптимізації / М. Л. Жалдак, Ю. В. Триус. - Черкаси: Брама-Україна, 2005. - 608 с.
5. Konstantinov, S. V. Comparative analysis of evolutionary algorithms for the problem of parametric optimization of PID controllers / S. V. Konstantinov, A. A. Baryshnikov

- // *Procedia Computer Science*. – 2017. – №103. – С. 100-107. – doi:10.1016/j.procs.2017.01.021.
6. **Mirjalili, S.** Grey Wolf Optimizer / **S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis** // *Advances in Engineering Software*. – 2014. – № 69. – С. 46-61. – doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
 7. **El-Fergany, A. A.** Single and multi-objective optimal power flow using grey wolf optimizer and differential evolution algorithms / **A. A. El-Fergany, H. M. Hasanien** // *Electric Power Components and Systems*. – 2015. – № 43. – С. 1548–1559. – doi: 10.1080/15325008.2015.1041625.
 8. **Heidari, A. A.** An efficient modified grey wolf optimizer with Levy flight for optimization tasks / **A. A. Heidari, P. Pahlavani** // *Applied Soft Computing*. – 2017. – №60. – С.115–134. – doi:10.1016/j.asoc.2017.06.044.
 9. **Muro, C.** Wolf-pack hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations / **C. Muro, R. Escobedo, L. Spector, R. Coppinger** // *Behavioural Processes*. – 2011. – №88(3). – С. 188-192. doi: 10.1016/j.beproc.2011.09.006.
 10. **Бондарь, Е. С.** Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / **Е. С. Бондарь, А. С. Гордиенко, В. А. Михайлов, Г. В. Нимич**. - Киев: Аванпост-Прим, 2005. — 560 с.
 11. **Becchio, C.** Toward NZEB by optimizing HVAC system configuration in different climates / **C. Becchio, S. P. Corgnati, M. Vio, G. Crespi, L. Prendin, M. Ranieri, D. Vidotto** // *Energy Procedia*. – 2017. – № 140. – С.115-126. – doi:10.1016/j.egypro.2017.11.128.
 12. **Тимченко, О.** Методи налаштування регуляторів / **О. Тимченко, Я. Меденець, О. Стрепко** // *Українська академія друкарства*. - 2013. - С. 54-59.
 13. **Mirjalili, S.** How effective is the Grey Wolf optimizer in training multi-layer perceptrons / **S. Mirjalili** // *Applied Intelligence*. – 2015. – №43(1). – С. 150–161. – doi:10.1007/s10489-014-0645-7.
 14. **El-Gaafary, A. A. M.** Grey Wolf Optimization for Multi Input Multi Output System / **A. A. M. El-Gaafary, Y. S. Mohamed, A. M. Hemeida, A. A. Mohamed** // *Universal Journal of Communications and Network*. – 2015. – №3(1). – С. 1-6. – doi:10.13189/ujcn.2015.030101.
 15. **Mirjalili, S.** Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization / **S. Mirjalili, S. Saremi, S. M. Mirjalili, L. dos S. Coelho** // *Expert Systems with Applications*. – 2016. – №47. – С. 106–119. – doi:10.1016/j.eswa.2015.10.039.
 - L'viv: “Novij Svit-2000”, 2015, 2, 160.
 3. **Dzhons, M. T.** Программирование искусственного интеллекта в приложениях. М.: DMK Press, 2004, 312.
 4. **Zhaldak, M. L., Trius, Y. V.** Fundamentals of theory and methods of optimization: Textbook. Cherkasy: Brama-Ukraine, 2005, 608.
 5. **Konstantinov, S. V., Baryshnikov, A. A.** Comparative analysis of evolutionary algorithms for the problem of parametric optimization of PID controllers. *Procedia Computer Science*, 2017, **103**, 100-107, doi:10.1016/j.procs.2017.01.021.
 6. **Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., Lewis A.** "Grey Wolf Optimizer". *Advances in Engineering Software*, 2014, 69, 46-61, doi:10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
 7. **El-Fergany, A. A., Hasanien, H. M.** Single and multi-objective optimal power flow using grey wolf optimizer and differential evolution algorithms. *Elec. Power Compon. Syst.*, 2015, 43, 1548–1559, doi:10.1080/15325008.2015.1041625.
 8. **Heidari, A. A., Pahlavani, P.** An efficient modified grey wolf optimizer with Levy flight for optimization tasks, *Appl. Soft Comput.*, 2017, 60, 115–134, doi:10.1016/j.asoc.2017.06.044.
 9. **Muro, C., Escobedo, R., Spector, L., Coppinger, R.** Wolf-pack hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations. *Behavioural Processes*, 2011, 88(3), 188-192, doi:10.1016/j.beproc.2011.09.006.
 10. **Bondar, Y. S., Gordienko, O. S., Mikhailov, V. A., Nymich, G. V.** Automation of ventilation and air conditioning systems. Kiev: Avanpost-Prim, 2005, 561.
 11. **Becchio, C., Corgnati, S. P., Vio, M., Crespi, G., Prendin, L., Ranieri, M., Vidotto, D.** Toward NZEB by optimizing HVAC system configuration in different climates. *Energy Procedia*, 2017, 140, 115-126, doi:10.1016/j.egypro.2017.11.128.
 12. **Timchenko, O., Medenets, Y., Strepkov, O.** Methods of adjusting regulators. *Ukrainska akademiia drukarstva*, 2013, 54-59.
 13. **Mirjalili, S.** How effective is the Grey Wolf optimizer in training multi-layer perceptrons. *Applied Intelligence*, 2015, 43(1), 150–161, doi:10.1007/s10489-014-0645-7.
 14. **El-Gaafary, A. A. M., Mohamed, Y. S., Hemeida, A. M., Mohamed, A. A.** Grey Wolf Optimization for Multi Input Multi Output System. *Universal Journal of Communications and Network*, 2015, 3(1), 1-6, doi:10.13189/ujcn.2015.030101.
 15. **Mirjalili, S., Saremi, S., Mirjalili, S. M., Coelho, L. S.** Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Systems with Applications*, 2016, 47, 106–119, doi:10.1016/j.eswa.2015.10.039.

Bibliography (transliterated)

1. **Fedotov, A. E.** CHistye pomeshcheniya. Problemy, teoriya, praktika. M.: Asinkom, 2003, 1, 576.
2. **Vdovin, M. L., Danilyuk, L. G.** Matematichne programuvannya: teoriya ta praktikum: navch. posibn.

Відомості про авторів (About authors)

Піргач Юлія Сергіївна – магістрант, кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів; Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; email: julia.pohonets@gmail.com.

Yuliia Pirhach – Master, Department of Automation of heat-and-power engineering processes, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: julia.pohonets@gmail.com.

Степанець Олександр Васильович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів; м. Київ, Україна; email: stepanets.av@gmail.com.

Oleksandr Stepanets - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Department of Automation of heat-and-power engineering processes, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; e-mail: stepanets.av@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Піргач, Ю. С. Метод оптимізації "Grey Wolf" в задачах автоматизації систем вентиляції чистих приміщень / **Ю. С. Піргач, О. В. Степанець** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 37-44. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.30.

Please cite this article as:

Pirhach, Y., Stepanets, O. Gray Wolf optimization method for automatic ventilation systems of clean accessories. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **26** (1302), 2, 37-44, doi:10.20998/2413-4295.2018.12.30.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Пиргач, Ю. С. Метод оптимизации "Grey Wolf" в задачах автоматизации систем вентиляции чистых помещений / **Ю. С. Пиргач, А. В. Степанец** // Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 26 (1302). – Т. 2. – С. 37-44. – doi:10.20998/2413-4295.2018.26.30.

АННОТАЦИЯ В работе рассматривается возможность оптимизации систем автоматического регулирования технологических параметров непрерывных процессов. Проведен обзор современных поисковых алгоритмов оптимизации, подобных работе биологических и физических объектов и структур. Рассмотрены особенности чистых помещений как объектов управления, указаны основные причины нестационарности динамических характеристик, которые приводят к необходимости коррекции параметров настроек регуляторов. Исследован метод оптимизации «Grey wolf» в применении к системе автоматического регулирования технологических параметров вентиляции чистых помещений. Проведено сравнение процесса и результатов оптимизации Grey Wolf Optimizer с методом оптимизации Хука—Дживса. Показаны особенности и преимущества применения метода для настройки каскадной структуры системы автоматического управления с двумя ПОД-регуляторами на заданные показатели качества.

Ключевые слова: оптимизация систем автоматического регулирования; Grey Wolf Optimizer; настройка ПОД-регуляторов

Поступила (received) 02.07.2018