

УДК 681.3.06

DOI 10.31471/1993-9981-2020-2(45)-102-108

АЛГОРИТМ НАЛАШТУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПІД-РЕГУЛЯТОРА ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

В. М. Гарасимів

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, e-mail: viraharasymiv78@gmail.com

У статті запропоновано алгоритм налаштування пропорційного, інтегрального та диференціального коефіцієнтів ПІД-регулятора із використанням методів нечіткої логіки, яка базується на логічно-лінгвістичних моделях представлення знань та є ефективним засобом створення інтелектуальних систем керування складними динамічними об'єктами промисловості в умовах невизначеності.

Завдяки проведеному порівняльному аналізу використання алгоритму налаштування основних коефіцієнтів з використанням нечіткої логіки для ПІД-регулятора та алгоритму налаштування коефіцієнтів методом спроб та помилок встановлено, що використання нечіткої логіки покращує якість перехідного процесу, а саме зменшує перерегулювання та швидкість збіжності. Також перевагою використання нечіткої логіки є те, що коефіцієнти ПІД-регулятора можуть змінювати свої значення у відповідності зі зміною умов функціонування об'єкта керування, що покращує адаптивні властивості автоматичної системи керування.

Розроблено структуру автоматичної системи керування на базі нечіткого ПІД-регулятора, основними компонентами якої є нечіткий ПІД-регулятор та передавальна функція об'єкта керування. Нечіткий ПІД-регулятор складається з таких основних компонентів: блок фазифікації, бази правил та блоку дефазифікації. Така структура автоматичної системи керування не потребує спеціальних засобів ідентифікації параметрів газотурбінного двигуна та її реалізація за допомогою сучасних мікроконтролерів є досить простою та доступною.

Експериментальна перевірка розробленого алгоритму налаштування коефіцієнтів нечіткого ПІД-регулятора здійснювалась на основі характеристик газотурбінного двигуна ДГ90Л2 потужністю 16МВт газоперекачувального агрегату ГПА-Ц1-16С/76-1.44, який встановлено на КС-3 відцентрового нагнітача природного газу 16 ГЦ2-395/53-76С у Долинському лінійному виробничому управлінні магістральними газопроводами.

Ключові слова: алгоритм; ПІД-регулятор; нечітка логіка; перехідний процес; перерегулювання; швидкість збіжності; об'єкт керування; автоматична система керування; ідентифікація; газотурбінний двигун.

В статье предложен алгоритм настройки пропорционального, интегрального и дифференциального коэффициентов ПИД-регулятора с использованием методов нечеткой логики, основанной на логически-лингвистических моделях представления знаний и является эффективным средством создания интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами промышленности в условиях неопределенности.

Благодаря проведенного сравнительного анализа использования алгоритма настройки основных коэффициентов с использованием нечеткой логики для ПИД-регулятора и алгоритма настройки коэффициентов методом проб и ошибок установлено, что использование нечеткой логики улучшает качество переходного процесса, а именно уменьшает перерегулирование и скорость сходимости. Также преимуществом использования нечеткой логики является то, что коэффициенты ПИД-регулятора могут изменять свои значения в соответствии с изменением условий функционирования объекта управления, улучшает адаптивные свойства автоматической системы управления.

Разработана структура автоматической системы управления на базе нечеткого ПИД-регулятора, основными компонентами которой являются нечеткий ПИД-регулятор и передаточная функция объекта управления. Нечеткий ПИД-регулятор состоит из следующих основных компонентов: блок фазификации, базы правил и блока дефазификации. Такая структура автоматической системы управления не требует специальных средств идентификации параметров газотурбинного двигателя и его реализация с помощью современных микроконтроллеров является довольно простой и доступной.

Экспериментальная проверка разработанного алгоритма настройки коэффициентов нечеткого ПИД-регулятора осуществлялась на основе характеристик газотурбинного двигателя ДГ90Л2 мощностью 16МВт

газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц1-16С/76-1.44, который установлен на КС-3 центробежного нагнетателя природного газа 16 ГЦ2-395/53-76С в Долинском линейном производственном управлении магистральными газопроводами.

Ключевые слова: алгоритм; ПИД-регулятор, нечеткая логика; переходный процесс, перерегулирование, скорость сходимости, объект управления; автоматическая система управления; идентификация; газотурбинный двигатель.

The fuzzy PID tuning algorithm of proportional, integral, and derivative terms based on the fuzzy logic has been developed in the article. The fuzzy logic focuses on logic-linguistic models of representation of knowledges and it is the effective technology for creation of intellectual control systems of complex dynamic objects in the incomplete conditions.

It has been researched that the fuzzy tuning algorithm of the basic coefficients for the PID controller compared with the tuning algorithm based on the trial and error method, improved the quality of the of the transient process, namely reduces the overshoot and the settling time. Another advantage of the fuzzy PID tuning algorithm is that the PID controller coefficients can change their values in accordance with changing conditions of operation control object, which improves the adaptive properties of the automatic control system.

The structure of the automatic control system based on the fuzzy PID controller has been developed, the main components of which are the fuzzy PID controller and the transfer function of the control object. The fuzzy PID controller consists of the following main components: the fuzzyfication unit, the rule base and the defuzzyfication unit. This structure of the automatic control system does not require special means of identifying the parameters of the turboshaft engine and its implementation using modern microcontrollers is quite simple and affordable.

The fuzzy PID tuning algorithm has been tested with using the parameters of the turboshaft engine ДГ90Л2 with power 16MW of the compressor 16 ГЦ2-395/53-76С of Dolyzna linear production administration of gas transmittal pipelines.

Keywords: algorithm, PID controller, fuzzy logic, transient process, overshoot, settling time, control object, automatic control system, identifying, turboshaft engine.

ПІД (пропорційно-інтегрально-диференційний) регулятор являється основним інструментом автоматизації виробництва завдяки простоті проектування, невеликій вартості та високій ефективності використання. Класичний ПІД-регулятор [1] складається із трьох основних коефіцієнтів: пропорційний K_p , інтегральний K_i та диференціальний K_d коефіцієнти, які є основою для ефективного налаштування регулятора:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right), \quad (1)$$

де $u(t)$ - керуючий сигнал;

$e(t)$ - похибка керування між заданим та отриманим виходом;

T_i - стала інтегрування;

T_d - стала диференціювання.

Оскільки класичний ПІД-регулятор являється лінійною коректуючою ланкою, він не може бути ефективним при керуванні об'єктами з істотно вираженою нелінійністю та невідомими параметрами. Тому в останні роки

інтенсивно розвиваються нелінійні модифікації ПІД-регуляторів на базі нейромережових та нечітких технологій.

Аналіз літературних джерел

Для ефективного використання ПІД-регулятор повинен бути коректно налаштованим на динаміку процесу керування. Якщо підібрати стандартні значення коефіцієнтів налаштування регулятора, то отримати бажаний результат складно, часто перехідна характеристика стає нестабільною, а характеристики якості керування незадовільними.

У роботі [2] автором запропонований простий метод спроб і помилок, який полягає в тому, що налаштування коефіцієнтів регулятора виконується під час роботи самого регулятора чи об'єкта керування (ОК). Спочатку значення коефіцієнтів K_i та K_d рівні нулю, а значення коефіцієнта K_p збільшується поки перехідна характеристика не досягне коливальної поведінки. Тоді регулюється значення коефіцієнта K_i для зупинки коливань та коефіцієнта K_d для отримання швидкого

відгуку. В залежності від того, яка поведінка системи з підібраними коефіцієнтами, залишаємо отримані значення коефіцієнтів чи знову повторяємо експеримент. Даний метод є можливим для використання, проте підібрати коефіцієнти такими, щоб отримати оптимальний результат керування є досить складно і у більшості випадків неможливим.

Метод Зіглера-Нікольса є більш поширеним методом налаштування коефіцієнтів регулятора. Слід зауважити, що даний метод не підходить для будь-якого ОК, отримані результати не є самі оптимальні. Проте, даний метод є досить простим і використовується для базового налаштування регулятора для більшості ОК [3].

Основна частина

Як ОК вибираємо газотурбінний двигун ДГ90Л2 потужністю 16МВт газоперекачувального агрегату ГПА-Ц1-16С/76-1.44, який встановлено на КС-3 у Долинському лінійному виробничому управлінні магістральними газопроводами. Характеристики двигуна наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 Характеристики газотурбінного двигуна

Параметр	Одиниці вимірювання	Значення
Максимальна частота обертання n_{max}	об/с	2000
Номинальна частота обертання, n	об/с	1420
Мінімальна частота обертання, n_{min}	об/с	200
Масова витрата палива при номінальній частоті обертання, G_t	кг/с	0,009
Постійна часу двигуна, T_d	с	1,45
Транспортне запізнення, τ	с	0,04
Напруга на електродвигуні насосу, V_n	В	10
Максимальна витрата палива через насос, G_N	кг/с	0,02
Постійна часу насосу, $T_{нд}$	с	0,2

Для синтезу ПД-регулятора запишемо передавальну функцію ОК:

$$W_{OK}(s) = K_{II} \cdot W_{нд}(s) \cdot W_d(s), \quad (2)$$

де K_{II} - коефіцієнт підсилення,

$W_{нд}(s)$ - передавальна функція насоса-дозатора,

$W_d(s)$ - передавальна функція газотурбінного двигуна.

Коефіцієнт підсилення K_{II} визначається за формулою:

$$K_{II} = \frac{V_n}{n_{max}} = \frac{10}{2000} = 0,005. \quad (3)$$

Передавальну функцію насоса-дозатора запишемо у такому вигляді:

$$W_{нд}(s) = \frac{K_{нд}}{T_{нд}s + 1}, \quad (4)$$

$$\text{де } K_{нд} = \frac{G_N}{V_n} = \frac{0,02}{10} = 0,002.$$

Тоді

$$W_{нд}(s) = \frac{0,002}{0,2s + 1}. \quad (5)$$

Передавальну функцію газотурбінного двигуна запишемо у вигляді аперіодичної ланки першого порядку [4-5]:

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1}, \quad (6)$$

$$\text{де } K_d = \frac{n}{G_t} = \frac{1420}{0,009} = 157777.$$

Тоді

$$W_d(s) = \frac{157777}{1,45s + 1}. \quad (7)$$

Підставивши залежності (3), (5) та (7) у формулу (2) отримали передавальну функцію ОК:

$$W_{ок}(s) = 0,005 \cdot \frac{0,002 \cdot 1,5777}{0,2s+1} \cdot \frac{1,5777}{1,45s+1} \approx \frac{1,587}{0,29s^2 + 1,65s + 1} \quad (8)$$

Від значень величин K_p , K_i та K_d або K_p , T_i та T_d залежить форма і вид кривої, що відповідає перехідному процесу. Знаходження алгоритму налаштування регулятора є досить складною процедурою, тому використаємо алгоритм запропонований автором *Zhrn-Yu Zhao* у статті “*Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers*” [6].

Постійну інтегрування визначаємо таким чином:

налаштування ПІД-регулятора визначимо згідно рекомендацій [6]:

$$K_p = (K_{p_{max}} - K_{p_{min}})K'_p + K_{p_{min}} \quad (10)$$

$$K_d = (K_{d_{max}} - K_{d_{min}})K'_d + K_{d_{min}} \quad (11)$$

де $K_{p_{max}}$ та $K_{p_{min}}$ - максимальне та мінімальне значення коефіцієнта K_p ;

$K_{d_{max}}$ та $K_{d_{min}}$ - максимальне та мінімальне значення коефіцієнта K_d .

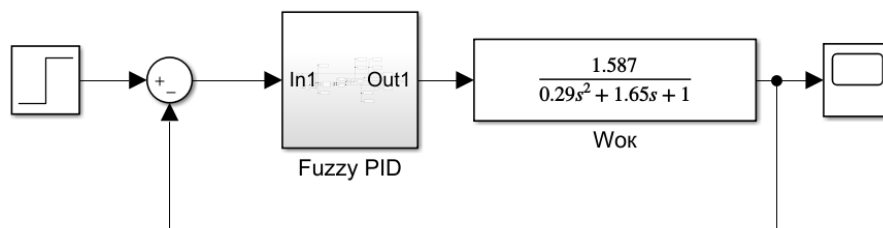


Рисунок 1 – Структура автоматичної системи керування на базі

$$T_i = \alpha T_d, \quad (9)$$

де α - коефіцієнт, отриманий експериментально [7]. Звідси інтегральна складова визначається

таким чином:

$$K_{p_{min}} = 0.32K_u, K_{p_{max}} = 0.6K_u,$$

$$K_{d_{min}} = 0.08K_u T_u, K_{d_{max}} = 0.15K_u T_u.$$

де K_u та T_u - це відповідно коефіцієнт та період критичних коливань.

Для синтезу нечіткого ПІД-регулятора

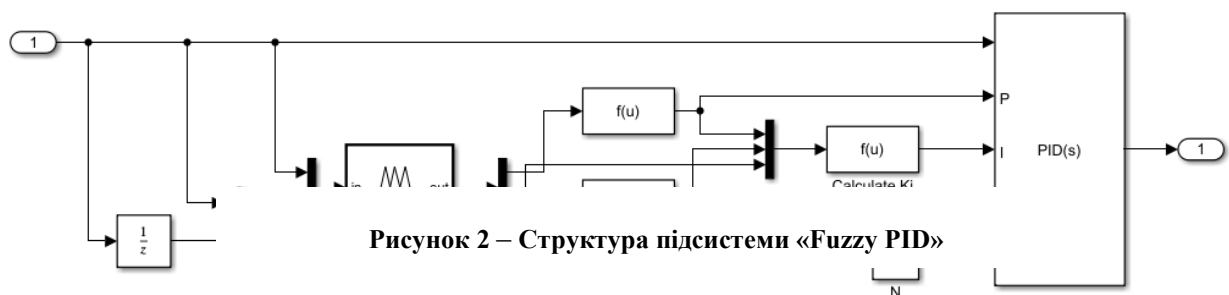


Рисунок 2 – Структура підсистеми «Fuzzy PID»

$$K_i = K_p / (\alpha T_d) = K_p^2 / (\alpha K_d).$$

Введемо коефіцієнти K_p' та K_d' , які визначатимемо за допомогою нечіткої бази правил, яка складена експертами. Коефіцієнти

використовуємо блоки стандартної бібліотеки

Simulink (рис. 1). Блок «Fuzzy PID» представляє собою підсистему, яка показана на рисунку 2. Нечіткий ПІД-регулятор має входні змінні – похибка керування $e(t)$ та різниця між її

першим та наступним значенням $\Delta e(t)$ та вихідну змінну – керуючий сигнал $u(t)$.

Нечіткий ПД-регулятор складається з таких основних компонентів: блок фазифікації, бази правил та блоку дефазифікації. Таким чином, під час його проектування необхідно вибрати його вхідні та вихідні змінні, визначити їх лівістичний опис та скласти нечіткі логічні правила для опису закону керування.

Вхідними змінними нечіткого ПД-регулятора є значення поточної похибки керування $e(t)$ та її різниці від свого попереднього значення $\Delta e(t)$. Для опису вхідних змінних використано сім термів: *PB* – позитивно великий, *PM* – позитивно середній, *PS* – позитивно малий, *ZO* – нульовий, *NS* – негативно малий, *NM* – негативно середній, *NB* – негативно великий (рис. 3). Функції належності мають трикутну, S- та Z-подібну форми. Такі форми функцій належності прості, що зменшує затрати часу під час розрахунків.

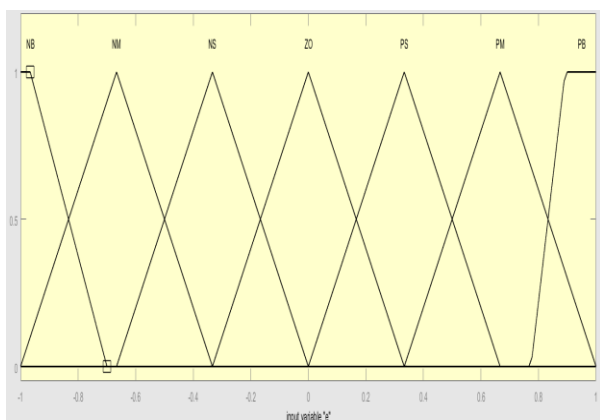


Рисунок 3 – Функції належності вхідних змінних $e(t)$ та $\Delta e(t)$

Вихідними змінними є коефіцієнти K_p' , K_d' та α . Змінні K_p' та K_d' описуються двома термами Big та Small (рис.4), функції належності яких можна записати так:

$$\mu_{Small}(x) = -\frac{1}{4} \ln x \quad \text{або} \quad x_{Small}(\mu) = e^{-4\mu},$$

$$\mu_{Big}(x) = -\frac{1}{4} \ln(1-x) \quad \text{або} \quad x_{Big}(\mu) = 1 - e^{-4\mu}.$$

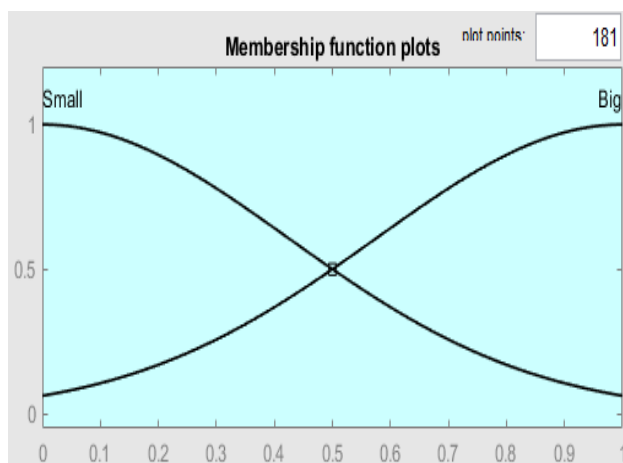


Рисунок 4 – Функції належності вихідних змінних K_p' та K_d'

Змінна α описується чотирма термами: *S* – малий, *MS* – середньо малий, *M* – середній, *B* – великий.

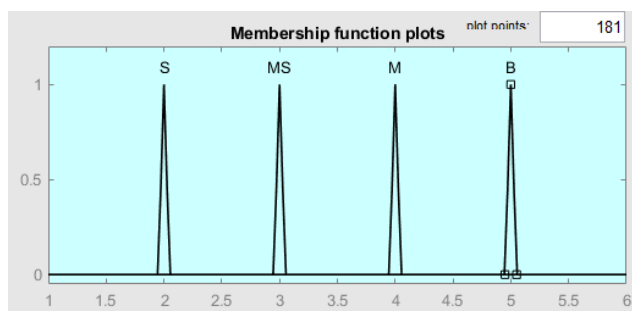


Рисунок 5 – Функції належності вихідних змінної α

Нечітка база правил, яка була сформована на основі думки експертів [6], представлена на в таблицях 2-4.

Значення вихідних змінних K_p' , K_d' та α було визначено за алгоритмом Мамдані [8]. В результаті значення коефіцієнтів налаштування ПД-регулятора визначалися за такими формулами:

$$K_p = (K_{p_{max}} - K_{p_{min}})K_p' + K_{p_{min}}, \quad (12)$$

$$K_d = (K_{d_{max}} - K_{d_{min}})K_d' + K_{d_{min}}, \quad (13)$$

$$K_i = K_p^2 / (\alpha K_d). \quad (14)$$

Таблиця 2 Нечітка база правил для визначення величини K_p'

		$\Delta e(t)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B

Таблиця 3 Нечітка база правил для визначення величини K_d'

		$\Delta e(t)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S

Таблиця 4 Нечітка база правил для визначення величини α

		$\Delta e(t)$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e(t)$	NB	2	2	2	2	2	2	2
	NM	3	3	2	2	2	3	3
	NS	4	3	3	2	3	3	4
	ZO	5	4	3	3	3	4	5
	PS	4	3	3	2	3	3	4
	PM	3	3	2	2	2	3	3
	PB	2	2	2	2	2	2	2

На рисунку 6 наведені результати досліджень в програмному середовищі Matlab класичного ПД-регулятора та нечіткого ПД-регулятора. Використання нечіткого ПД-регулятора є ефективнішим у порівнянні з стандартним ПД-регулятором, так як нечіткий ПД-регулятор забезпечує кращі показники якості процесу керування: швидкість збіжності та перерегулювання.

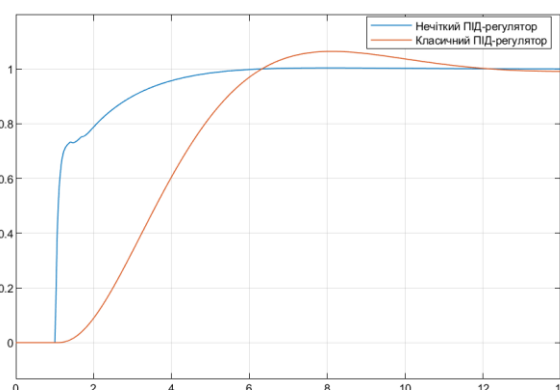


Рисунок 5 – Перехідна характеристика ОК при використанні класичного та нечіткого ПД-регулятора

Висновки

Для оптимізації роботи ПД-регулятора для ОК, який працює в умовах невизначеності та піддається випадковим впливам, запропоновано алгоритм налаштування основних коефіцієнтів ПД-регулятора із використанням методів нечіткої логіки.

Показано, що запропонована автоматична система керування на базі нечіткого ПД-регулятора забезпечує кращі показники якості перехідного процесу, ніж автоматична система керування із використанням класичного ПД-регулятора.

Література

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Санкт-Петербург : изд-во Профессия, 2003. 752 с.
2. Лорія М.Г., Поркуян О.В., Ананьєв М.В., Целіщев О.Б. Оптимальні настроювання регуляторів промислових систем управління технологічними об'єктами : монографія. Сєвєродонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. 192 с.
3. Іванов А.О. Теорія автоматичного керування : підручник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. 250 с.
4. Гимадиев А.Г., Крючков А.Н., Быстров Н.Д., Ермилов М.А. Исследование переходных и частотных характеристик типовых звеньев

SAR : метод. Указання. Самара : изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. 52 с.

5. Гарасимів В. М., Гарасимів Т. Г., Мойсенко О. В. Система оцінювання технічного стану проточної частини двоступеневого нагнітача природного газу на основі нечіткої логіки. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. № 1 (40). С. 70–78.

6. Zhao Z.-Y., Tomizuka M., Isaka S. Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transaction on Sysyem, Man and Cybernetics*, 1993. Vol. 23. N 5. P. 1392-1398.

7. Кузнецов А.В., Макарьянц Г.М. Синтез нечеткого регулятора при помощи пакета прикладных программ системы Matlab : методическое пособие. Самара : изд-во самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2016. 59 с.

References

1. Besekerskiy V.A., Popov O.P. Teoriya system avtomatychnoho upravlinnya. Sankt-Peterburh: yzd-vo Profesiya, 2003. 752 s.

2. Loriya M.H., Porkuyan O.V., Anan'yev M.V., Tselishchev O.B. Optimal'ni Nastroyuvannya rehulyatoriv promyslovykh system upravlinnya tekhnolohichnymy ob'yektamy: monohrafiya.

Syevyerodonets'k: vyd-vo SNU im. V. Dalya, 2019. 192 s.

3. Ivanov A.O. Teoriya avtomatychnoho keruvannya: pidruchnyk. Dnipropetrovs'k: Natsional'nyy hirnichniy universytet, 2003. 250 s.

4. Himadiev A.H., Kryuchkov A.N., Bystrov N.D., Yermilov M.A. Doslidzhennya perekhidnykh i chastotnykh kharakterystyk typovykh lanok SAR: metod. Vkazivky. Samara: vyd-vo Samar. derzh. aerokosm. un-tu, 2013. 52 s

5. Harasymiv V. M., Harasymiv T. H., Moysenko O. V. Systema otsinyuvannya tekhnichnoho stanu protochnoyi chasty dvostupenevykh nahnitacha pryrodnoho hazu na osnove nechitkoyi lohiky. *Metody ta prylady kontrolyu yakosti*. 2018. № 1 (40). S. 70-78.

6. Zhao Z.-Y., Tomizuka M., Isaka S. Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transaction on Sysyem, Man and Cybernetics*, 1993. Vol. 23. N 5. P. 1392-1398.

7. Kuznetsov A.V., Makar'yants H.M. Syntez nechitkoho rehulyatora za dopomohoyu paketu prykladnykh prohram systemy Matlab: metodychnyy posibnyk. Samara: vyd-vo samar. derzh. aerokosm. un-tu, 2016. 59 s.