

УДК 681.5:629.3

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-15>

СУПЕРВІЗОРНЕ УПРАВЛІННЯ З ІНКРЕМЕНТАЛЬНОЮ ЗМІНОЮ КОЕФІЦІЄНТІВ РЕГУЛЯТОРА

Разживін Олексій Валерійович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0000-0002-1371-2651
Scopus ID: 57672166200

Заліатов Артем Фаритович,

асистент кафедри автоматизації виробничих процесів
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0000-0003-0658-947X

Сердюк Тимур Вадимович,

аспірант
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0009-0002-4541-6416

Ільїнський Михайло Ігорович,

аспірант
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0000-0001-5219-5039

У статті розглядається методика побудови інкрементного нечіткого супервізора з метою корекції коефіцієнтів ПД-регулятора на підставі інформації про помилку та її похідну. Нечітка система використовується для модифікації параметрів регулятора нижнього рівня, який працює як головний регулятор. Застосування нечіткого інкрементного супервізора найбільш ефективно за керування нестационарним об'єктом керування, а також за неточно відомих параметрів об'єкта. Базовий регулятор може бути налаштований за стандартною методикою (наприклад, Зіглера – Ніколса), а нечіткий супервізор дає змогу варіювати коефіцієнти базового регулятора, покращуючи якість управління. Застосування паралельно функціонуючого нечіткого інкрементного регулятора дає змогу підвищити робастність системи автоматичного керування до зовнішніх збурень, які несуть непередбачуваний характер. Підвищення робастності дає змогу адаптації систем автоматизації до умов роботи в зовнішньому середовищі, у якому спостерігаються значні коливання факторів, що збурюють. Стійкість до збурень досягається шляхом динамічної адаптації інкрементним нечітким супервізором передаточних коефіцієнтів класичних регуляторів. Для налаштування правил функціонування нечіткого супервізора проведено аналіз на фазовій площині типового графіку перехідного процесу. Відповідно до проведеного аналізу розроблено таблицю лінгвістичних правил функціонування нечіткого супервізора. Під час опису передбачено використання одноманітного лінгвістичного нормалізованих значень помилки регулювання та її похідної, а також керуючого сигналу у вигляді трикутних функцій приналежності. За результатами синтезу нечіткого інкрементного регулятора здобуто графічне уявлення поверхні керування, а також проведено порівняння набутих графіків перехідного процесу об'єктом під час управління з класичним ПД-регулятором.

Ключові слова: інкрементний супервізор, нечіткий регулятор, коректування, помилка, похідна.

Razhyvin Oleksii, Zaliatov Artem, Serdiuk Tymur, Ilinskyi Mykhailo. Supervisory control with incremental change of regulator coefficients

The article considers the method of constructing an incremental fuzzy supervisor, in order to correct the coefficients of the PD controller based on information about the error and its derivative. The fuzzy system is used to modify the parameters of the lower-level controller, which works as the main controller. The use of a fuzzy incremental supervisor is most effective when controlling a non-stationary control object, as well as when the parameters of the object are not precisely known. The basic controller can be configured using a standard method (for example, Ziegler-Nichols), and the fuzzy supervisor allows you to vary the coefficients of the basic controller, improving the quality of control. The use of a parallel-functioning fuzzy incremental controller makes it possible to increase the robustness of the automatic control system to external disturbances that are unpredictable. Increasing robustness

allows automation systems to adapt to operating conditions in an external environment in which significant fluctuations in disturbing factors are observed. Resistance to disturbances is achieved by dynamically adapting the incremental fuzzy supervisor of the transfer coefficients of classical controllers. To set the rules for the functioning of the fuzzy supervisor, an analysis was carried out on the phase plane of a typical graph of the transient process. According to the analysis, a table of linguistic rules for the functioning of the fuzzy supervisor was developed. The description provides for the use of a uniform linguistic normalized values of the control error and its derivative, as well as a control signal in the form of triangular membership functions. According to the results of the synthesis of a fuzzy incremental controller, a graphical representation of the control surface was obtained, and a comparison of the acquired graphs of the transient process of the object when controlled with a classical PD controller was carried out.

Keywords: incremental supervisor, fuzzy controller, adjustment, error, derivative.

Вступ. Нечітка система використовується для модифікації параметрів регулятора нижнього рівня (базового). Такий підхід може бути ефективним під час керування нестационарним об'єктом, а також за неточно відомих параметрів об'єкта. Базовий регулятор може бути налаштований за стандартною методикою (наприклад, Зіглера – Ніколса), а нечіткий супервізор дає змогу варіювати коефіцієнти базового регулятора, покращуючи якість управління [1; 2].

Метою проведення досліджень є створення методики синтезу супервізорного управління з інкрементальною зміною коефіцієнтів регулятора з використанням редактора системи нечіткого висновку.

Методики та методи дослідження. Розглянемо варіант супервізорного управління, у якому відбувається інкрементальна зміна коефіцієнтів регулятора. Нехай розглядається ПД-регулятор, у якому нечіткий супервізор може зменшувати чи збільшувати коефіцієнти посилення залежно від характеру перехідного процесу (рис. 1).

Таким чином, вихід ПД-регулятора описуватиметься формулою [2]:

$$u(t) = (k_p + \Delta k_p)e(t) + (k_d + \Delta k_d)de(t)/dt.$$

Основна ідея використання інкрементного нечіткого супервізора полягає у корекції коефіцієнтів ПД-регулятора, щоб збільшувати k_p , коли керується помилка управління. Диференціальний коефіцієнт k_d змінюється пропорційно k_p , тому підтримується співвідношення k_d/k_p ,

отримане за початкового налаштування регулятора. Такий закон корекції забезпечується формулами [2; 3]:

$$\Delta k_p = y(t)k_p; \quad \Delta k_d = y(t)k_d.$$

де $y(t)$ – сигнал, що виробляється нечітким супервізором.

Закон роботи нечіткого супервізора відрізняється від таблиці логічних змінних звичайного НЛР, його можна обґрунтувати, розглядаючи типовий графік перехідного процесу, який на фазовій площині набуває такого вигляду (рис. 2).

На початку перехідного процесу $e(t)$ велика позитивна та de/dt нульова. У регуляторі нижнього рівня використовуються номінальні параметри. Потім $e(t)$ починає поступово зменшуватися, а de/dt зростає у негативному напрямку (зона 1). Вихід супервізора поступово збільшується від нуля до максимального значення, щоб зменшити час наростання. У зоні 2 $e(t)$ негативна, і система повинна повільно рухатися вниз зменшення перерегулювання. Це досягається зменшенням контрольованого параметра, і вихід супервізора у цій галузі негативний. Як тільки перерегулювання досягло пікового значення, знак de/dt стає позитивним (зона 3), і вихід супервізора повинен збільшувати своє значення, доки система не потрапить до зони 4. У зоні 4 $e(t)$ знову позитивна, і вихідний сигнал об'єкта наближається до стану, що встановився. Тут потрібно поступово зменшувати посилення, щоб обмежити перерегулювання.

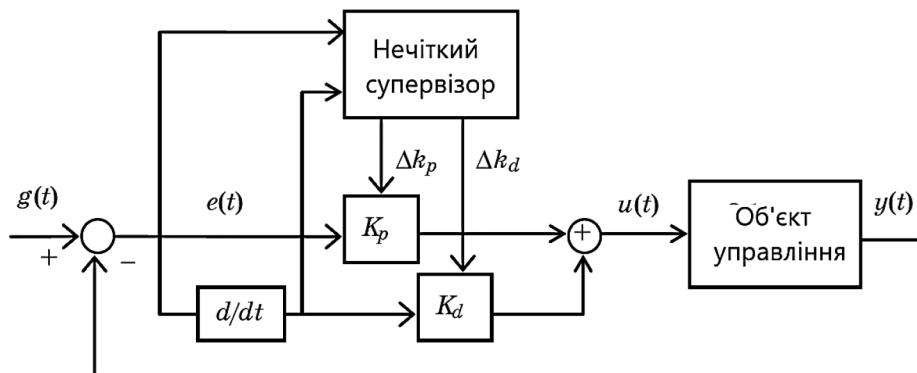


Рис. 1. Інкрементальний нечіткий супервізор

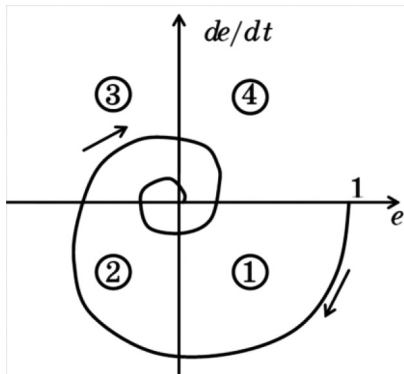


Рис. 2. Перехідний процес на фазовій площині

Якщо $e(t)$ нульова, вихід супервізора протилежний за знаком значення de/dt .

Якщо de/dt нульова, то вихід супервізора збігається за знаком з $e(t)$, і має бути більшим в області малих $e(t)$ зменшення статичної помилки [2].

Зроблені дослідження дають змогу здійснити опис поведінки нечіткого супервізора у вигляді таблиці лінгвістичних змінних, як показано на рис. 3.

Під час опису передбачається використання одноманітного лінгвістичного опису нормалізованих $e(t)$, de/dt та $y(t)$ у вигляді, показаному на

рис. 4, де використано такі скорочення: NL – negative large (негативне дуже велике), NB – negative big (негативне велике), NM – negative medium (негативне середнє), NS – negative small (негативне мале), ZE – zero (нульове) PS – positive small (позитивне мале), PM – positive medium (позитивне середнє), PB – positive big (позитивне велике), PL – positive large (позитивне дуже велике).

Результати. Розглянемо приклад використання нечіткого супервізора. Нехай є система управління з ПД-регулятором, коефіцієнти якого розраховано за методом Зіглера–Ніколса (рис. 5).

Налаштування регулятора методом Зіглера–Ніколса полягає у тому, щоб обчислити або підібрати оптимальні значення коефіцієнтів:

- K_p – коефіцієнт посилення пропорційного складника;
- K_d – коефіцієнт посилення диференціального складника.

За використання ПД, ПІ, ПІД-регулятора необхідно побудувати модель усієї системи у цілому та математично обчислити необхідні значення коефіцієнтів. У такому разі значення можна розрахувати точно. Але на практиці математичний розрахунок коефіцієнтів – завдання

		$e(t)$								
		NL	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PL
de/dt	NL	NL	NL	NL	NL	PB	PB	PB	PM	PM
	NB	NL	NL	NL	NB	PB	PB	PB	PM	PM
	NM	NL	NL	NB	NM	PB	PB	PM	PM	PS
	NS	NL	NB	NM	NS	PL	PB	PM	PS	PS
	ZE	ZE	NS	NM	NB	PL	PB	PM	PS	ZE
	PS	PS	PS	PM	PB	NL	NS	NM	NB	NL
	PM	PS	PM	PM	PB	NB	NM	NB	NL	NL
	PB	PM	PM	PB	PB	NB	NB	NL	NL	NL
	PL	PM	PM	PB	PB	NB	NL	NL	NL	NL

Рис. 3. Таблиця лінгвістичних правил нечіткого супервізора (цифрами позначено регіони фазової площини)

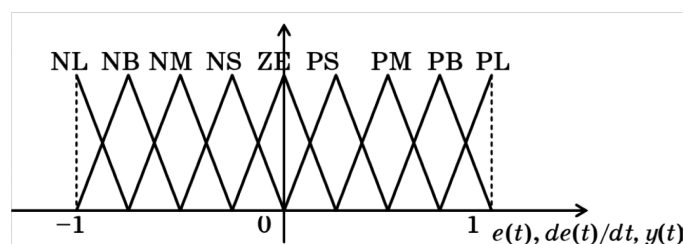


Рис. 4. Лінгвістичний опис помилки та її похідної

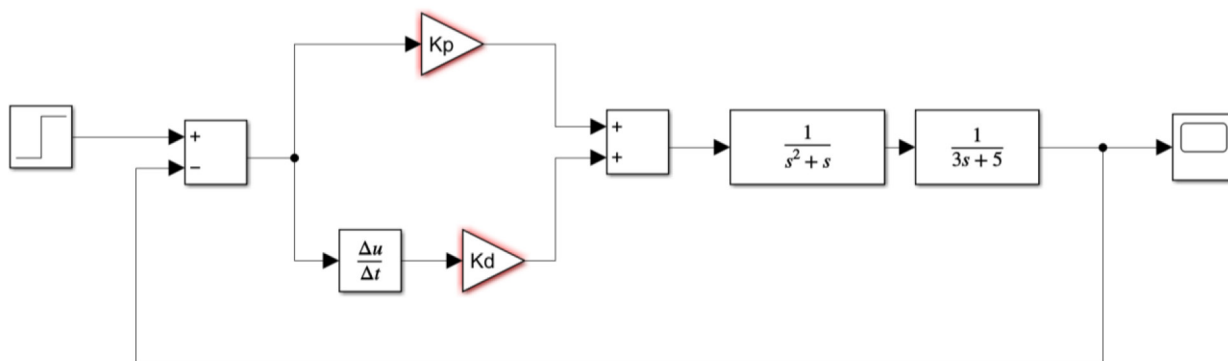


Рис. 5. Структурна схема математичної моделі системи управління з ПД-регулятором у MatLab Simulink

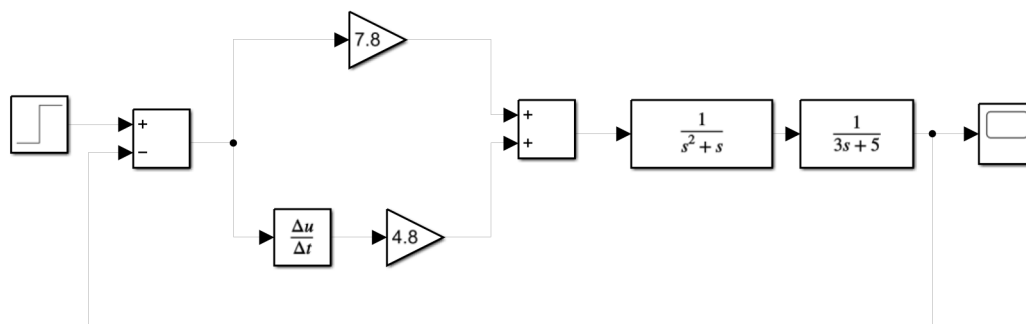


Рис. 6. Структурна схема математичної моделі системи управління з налаштованим ПД-регулятором

далеко не тривіальне і вимагає глибоких знань теорії автоматичного управління, тому здебільшого використовуються інші, спрощені методи налаштування.

Налаштуємо коефіцієнти ПД-регулятора методом Зиглера – Ніколса для даного випадку [2; 3]. Задаємо на математичній моделі $K_D = 0$, а коефіцієнт пропорційного складника регулятора збільшуємо до значення, за якого у системі виникає коливальний перехідний процес з однаковим періодом коливальності. У цьому разі такі коливання у системі управління настають за значення $K = K_p = 13$. Модельний визначений період коливальності: $T = 4,9$ с.

Розраховуємо коефіцієнти передачі ПД-регулятора:

$$K_p = 0.6K; \quad K_I = \frac{2K_p}{T}; \quad K_D = \frac{K_p T}{8}; \quad (1)$$

$$K_p = 0.6K = 0,6 \cdot 13 = 7,8;$$

$$K_D = \frac{K_p T}{8} = \frac{7,8 \cdot 4,9}{8} = 4,8.$$

Перехідний процес для системи управління з налаштованими коефіцієнтами ПД-регулятора, які наведено на рис. 6, має вигляд, який зображено на рис. 7.

Проведемо синтез ПД-регулятора з нечітким супервізором, у якому відбувається

інкрементальна зміна коефіцієнтів регулятора нечітким супервізором ПД-регулятора. Сформуємо у Simulink MatLab модель системи управління (рис. 8).

Налаштовування головного вікна редактора нечіткої логічної системи проведено у *FIS editor*, у якому задається її логічний висновок *Mamdani*. Для створюваної системи вибрано вид логічного зв'язку (*And method – min*) та (*Or method – max*), вид імплікації (*Implication – min*), спосіб агрегування висновків правил (*Aggregation – max*) та

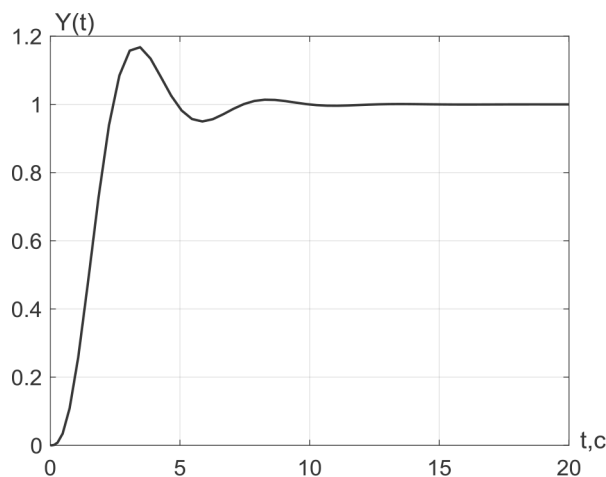


Рис. 7. Перехідний процес у системі управління з ПД-регулятором

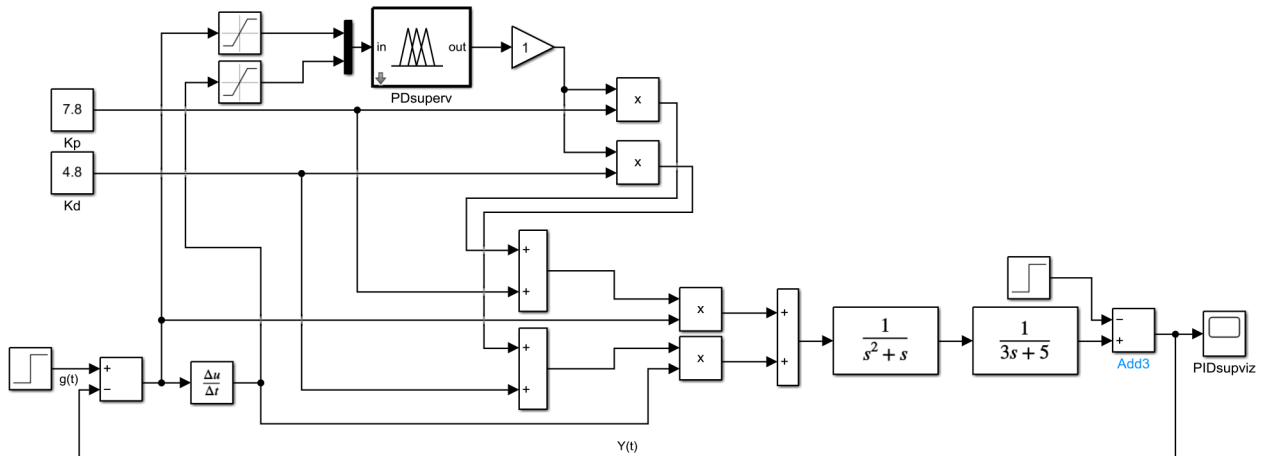


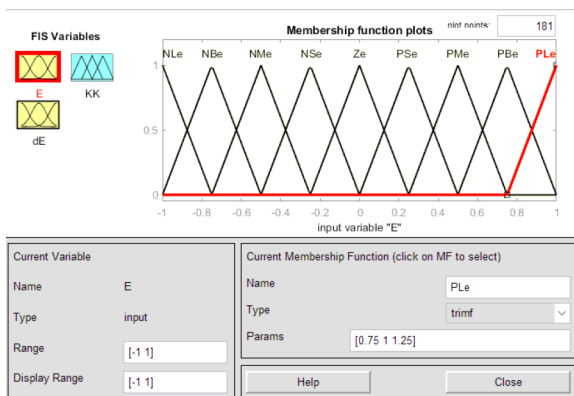
Рис. 8. Структурна схема математичної моделі системи управління з нечітким супервізором інкрементального типу

метод дефазифікації (*Defuzzification – centroid*). У меню *Edit* послідовно додано дві вхідні змінні з розміром базової шкали ($\text{Range} = [-1 \ 1]$) та вихідна змінна з розміром базової шкали ($\text{Range} = [0 \ 1]$).

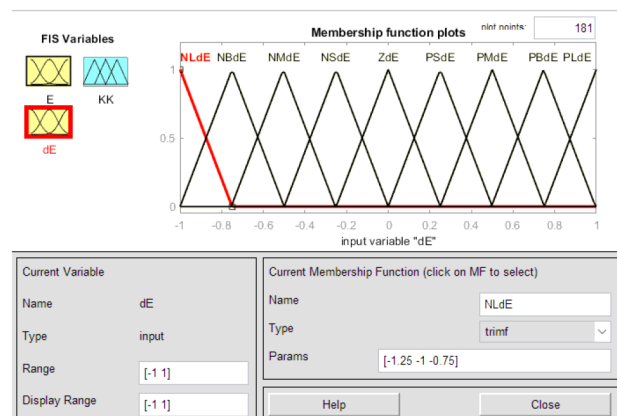
Для опису вхідних логічних змінних у редакторі функцій приналежності застосовано для

кожної змінної трикутну функцію приналежності.

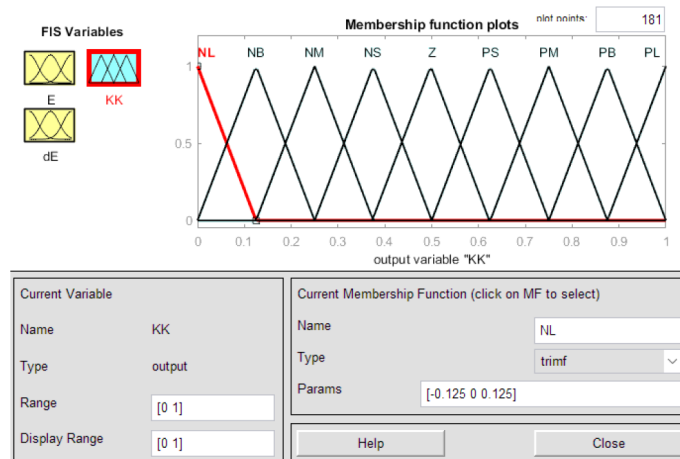
Терми лінгвістичної змінної «Помилка управління» розміщуються відповідно до рис. 9, а) з дев'ятьма параметрами функцій приналежності, аналогічно розміщуються терми вхідної лінгвістичної змінної «Похідна помилки



а



б



в

Рис. 9. Результат налаштування функцій приналежності змінних

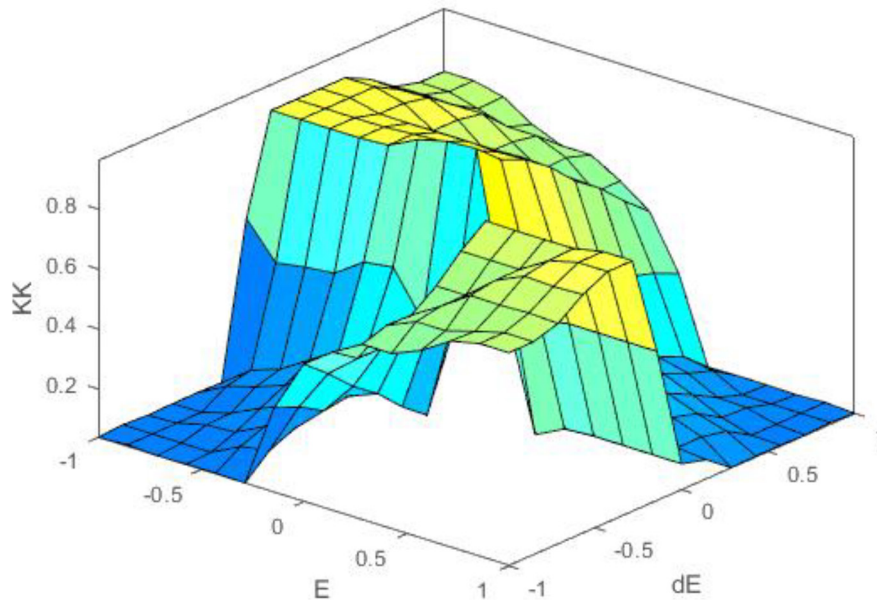


Рис. 10. Графічне подання закону управління

управління» (рис. 9, б). Для опису вихідної логічної змінної у редакторі функцій приналежності завдано для кожної вихідної змінної трикутну функцію приналежності (рис. 9, в).

Після опису вхідних та вихідних лінгвістичних змінних здійснюється опис правил у вікні редактора Rule Editor, кількість правил для даного випадку – 81. Управляючі правила формуються відповідно до таблиці лінгвістичних правил нечіткого супервізора, яку приведено на рис. 3. Посилки у правилах пов'язані (connection) за допомогою операції *and*. Усі правила забезпечено ваговим коефіцієнтом (*Weight* = 1).

За результатом функціонування управляючих правил здобуто графічне подання закону управління, яке приведено на рис. 10.

На рис. 11 наведено графік перехідного процесу у системі управління з нечітким інкрементальним супервізором, який здобуто на математичній моделі (див. рис. 8). На моделі у момент часу 15 с додано збурення. Як видно з графіку перехідного процесу, спроектована система управління повністю компенсує збурюючі впливи.

Висновки. Проведений порівняльний аналіз графіків перехідного процесу в системі управління з класичним ПД-регулятором та за супервізовного управління, у якому

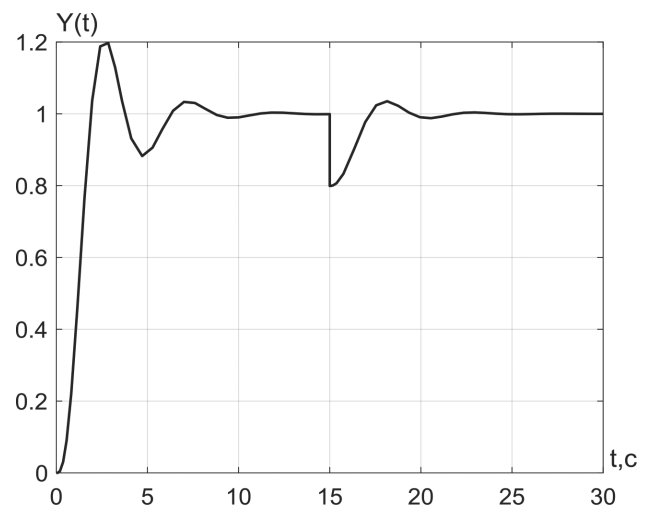


Рис. 11. Графік перехідного процесу у системі управління з нечітким інкрементальним супервізором ПД-типу

відбувається інкрементальна зміна коефіцієнтів ПД-регулятора, показав, що:

1) застосування нечіткого інкрементного супервізора дає змогу підвищити бистротю системи управління за відпрацювання збурень;

2) можна підвищити стійкість до збурень, яка досягається шляхом динамічної адаптації інкрементним нечітким супервізором передаточних коефіцієнтів класичних регуляторів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Новіков П. В., Бунке О. С. Інтелектуальна система керування інерційними технологічними параметрами на базі fuzzy-релятора. *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики* : XV міжнар. наук.-прак. конф. Київ, 2017. С. 31–32.
2. Нейронні мережі в системах автоматизації : курс лекцій / уклад. О. В. Разживін. Запоріжжя : Технічний університет «Метінвест політехніка», 2023. 296 с.
3. Разживін О. В., Бережна О. В., Сахацький С. О., Мурат В. М. Синтез систем управління динамічними процесами у котлі із застосуванням нейронної мережі прямого поширення. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2023. Т. 3. № 103. С. 13–21.

REFERENCES:

1. Novikov, P. V., & Bunke, O. S. (2017) Intel'ektual'na systema keruvannya inertsyynymy tekhnolohichnymy parametramy na bazi fuzzy-relyatora [Intelligent control system for inertial technological parameters based on fuzzy relator]. *Suchasni problemy naukovooho zabezpechennya enerhetyky: XV mizhnar. nauk.-prak. konf. asp., mah. i stud. : mat. konf. K. S.* 31–32. [in Ukrainian].
2. Razzhyvin, O. V. (2023) Neyronni merezhy v systemakh avtomatyzatsiyi: kurs lektsiy [Neural Networks in Automation Systems: Course of Lectures]. Zaporizhzhya: TOV "Tekhnichnyy universytet "Metinvest politehnika", 296 s. [in Ukrainian].
3. Razzhyvin, O. V., Berezhna, O. V., Sakhats'kyi, S. O., & Murat, V. M. (2023) Syntez system upravlinnya dynamichnymy protsesamy u kotli iz zastosuvannyam neyronnoyi merezhi pryamoho poshyrennya [Synthesis of dynamic process control systems in a boiler using a feedforward neural network]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu*. T. 3. № 103. S. 13–21. [in Ukrainian].