



УДК 681.536:66.097

# АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ З ВИСОКИМ ВИДІЛЕННЯМ ТЕПЛОТИ В КАТАЛІТИЧНОМУ РЕАКТОРІ

Філярський В.І.<sup>1</sup>, Гурський О.О.<sup>2</sup>, Воїнова С.О.<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup> Одеській національний технологічний університет, Одеса, УкраїнаORCID: <sup>1</sup> <http://orcid.org/0009-0000-3230-7814>, <sup>2</sup> <http://orcid.org/0000-0001-5158-2125>,<sup>3</sup> <http://orcid.org/0000-0003-0203-0599>E-mail: <sup>1</sup> [filyarsky@gmail.com](mailto:filyarsky@gmail.com), <sup>2</sup> [Gurskiya2017@gmail.com](mailto:Gurskiya2017@gmail.com), <sup>3</sup> [voinova\\_s@yahoo.com](mailto:voinova_s@yahoo.com)

Copyright © 2021 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v15i4.2719>

**Анотація.** Автоматизація процесів з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі є важливою задачею в хімічній промисловості. Ця задача стає все більш актуальною в умовах сучасного розвитку промисловості. Автоматизація процесу в каталітичному реакторі дозволяє забезпечити точний контроль над процесом і значно збільшити ефективність його роботи. Важливим елементом автоматизації каталітичних реакторів є автоматичне регулювання температури газу на виході з реактора. Ця система забезпечує збалансований рівень теплоти в реакторі шляхом автоматичної підтримки витрати, тиску і температури реагентів. Іншим елементом схеми автоматизації реактора є система автоматичного захисту від перевантаження шляхом автоматичного вимикання елементів, що припиняють подачу реагентів. Крім того, сучасні каталітичні реактори можуть мати вбудовані системи дистанційного моніторингу та діагностики стану реактора, що дозволяє вчасно реагувати на можливі неполадки та уникнути аварій. Каталітичний реактор описується нелінійними моделями, тому актуальним для нього є використання при побудові систем автоматичного керування (САК) інтелектуальних алгоритмів керування з використанням нечітких регуляторів та нейрорегуляторів. Порівняльний аналіз класичної САК та систем з нечітким регулятором та нейрорегулятором показав переваги застосування останніх перед класичною для керування об'єктами з нелінійними характеристиками. Для технічних систем з випадковим характером збурень, високим порядком їх динамічних моделей та з нелінійними характеристиками існує проблема керування в умовах невизначеності. Використання нечітких регуляторів та нейрорегуляторів забезпечує грубість і стабільну збіжність перехідних процесів у системі, тому такий підхід слід вважати доцільним.

**Abstract.** Automation of processes with high heat release in a catalytic reactor is an important task in the chemical industry. This task is becoming more and more relevant in the conditions of modern industrial development. Automation of the process in the catalytic reactor allows you to ensure precise control over the process and significantly increase the efficiency of its operation. An important element of the automation of catalytic reactors is the automatic regulation of the gas temperature at the outlet of the reactor. This system ensures a balanced level of heat in the reactor by automatically maintaining the flow rate, pressure and temperature of the reagents. Another element of the reactor automation scheme is a system of automatic protection against overload by automatically turning off elements that stop the supply of reagents. In addition, modern catalytic reactors can have built-in systems for remote monitoring and diagnostics of the reactor condition, which allows timely response to possible problems and avoid accidents. The catalytic reactor is described by nonlinear models; therefore, it is relevant to use intelligent control algorithms using fuzzy controllers and neuroregulators in the construction of automatic control systems (ACS).

A comparative analysis of the classic ACS and systems with a fuzzy controller and a neuron controller showed the advantages of using the latter over the classic one for controlling objects with nonlinear characteristics. For technical systems with a random nature of disturbances, a high order of their dynamic models, and with nonlinear characteristics, there is a problem of control under conditions of uncertainty. The use of fuzzy and neuroregulators ensures roughness and stable convergence of transient processes in the system, so this approach should be considered appropriate.

**Keywords:** catalytic reactor, automatic control, intelligent control systems, fuzzy controller, neuroregulator.

**Ключові слова:** каталітичний реактор, автоматичне керування, інтелектуальні системи керування, нечіткий регулятор, нейрорегулятор.



## Вступ

Сучасний етап розвитку світового виробництва характеризується наявністю окремих галузей, в яких використовують високо очищені продукти, зокрема гази високої чистоти.

Інертними газами високої чистоти заповнюють джерела світла при виробництві швидко вдосконалюваної мікропроцесорної техніки. Також висока чистота інертних газів, які заповнюють детекторні прилади, є вимогою при проведенні експериментальних наукових досліджень в сфері фундаментальної фізики, зокрема при проведенні ядерних досліджень. Вимога високої чистоти продукту є характерною також для діагностичного медичного обладнання, зокрема для магнітно-резонансних томографів. Ще вимога високої чистоти продукту висувається у військово-промисловому комплексі при виготовленні зброї та в деяких інших галузях.

Високоякісна очистка інертних газів здійснюється в очисному комплексі, в якому передбачено попередню підготовку продукту в реакторі для видалення зайвих сполук, адсорбцію та ректифікацію.

Для здійснення першого етапу очистки, який є найбільш відповідальним серед інших, використовують каталітичні реактори.

З метою забезпечення високої ефективності функціонування каталітичного реактора в ньому застосовують каталізатори, які мають високу активність та стійкість до високих температур. Їх використання дозволяє знизити кількість енергії, необхідної для здійснення реакції, і забезпечити високу якість продукту.

Каталітичні реактори є важливими компонентами в хімічній та нафтопереробній промисловості, де вони використовуються для прискорення хімічних реакцій та підвищення виходу продукту. При функціонуванні таких реакторів здійснюється активне виділення теплоти. За певних умов збільшення виділення теплоти може призвести до перегріву реактора і, в кінцевому рахунку, до зниження ефективності процесу. Тому технологічним процесом підтримки температурного режиму в каталітичному реакторі необхідно керувати. Причому лише автоматичне керування забезпечить високоточне додержання технологічного регламенту. Тому автоматизація процесів з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі є актуальною.

## Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Чимало дослідників присвятили свої роботи питанню автоматизації технологічного процесу в каталітичних реакторах. Так Борин В. С., Головач І. Р., Ікалюк А. А. запропонували автоматизовану систему керування технологічним процесом піролізу етилену, програму керування, яка включає математичне моделювання процесу запуску печі при змінних технологічних параметрах [1]. Барранко Х. П., Сельма К. Г. розробили автоматичний реактор для вивчення каталітичної активності рідких реагентів, який містить регулятор масової витрати для подачі потоку газів в реактор [2]. Левчук І. Л., Тришкін В. Я., Ковбик А. А. запропонували спосіб керування процесом каталітичного риформінгу шляхом регулювання температури газосировинної суміші на входах у реактори зміною подачі палива в нагрівачі, в залежності від зміни концентрації ароматичних вуглеводнів у парогазовій суміші на виході реакторів, складу та витрати вихідної сировини і водневмісного газу [3]. Пул Д. В. розробив систему керування реактором, яка містить регулювання температури потоку живлення, що вводиться в перший шар каталізатора в реакторі та регулювання температури в другому шарі каталізатора введенням потоку живлення в нього для охолодження потоку, що витікає з першого шару каталізатора [4]. Карр Н, Крамер С, Штальфельд Д запропонували спосіб і пристрій для керування складними хімічними процесами, що включає контроль та регулювання вихідної змінної реакції хімічного процесу в режимі реального часу з використанням динамічного моделювання [5]. Крупник Л. И, Павлова Н. П., Федорченко А. Н. розробили газофазний каталітичний реактор, який забезпечує високу продуктивність процесу каталізу шляхом інтенсифікації перенесення теплоти реакції [6]. Степанов А. В. запропонував трубчастий каталітичний реактор, який забезпечує високу ефективність каталітичних процесів, шляхом формування регулярного шару каталізатора [7]. Зарді У., Пагані Д. розробили спосіб проведення екзотермічного гетерогенного синтезу та реактор для його здійснення, який з метою збільшення продуктивності реактора передбачає перерозподілення сировинно-енергетичних потоків в ньому [8]. Хейгвейш Д. П., Брайн П. Ф., Трамбол С. С. запропонували спосіб каталітичного риформінгу вуглеводню та реакторну систему для нього, що забезпечує стійкість до накопичення вуглеводню частини реакторної системи шляхом модифікації стадій каталізу [9]. Мілбергер Е. С. розробив автоматичну установку каталітичного скринінгу, яка забезпечує аналіз продукту в кожній камері реактора [10]. Однак всі розглянуті рішення характеризуються спільним недоліком, а саме низькою якістю готового продукту, що має неприпустиму концентрацію домішок, які не прореагували в реакторі внаслідок низької точності стабілізації температури в ньому.

В одеському національному технологічному університеті, на кафедрі автоматизації технологічних процесів та робото-технічних систем в рамках науково-дослідної роботи магістра започатковано створення ефективної системи автоматичного керування (САК) технологічним процесом в каталітичному реакторі з високим виділенням теплоти.

## Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності керування процесом в каталітичному реакторі з високим виділенням теплоти шляхом пошуку та впровадження оптимальних режимів роботи реактора.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- конкретизація задачі дотримання регламентів керування технологічним процесом, розробка і реалізація комплексу його моделей як об'єкта керування (ОК) в імітаційному середовищі Matlab;
- параметрична ідентифікація моделей ОК;



- удосконалення алгоритмів, що реалізують функції регулювання САУ на основі застосування апарату нечіткої логіки та нейронних мереж;
- розробка і параметричний синтез традиційної САУ, оптимізація алгоритмів регулювання, САУ нечіткої логіки, САУ на базі нейронної мережі та їх порівняльний аналіз.

#### Методи і матеріали досліджень

При проведенні теоретичних досліджень основним використаним методом був метод системного аналізу. Основним експериментальним методом було обрано імітаційне моделювання. Для ідентифікації моделей було використано методи активного та пасивного експерименту, та типові інженерні методики ідентифікації моделей ОК. При синтезі САУ було використано методи теорії автоматичного керування, а саме інженерні методики параметричного синтезу САУ, оптимальний параметричний синтез, методи нечітких множин та нейронних мереж.

Однією з основних проблем при автоматичному керуванні технологічними процесами є нелінійність контурів регулювання. В таких випадках зазвичай використовують такі методи як лінійна апроксимація або кусочно-лінійна апроксимація, за яких не завжди отримують бажаний результат. Інший варіант САК, який забезпечує більшу ефективність, це системи керування з нечіткою логікою («fuzzy logic»).

Найбільш вигідне, в порівнянні з традиційними САК, використання нечіткого керування за умов невизначеності інформації про динамічну поведінку ОК. Нечіткі регулятори - більш грубі, оскільки цей підхід забезпечує можливість формування числа правил керування, в залежності від комбінації значень вхідних змінних регулятора і, отже, від зміни режиму роботи, рівня збурень.

Нечіткі регулятори забезпечують грубість і стабільну збіжність процесів в умовах невизначеності, що виникає через ряд факторів таких як: збурюючі випадкові впливи, складність розробки динамічної моделі, її високий порядок та нелінійний характер.

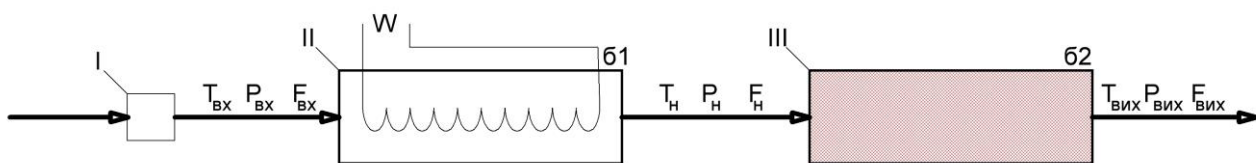
Істотні невизначеності у статичних і динамічних характеристиках процесу з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі як ОК представляють труднощі в формалізації завдань синтезу регуляторів системи керування. У зв'язку з цим є актуальним застосування регуляторів, заснованих на нечіткій логіці.

Наявність в сучасних системах програмування контролерів вбудованих бібліотек нечіткого керування, що мають добрий графічний інтерфейс, у якому дуже легко і наочно представляється і коректується вид функцій приналежності і нечіткого висновку, що дуже спрощують налаштування системи автоматичного регулювання, є перевагою нечіткого регулювання.

#### Результати досліджень

Першим етапом дослідження був аналіз технологічного процесу в каталітичному реакторі (рис. 1). Газ через регулятор витрат газу I надходить з витратами  $10 \text{ м}^3/\text{год}$  в електричний нагрівач II потужністю  $1000 \text{ W}$ , де попередньо підігрівається і одразу надходить до каталітичного реактора III. Проходячи через каталітичний реактор, газ вступає в хімічну реакцію з каталізатором з виділенням теплоти. Потужність електричного нагрівача впливає на температуру газу на виході реактора. При температурі газу на виході реактора  $T_{\text{вих}} = 500 \pm 10^\circ \text{C}$  всі зайві вуглеводні згорають, і газ стає готовим до подальшої обробки та використання.

Було побудовано параметризовану схему технологічного процесу в каталітичному реакторі (рис. 1). На її підставі було складено параметричну схему (рис. 2) та концептуальну модель ОК (рис. 3). Проведено ідентифікацію моделей динаміки та статички ОК, розроблено повну модель ОК.

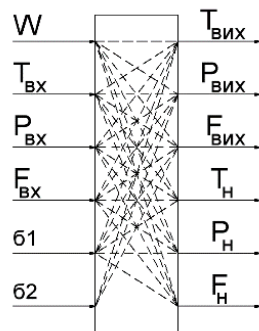


I – регулятор витрат газу  
 II – електричний нагрівач  
 III – каталізатор  
 W – потужність електричного нагрівача  
 61 – конструкційні особливості електричного нагрівача

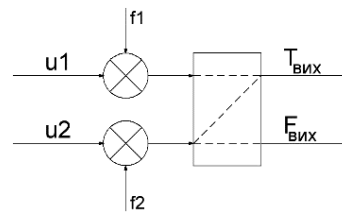
62 – конструкційні особливості каталізатора  
 $T_{\text{вх}}$  – температура вхідного газу  
 $P_{\text{вх}}$  – тиск вхідного газу  
 $F_{\text{вх}}$  – витрати вхідного газу  
 $T_{\text{н}}$  – температура нагрітого газу

$P_{\text{н}}$  – тиск нагрітого газу  
 $F_{\text{н}}$  – витрати нагрітого газу  
 $T_{\text{вих}}$  – температура газу на виході реактора  
 $P_{\text{вих}}$  – тиск газу на виході  
 $F_{\text{вих}}$  – витрати газу на виході

Рис. 1. - Параметризована технологічна схема процесу в каталітичному реакторі  
 Fig. 1. - Parameterized technological scheme of the process in the catalytic reactor



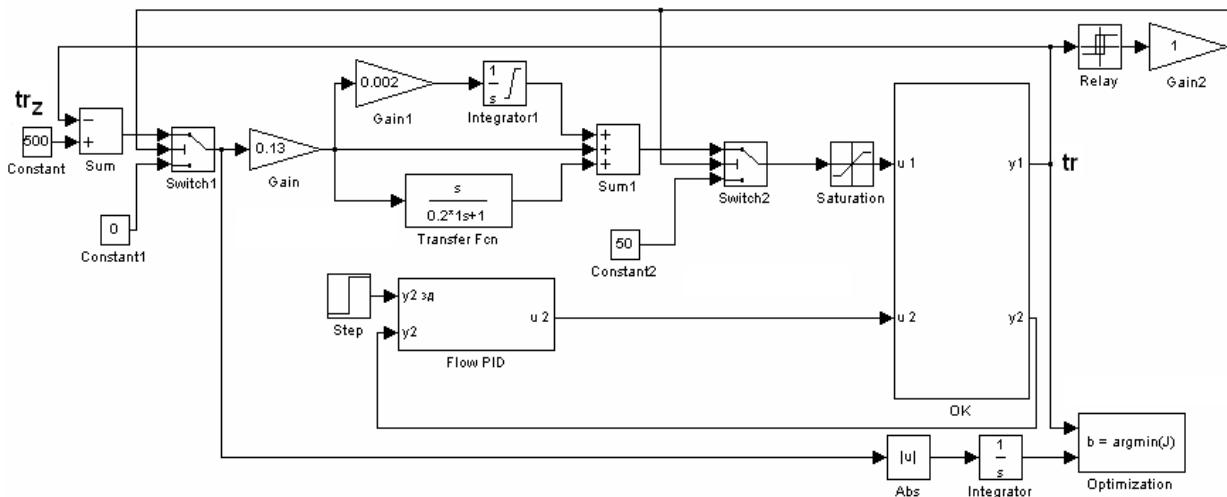
**Рис. 2. - Параметрична схема ОК**  
**Fig. 2. - Parametric diagram OK**



u1 – потужність електричного нагрівача  
u2 – % х.р.о. подачі газу у каталізатор  
**Рис. 3. - Концептуальна модель ОК**  
**Fig. 3. - Conceptual model of OK**

Наступним етапом був параметричний синтез САУ з традиційним – лінійним ПІД регулятором для ОК з нелінійною статичною характеристикою за каналом регулювання «u<sub>1</sub> – T<sub>вих</sub>». Настроювальні параметри регуляторів були визначені на основі параметрів лінійної моделі ОК.

Для параметричної оптимізації регуляторів системи керування в програмному середовищі Matlab/Simulink 5.2 у відповідності з рис. 4 була розроблена схема моделювання системи керування з автоматичним оптимізатором, що забезпечує пошук оптимальних параметрів регуляторів за наступним компромісним критерієм якості роботи системи:  $J = \int_0^{\infty} (|e_1(t)| + \beta \cdot |e_2(t)|) dt \rightarrow \min$ , де  $e_1(t)$  – різниця між фактичним і заданим значеннями тиску в ресивері;  $e_2(t)$  – різниця між фактичним і заданим значенням температури повітря в сушильній камері;  $\beta$  – ваговий коефіцієнт.



**Рис. 4. – Структурна схема моделі САК з традиційним ПІД-регулятором**  
**Fig. 4. – Structural diagram of the SAC model with a traditional PID regulator**

У результаті параметричної оптимізації за обраним інтегральним показником якості роботи системи та за допомогою відповідного модуля – додатка MATLAB/Simulink 5.2 були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації і відповідні настроювальні параметри регуляторів. Якість регулювання температури покращилася після оптимізації САК. Однак при нелінійній характеристиці каналу регулювання такі покращення можливі лише при певних режимах роботи чи початкових умовах системи керування. Таким чином, оптимальні параметри настроювання в даному випадку можуть бути неоптимальними в іншому випадку, що визначає необхідність застосування нелінійних регуляторів.

З урахуванням особливостей процесу з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі, як у нелінійному ОК, доцільно застосувати в контурі регулювання температури газу на виході з реактору нечіткий регулятор (НР). Застосування НР (Fuzzy – регулятора) обумовлено складністю опису його статичних режимів роботи.

Складність опису статичних режимів роботи процесу з високим виділенням теплоти в каталітичному реакторі приводить до того, що режими функціонування можуть бути описані з недостатньою точністю, пов'язаною з нечіткими (розмитими) різними експериментальними даними. Таким чином, у роботі була реалізована модель САК із Fuzzy – регулятором.

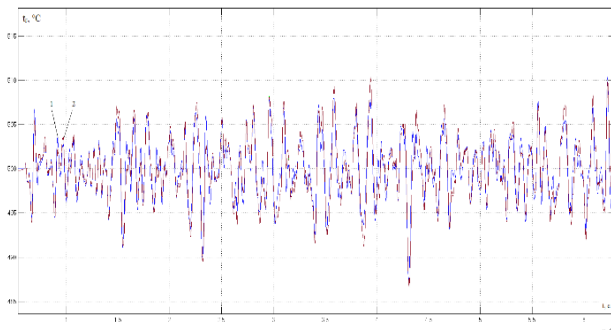
Розроблений НР є об'єднанням трьох блоків фазікування: фазікації, логічного висновку і дефазікації. Щодо структури дана схема регулятора нічим не відрізняється від схем класичних НР і будується за класичними



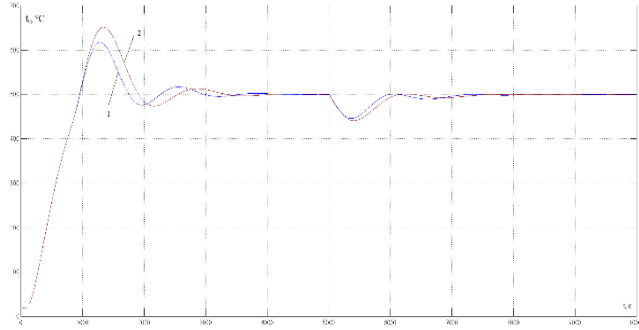
зразками.

Було складено п'ять правил функціонування регулятора та таблицю баз знань для НР температури на виході реактора.

У результаті моделювання САУ з НР були отримані графіки перехідних процесів виходу системи на номінальний режим функціонування (рис. 5) і також перехідні процеси при детермінованому і випадковому збурюючому впливі (рис. 6), що був введений на 200 секунд. Для порівняльного аналізу також були представлені відповідні графіки перехідних процесів у САУ з традиційним ПІД-регулятором.



**Рис. 5 - Графіки моделювання перехідних процесів в САК при виході на номінальний режим:**  
**1 – САК з традиційним ПІД-регулятором;**  
**Fig. 5 - Graphs of simulation of transient processes in SAC when entering the nominal mode:**  
**1 – SAC with a traditional PID regulator;**



**Рис. 6 - Графіки моделювання перехідних процесів в САК при випадкових збурюючих впливах:**  
**2 – САК з НР Сугено 0-порядку**  
**Fig. 6 - Graphs of simulation of transient processes in SAC with random disturbing influences:**  
**2 – SAC with 0-order Sugeno NP**

#### Обговорення результатів

З рисунків можна побачити, що за якістю регулювання різні САК функціонують ідентично – як з традиційним, так і з НР. Графіки перехідних процесів різні САК зливаються в один. Це отримано завдяки корегуванню параметрів НР.

Для нелінійних ОК можна використовувати неймережеві алгоритми керування.

Штучні нейронні мережі (ШНМ) застосовуються в областях, де людський інтелект малоефективний, а традиційні обчислення трудомісткі або фізично неадекватні. Застосування ШНМ актуалізується з необхідністю розв'язку погано формалізованих задач. Основні області застосування ШНМ: автоматизація процесів класифікації, прогнозування, розпізнавання, прийняття рішень, керування, кодування і декодування інформації та ін.

ШНМ як нейрорегулятор здійснює нелінійне перетворення вхідного сигналу і формування керуючого впливу. Великою перевагою цього регулятора є те що він може мати достатню кількість оптимізованих параметрів (коефіцієнтів міжнейронних зв'язків), що дає можливість використовувати його для різних ОК з нелінійними статичними характеристиками. У даній роботі нейронна мережа – це математична модель з параметрами, що оптимізуються, яка буде виконувати функції розробленого раніше НР.

Нейрорегулятор у нашому випадку – це ШНМ, що характеризується нелінійними характеристиками. Завдяки цьому застосування нейрорегулятора на базі ШНМ дозволяє досягти більш високих результатів в керуванні. Нейронна мережа – це послідовність нейронів (нейронелементів), з'єднаних між собою синапсами. Структура нейронної мережі прийшла в світ програмування з біології. Найбільш поширена структура – багатошарова, що застосовується в якості регуляторів неймережевих алгоритмів керування.

У зв'язку з тим, що приріст керуючої дії нейрорегулятора може приймати як позитивне значення, так і негативне, при його синтезі необхідно вибрати функції активації нейронів, які приймають значення від -1 до 1. В нашому випадку використано гіперболічну тангенціальну функцію (tansig), яка дозволяє отримати на виході значення різних знаків (наприклад, від -1 до 1).

У командному вікні Command Window середовища Matlab були прописані команди для створення і навчання штучної нейронної мережі, що повинна виконувати функції нейрорегулятора. Вектори вхідних  $P$  і вихідних  $t$  значень нейрорегулятора були отримані на основі характеристик НР, що був синтезований у відповідному фіс-редакторі середовища Matlab (рис. 7). Для визначення векторів  $P$  і  $t$  були визначені відповідні значення відхилень між заданими та фактичними значеннями температур  $\Delta t$  і відповідні значення приростів керуючих впливів у САУ з НР.



```

» P=[-1000 -750 -500 -200 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 200 500 750 1000];
» t=[-0.1 -0.075 -0.05 -0.02 -0.0025 -0.002 -0.0015 -0.001 -0.0005 0 0.0005 0.001 0.0015 0.002 0.0025 0.02 0.05 0.075 0.1];
» net=newff([-1000 1000], [2 1], {'tansig' 'tansig'});
» net.trainParam.epochs=300;
» net=train(net, P, t);
TRAINLM, Epoch 0/300, MSE 0.596177/0, Gradient 259.49/1e-010
TRAINLM, Epoch 25/300, MSE 4.51954e-005/0, Gradient 0.0758553/1e-010
TRAINLM, Epoch 50/300, MSE 5.82849e-006/0, Gradient 0.011765/1e-010
TRAINLM, Epoch 75/300, MSE 2.34042e-006/0, Gradient 0.00663727/1e-010
TRAINLM, Epoch 100/300, MSE 1.39982e-006/0, Gradient 0.00385997/1e-010
TRAINLM, Epoch 125/300, MSE 9.91536e-007/0, Gradient 0.0024712/1e-010
TRAINLM, Epoch 150/300, MSE 7.67967e-007/0, Gradient 0.0017099/1e-010
TRAINLM, Epoch 175/300, MSE 6.27883e-007/0, Gradient 0.00125349/1e-010
TRAINLM, Epoch 200/300, MSE 5.32109e-007/0, Gradient 0.000959648/1e-010
TRAINLM, Epoch 225/300, MSE 2.19521e-007/0, Gradient 0.00851435/1e-010
TRAINLM, Epoch 250/300, MSE 1.41392e-007/0, Gradient 0.00361818/1e-010
TRAINLM, Epoch 275/300, MSE 1.05187e-007/0, Gradient 0.00201157/1e-010
TRAINLM, Epoch 300/300, MSE 8.39543e-008/0, Gradient 0.00128573/1e-010
TRAINLM, Maximum epoch reached, performance goal was not met.
» a=sim(net, P)
a =
Columns 1 through 7
-0.0992 -0.0758 -0.0499 -0.0196 -0.0025 -0.0020 -0.0015
Columns 8 through 14
-0.0010 -0.0005 -0.0000 0.0005 0.0010 0.0015 0.0019
Columns 15 through 19
0.0024 0.0198 0.0498 0.0750 0.1004
» gensim(net)
    
```

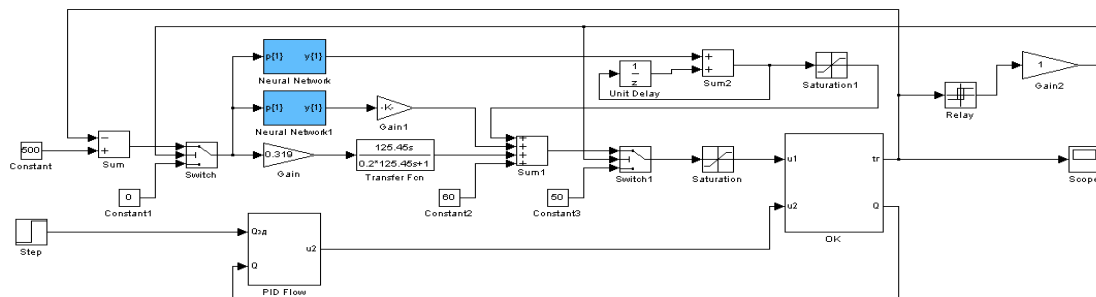
**Рис. 7. – Команди для генерації нейромережі, що відтворює складову нейрорегулятора**  
**Fig. 7. – Commands for generating a neural network that reproduces a component of a neuroregulator**

Сформовані штучні нейрони мережі були визначені у схемі моделювання замість НР, як показано на рис. 8. У такій спосіб була синтезована модель САК з нейрорегулятором засобами середовища Matlab/Simulink.

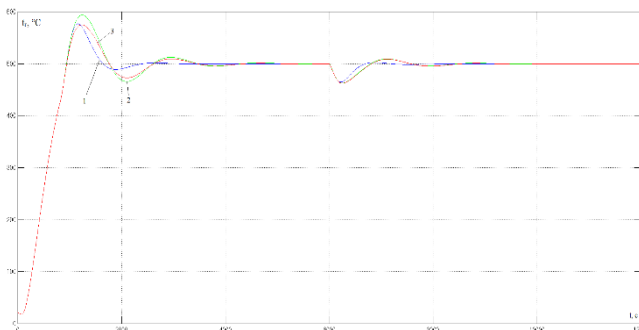
У результаті моделювання САК з нейрорегулятором були отримані графіки перехідних процесів при тих же умовах, які були при моделюванні САК з НР та традиційним ПІД-регулятором (рис. 9, 10).

З графіків бачимо, що за якістю регулювання САК з нейрорегулятором працює гірше, ніж САК з традиційним регулятором. Час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування в складає 2000 секунд для САК з традиційним регулятором, 2500 секунд для САК з нейрорегулятором та НР.

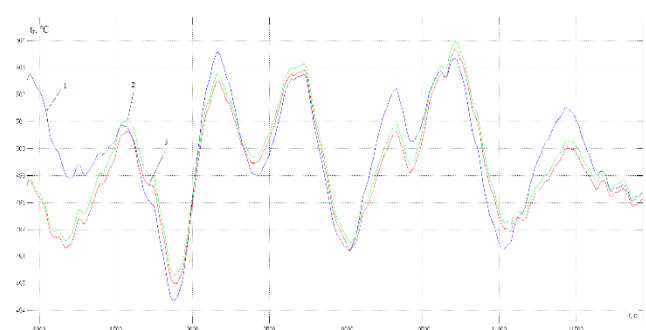
Але при детермінованому збурюючому впливі у САК з нейрорегулятором час регулювання є більшим, ніж в САК з традиційним регулятором. Максимальне динамічне відхилення з нейрорегулятором є більшим, ніж в інших САК. При цьому регулятор, що синтезований на базі штучних нейронних мереж, має вісім ваг міжнейронних з'єднань та шість зміщень, які можна оптимізувати для покращення якості регулювання.



**Рис. 8. – Схема моделювання САК температури в реакторі з нейрорегулятором**  
**Fig. 8. – Schematic of SAC simulation of temperature in a reactor with a neuroregulator**



**Рис. 9. - Графіки моделювання перехідних процесів у САК при виході на номінальний режим: 1 – з традиційним ПІД-регулятором;**  
**Fig. 9. - Graphs of simulation of transient processes in the SAC when entering the nominal mode: 1 – with a traditional PID controller;**

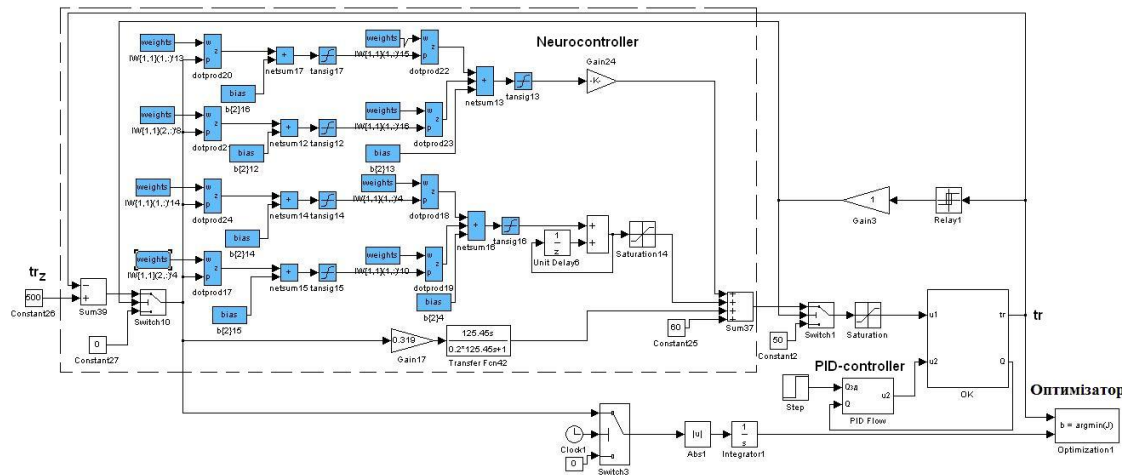


**Рис. 10. - Графіки моделювання перехідних процесів у САК при випадкових збурюючих впливах: 2 – з НР; 3 – з нейронним регулятором**  
**Fig. 10. - Graphs of simulation of transient processes in SAC with random disturbing influences: 2 – with НР; 3 – with a neural regulator**



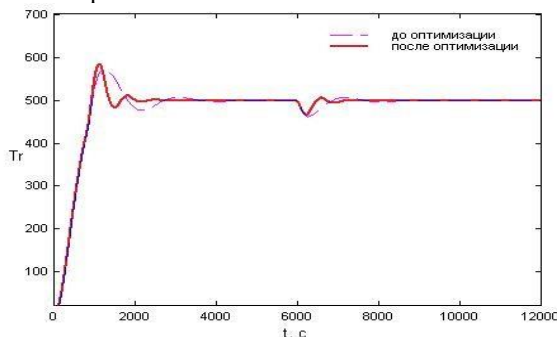
Виходячи з якості регулювання різних САК, необхідно оптимізувати нейрорегулятор за тих же умов, що і попередній традиційний ПД-регулятор для визначення остаточного висновку про доцільність застосування різних САК.

Для покращення якості регулювання проведена параметрична оптимізація САК з нейронним регулятором. Оптимізувались чотири вагових коефіцієнти нейронних з'єднань першого вхідного шару штучної нейронної мережі. Оптимізація нейронного регулятора проводилась за таких же умов і за тим же інтегральним показником якості, які були при оптимізації САК з традиційним ПД регулятором. У програмному середовищі Matlab/Simulink 5.2 побудовано структурну схему моделі САК з нейронним ПД-регулятором і параметричним оптимізатором для визначення оптимальних налаштувань системи керування за умови нелінійності статичної характеристики каналу регулювання, що зображена на рис. 11.



**Рис. 11. – Структурна схема моделі САК з нейронним ПД-регулятором і параметричним оптимізатором**  
**Fig. 11. – Structural diagram of the SAC model with a neural PID controller and a parametric optimizer**

У результаті параметричної оптимізації були отримані графіки перехідних процесів до і після оптимізації, оптимальні визначені ваги міжнейронних з'єднань першого шару нейронної мережі та результат оптимізації, який був отриманий при декількох попередніх процесах оптимізації при визначеному інтегральному критерії якості роботи системи, що зображені на рис. 12.



Ім'я перемінної	Оптимальное значение	Нижний предел	Начальное приближение	Верхний предел	Значение критерия оптимальности:
w1	-0.0010598	-1	-0.00021	1	до - 25877.3363
w2	4.8334e-006	-1	0.00023	1	після - 13469.3087
w3	0.0091777	-1	-0.009	1	Колічество шагов
w4	8.318e-005	-1	0.00005	1	процедуры оптимізації:
					максимальное - 1500
					фактическое - 230

**Рис. 12. – Результати параметричної оптимізації нейронного регулятора САК з нелінійним каналом регулювання**

**Fig. 12. – Results of parametric optimization of the SAC neural regulator with a nonlinear regulation channel**

У результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів різних САК за ви ходом на номінальний режим роботи (рис. 13). Також у результаті моделювання були отримані графіки перехідних процесів при випадкових збурюючих впливах (рис. 14).

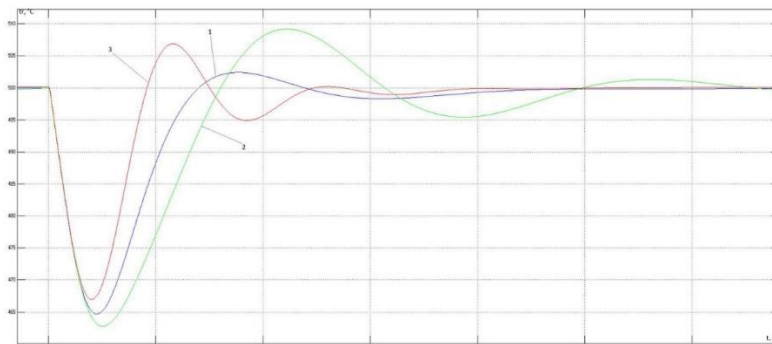
Після параметричної оптимізації система була перевірена на грубість за допомогою програмного середовища Matlab/Simulink для оцінки принципової придатності оптимізованого нейрорегулятора забезпечити стійкість САК при різних параметрах системи, які можуть бути відхилені від визначених на етапі розробки моделі у діапазоні +/- 20 %.

Система не втрачає стійкості при різних параметрах у діапазоні +/- 20 %, які відзначені у тому ж вікні перевірки системи на грубість.

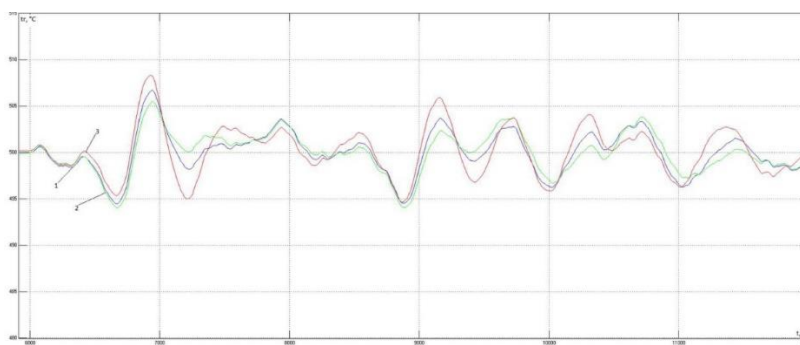
Отже синтезований нейрорегулятор можливо перетворити у відповідний код – програму для визначеного промислового контролеру для практичного за стосування його у відповідній системі керування.



На заключному етапі розробки САК виконаний порівняльний аналіз функціонування різних САК за якістю регулювання.



**Рис. 13. - Графіки перехідних процесів у САК: 1 – з традиційним ПІД-регулятором; 2 – з НР Сугено 0-порядку; 3 – з нейронним регулятором**  
**Fig. 13. - Graphs of transient processes in SAC: 1 – with a traditional PID regulator; 2 – from 0-order Sugeno HP; 3 – with a neural regulator**



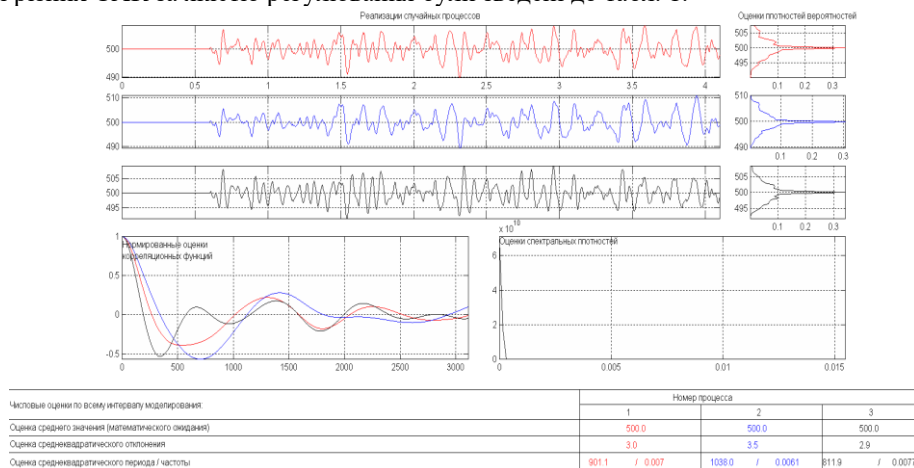
**Рис. 14. - Графіки перехідних процесів при випадкових збуреннях у САК: 1 – з традиційним ПІД-регулятором; 2 – з НР Сугено 0-порядку; 3 – з нейронним регулятором**  
**Fig. 14. - Graphs of transient processes during random disturbances in SAC: 1 – with a traditional PID controller; 2 – from 0-order Sugeno HP; 3 – with a neural regulator**

З графіків перехідних процесів можливо побачити, що час регулювання при виході системи на номінальний режим функціонування менший при САК з традиційним та нейрорегулятором, ніж при САК з НР, але при випадкових збурюючих впливах, різниця в якості регулювання різних САК практично непомітна.

За допомогою аналізатора ймовірнісних характеристик, що вбудований у середовище Matab/Simulink, визначена якість регулювання різних САК при випадкових збурюючих впливах. У даному випадку порівнюються середні квадратичні відхилення значень похибки регулювання САК з традиційним ПІД-регулятором, з НР та САК з нейронним регулятором при випадкових збурюючих впливах.

Результати представлені на рис. 14, у якому зображене вікно результатів аналізу, де показані середні квадратичні відхилення і математичні очікування значень похибки регулювання різних САК.

З рис. 15 можна побачити, що за середньоквадратичним відхиленням САК з традиційним ПІД-регулятором, САК з нейронним регулятором і САК з НР функціонують практично ідентично. В кінцевому випадку показники функціонування різних САК за якістю регулювання були зведені до табл. 1.



**Рис. 15. - Результаты анализа анализатора вероятностных характеристик**  
**Fig. 15. - Results of the analysis of the probabilistic characteristics analyzer**

**Таблиця 1. – Показники якості регулювання різних САК**

Критерій	САК		
	з традиційним ППД регулятором	з нечітким регулятором	з нейрорегулятором
Час регулювання	519	659	389
Максимальне динамічне відхилення	35,32	37,22	33
Інтегральний показник	90110,283	105588,088	89135,716
Середньоквадратичне відхилення	3,0	3,5	2,9

З табл. 1 можливо зробити висновок, що за якістю регулювання САК з нейронним регулятором функціонує краще, ніж САК з традиційним регулятором і ще краще, ніж САК з НР.

#### Висновки

У науковій роботі було вирішено завдання, пов'язане з удосконаленням алгоритмів, що реалізують функції регулювання САК процесом виділенням теплоти в каталітичному реакторі, на основі застосування апарату нечіткої логіки та нейронних мереж. У програмному середовищі Matlab/Simulink 5.2 були розроблені відповідні моделі різних САК та виконані їх порівняльні дослідження. Таким чином, набула подальшого розвитку методика синтезу САК з нейрорегуляторами, на основі середовища Matlab, з використанням характеристик нечітких регуляторів САК процесом виділенням теплоти в каталітичному реакторі

Порівняльний аналіз класичної САК і систем з нечітким регулятором та нейрорегулятором показав переваги застосування останніх перед класичною для керування об'єктами з нелінійними характеристиками. Відповідні дослідження мають практичне значення, оскільки започатковано створення ефективної САК технологічним процесом в каталітичному реакторі з високим виділенням теплоти, яка забезпечує високу якість готового продукту.

#### Список використаних джерел

- [1] Борин В. С., Головач І. Р., Ікалюк А. А. Розробка автоматизованої системи управління технологічним процесом виробництва етилену / Методи та прилади контролю якості, 2022, № 2 (49). - С. 58-65.
- [2] Barranco J. P., Selma C. G. Automatic reactor for catalytic microactivity studies/ Patent US 8460606B2, IPC B01J19/0046, claimed 2005-06-02 №ES200401347, publication 2008-03-13.
- [3] Левчук І. Л., Тришкін В. Я., Ковбик А. А. Спосіб керування процесом каталітичного риформінгу. Патент України №57336 МПК G05D 27/00. Заявл 23 08 2002 №2002086958. Опубл 16 06 2003, Бюл. № 6, 2003 р.
- [4] Joe V. Pool Control system for a reactor/ Patent US 4272823A IPC B01J 8/001, claimed 1979-10-26 №US06/088,716, publication 1981-06-09.
- [5] Carr N., Kramer S., Stahlfeld D. Apparatus for controlling chemical processes/ Patent US 3725653A, IPC G06G7/58, claimed 1968-04-11 № US72064468A, publication 1973-04-03.
- [6] Крупник Л. І., Павлова Н. П., Федорченко А. Н. та ін. Газофазний каталітичний реактор/ Патент України № 11808, МПК: B01J 8/02, заявл 11.07.89 № 4717489/26, опубл. 25.12.1996.
- [7] Степанов А. В. Трубчастий каталітичний реактор/ Патент України №4573, МПК: B01J 8/02, заявл 07.02.91 №4929007/26, опубл. 28.12.94. Бюл № 7-1.
- [8] Зарді У., Пагані Д. Спосіб проведення екзотермічного гетерогенного синтезу та реактор для його здійснення/ Патент України №1854, МПК: B01J 8/04, заявл. 27.06.88 № 2457/80, опубл. 20.12.1994.
- [9] Хейгвейш Д. П., Брайн П. Ф., Трамбол С. Є. Спосіб каталітичного риформінгу вуглеводню та реакторна система для каталітичного риформінгу/ Патент України №51609, МПК: C10G 9/16, C10G 35/00, заявл. 06.03.1992 №93004174, опубл. 16.12.2002.
- [10] Milberger E. C. Automatic catalytic screening unit/ Patent US 4099923A IPC G01N31/10, claimed 1977-01-17 №US05/760,198, publication 1978-07-11.

#### References

- [1] Boryn V. S., Holovach I. R., Ikaljuk A. A. Rozrobka avtomatyzovanoi systemy upravlinnia tekhnolohichnym protsesom vyrobnytstva etylenu/ Metody ta prylady kontroliu yakosti, 2022, № 2 (49). - S. 58-65.
- [2] Barranco J. P., Selma C. G. Automatic reactor for catalytic microactivity studies/ Patent US 8460606B2, IPC B01J19/0046, claimed 2005-06-02 №ES200401347, publication 2008-03-13.
- [3] Levchuk I. L., Tryshkin V. Ya., Kovbyk A. A. Sposib keruvannia protsesom katalitychnoho ryforminhu/ Patent Ukrainy №57336 MPK G05D 27/00, zaiavl. 23 08 2002 №2002086958, opubl. 16 06 2003, Biul. № 6, 2003r.
- [4] Joe V. Pool Control system for a reactor/ Patent US 4272823A IPC B01J 8/001, claimed 1979-10-26 №US06/088,716, publication 1981-06-09.
- [5] Carr N., Kramer S., Stahlfeld D. Apparatus for controlling chemical processes/ Patent US 3725653A, IPC G06G7/58, claimed 1968-04-11 № US72064468A, publication 1973-04-03.



- [6] Krupnyk L. I., Pavlova N. P., Fedorchenko A. N. та ін. Hazofaznyi katalitychnyi reactor/ Patent Ukrainy № 11808, MPK: B01J 8/02, zaiavl 11.07.89 № 4717489/26, opubl. 25.12.1996.
- [7] Stepanov A. V. Trubchastyi katalitychnyi reactor/ Patent Ukrainy №4573, MPK: B01J 8/02, zaiavl 07.02.91 №4929007/26, opubl. 28.12.94. Biul № 7-1.
- [8] Zardi U., Pahani D. Sposib provedennia ekzotermichnoho heterohennoho syntezy ta reaktor dlia yoho zdiisnennia/ Patent Ukrainy №1854, MPK: B01J 8/04, zaiavl. 27.06.88 № 2457/80, opubl. 20.12.1994.
- [9] Kheihveish D. P., Brain P. F., Trambol S. Ye. Sposib katalitychnoho ryforminhu vuhlevodniu ta reaktorna systema dlia katalitychnoho ryforminhu/ Patent Ukrainy №51609, MPK: C10G 9/16, C10G 35/00, zaiavl. 06.03.1992 № 93004174, opubl 16.12.2002.
- [10] Milberger E. C. Automatic catalytic screening unit/ Patent US 409923A IPC G01N31/10, claimed 1977-01-17 №US05/760,198, publication 1978-07-11.

Отримана в редакції 01.11.2023. Прийнята до друку 04.12.2023. Received 01 November 2023. Approved 12 December 2023. Available in Internet 03 January 2024

УДК 004.896

## AUTOMATED NAVIGATION FOR UNMANNED GROUND VEHICLES IN LOGISTICS

<sup>1</sup>Oleksandra Danylova, <sup>2</sup>Olha Horishna, <sup>3</sup>Vitalii Onatskyi, <sup>4</sup>Ivan Burlachenko, <sup>5</sup>Volodymyr Savinov

Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0005-7208-2847>, <sup>2</sup><https://orcid.org/0009-0005-7627-8337>,

<sup>3</sup><https://orcid.org/0009-0007-7207-8375>, <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0001-5088-6709>,

<sup>5</sup><https://orcid.org/0000-0002-0862-5879>

E-mail: <sup>1</sup>[danylova.o@chmnu.edu.ua](mailto:danylova.o@chmnu.edu.ua), <sup>2</sup>[gorishna.o@chmnu.edu.ua](mailto:gorishna.o@chmnu.edu.ua), <sup>3</sup>[vitalii.onatskyi@chmnu.edu.ua](mailto:vitalii.onatskyi@chmnu.edu.ua),

<sup>4</sup>[ivan.burlachenko@chmnu.edu.ua](mailto:ivan.burlachenko@chmnu.edu.ua), <sup>5</sup>[volodymyr.savinov@chmnu.edu.ua](mailto:volodymyr.savinov@chmnu.edu.ua)

Copyright © 2021 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v15i4.2720>

**Abstract.** The use of ground-based courier robots is widespread in the systems that integrate the complex automation of transportation management. Most often, the robot's main problems are finding and avoiding obstacles on the way during cargo transportation. Many computing resources are used to model the route taking into account the features of the terrain during logistic navigation. In research, the choice of gear motors, motor drivers, microcontrollers, and microcomputers was justified to ensure movement. To ensure effective autonomous navigation, the robot must contain ToF, LiDAR, ultrasonic sensors, GPS modules, cameras, an accelerometer, and a magnetometer. The selected combination of the investigated hardware components will allow for accurately determining the location of the vehicle. The article analyses the components of the robot. The principle of operation of drivers and engines is defined. Two models of drivers and two models of engines were considered. A schematic of the device with all connected sensors, a controller, and a microcomputer was developed. The principle of interaction of all system components to ensure autonomous navigation was developed. For the long-term operation of the system with autonomous navigation, the power supply system and the capacity of the necessary battery were calculated. A neural network was created and used for object detection. For neural network calculations, a server-side was created that receives frames from the device's camera and returns data on detected objects to the autonomous vehicle.

**Анотація.** Використання наземних роботів-кур'єрів є дуже розповсюдженим в процесах систем, які забезпечують комплексну автоматизацію управління транспортними перевезеннями. Найчастіше основними проблемами робота є знаходження та оминання перешкод на шляху під час вантажоперевезення. Багато обчислювальних ресурсів займає моделювання маршруту з урахуванням особливостей рельєфу місцевості під час логістичної навігації. Для забезпечення руху було обґрунтовано вибір моторів-редукторів, драйверів двигуна, мікроконтролерів та мікрокомп'ютерів. Для забезпечення ефективної автономної навігації робот повинен містити ToF, LiDAR, ультразвукові датчики, GPS-модулі, камери, акселерометр, магнітометр. Обрана комбінація досліджених апаратних компонентів дозволить точніше визначити місцезнаходження