

40 с у порівнянні з системою на базі типового ПІД-регулятора, одночасно із забезпеченням аперіодичного характеру перехідного процесу із перерегулюванням в межах 25 %. При цьому застосування запропонованого методу забезпечує також підтримання високих якісних характеристик процесу регулювання в умовах змінення транспортного запізнення об'єкту керування.

**Висновки та напрям подальших досліджень.** Для забезпечення підвищення ефективності процесу дозування шихтових матеріалів при виготовленні залізорудних котунів запропоновано використовувати для формування узгодженого адаптивного керування комплексом механізмів тракту транспортування та дозування шихти підхід на базі теорії гіперстійкості, що забезпечує високу якість процесу регулювання та адаптацію до змін транспортного запізнення об'єкту керування. Результати, отримані в процесі моделювання використання запропонованого методу для керування продуктивністю групового живильника концентрату, підтверджують ефективність та доцільність впровадження систем адаптивного керування на базі теорії гіперчутливості для модернізації систем автоматизації комплексів підготовки, дозування та змішування шихти на існуючих фабриках огрудкування.

#### *Список літератури*

1. Еремін Е. Л., Цыкунов А. М. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. – Бишкек: Илим, 1992.
2. Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Схемы адаптивного управления с расширенной ошибкой // Автоматика и телемеханика. – 1994. - №9. – С. 3 – 22.
3. Цыкунов А. М. Квадратичный критерий абсолютной устойчивости в теории адаптивных систем. – Фрунзе: Илим, 1990. – 157 с.
4. Еремін Е. Л., Теличенко Д. А., Чепак Л. В. Синтез адаптивных систем для скалярных объектов с запаздыванием по управлению – Благовещенск: Амурской гос. ун-т, 2006. – 240 с.
5. Ксендзовский В.Р. Автоматизация процесса производства окатышей. М.:Металлургия, 1971. – 216 с.
6. Iwai Z., Mizumoto I. Robust and simple adaptive control systems // Int. J. of Control. – 1992. – V. 55. - №6. – P. 1453 – 1470
7. Palmor Z. J. Robust digital dead time compensator controller for a class of stable systems // Automatica. – 1986. – V. 22. - № 5. – p. 587 – 591.
8. Makoudi M., Radoune L. Robust decentralized adaptive control for non-minimum phase systems with unknown and/or time varying delay // Automatica. – 1999. – V. 35. – P. 1417 – 1426.
9. Гончаров Ю.Г., Дримбо А.В., Ищенко А.Д. Автоматизация процессов окискования железных руд. – М.: Металлургия, 1983. – 190 с.
10. Автоматизация фабрик окискования железных руд и концентратов / Н.В. Федоровский, В.В. Даньшин, В.И. Губанов, Р.И. Сигуа. – М.: Металлургия, 1986. – 206 с.

Рукопис подано до редакції 09.10.2020

УДК 622.7: 004.94

О.І. САВИЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., М.А. ТИМОШЕНКО, О. О. ГРАММ, асистенти  
Криворізький національний університет

### **ВИБІР СПОСОБУ АВТОМАТИЗОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ МІЛКОГО ДРОБЛЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

**Мета.** Метою даної роботи є вибір способу регулювання продуктивності мілкої дробарки з метою удосконалення характеристик автоматизованого керування процесом дроблення в цілому та покращення показників роботи технологічного процесу. Складність, інерційність, не стаціонарність та динамічність технологічних процесів, що відбуваються на дробильній фабриці, наявність складних зв'язків між технологічними механізмами обумовлюють застосування сучасних інтелектуальних засобів автоматизованого керування і, відповідно, вибір найкращого типу регулювання.

**Методи дослідження.** Проведено аналіз необхідності застосування для керування процесами дроблення сучасних видів регулювання. Використано комп'ютерне моделювання для досягнення поставлених цілей.

**Наукова новизна.** Підтверджено можливість застосування сучасних регуляторів для автоматизованого керування технологічним процесом дроблення руди з невизначеними параметрами, а саме теоретично доведено цінність застосування нечітких та нейронних регуляторів (на базі штучного інтелекту) порівняно з класичними засобами керування.

**Практична значимість.** Обґрунтовано застосування нечіткого регулятора та регулятора, побудованого на нейронній мережі для керування процесом мілкого дроблення. Створено попередню спрощену модель об'єкту керування, що може бути модернізована і доповнена для створення системи керування технологічним процесом з урахуванням більшої кількості параметрів управління.

**Результати.** Розроблена модель дозволяє контролювати такий параметр перебігу дробильного процесу, як продуктивність дробарки. Враховувалися параметри технологічного процесу, що впливають на продуктивність дробарки та вплив параметрів кінцевого дробленого продукту на подальші процеси збагачувальної фабрики. Тобто, чим дрібніше буде помел залізної руди, тим якісніше буде проходити здрібнення руди млинами на збагачувальній фабриці, що в свою чергу якісно впливає на енергоефективність гірничо-збагачувального процесу в цілому. При створенні моделі враховувалися лише найголовніші параметри, які найлегше вимірювати та контролювати у реальних умовах, тому модель є спрощеною. Напрямок подальших досліджень є удосконалення моделі та перетворення її у повноцінну модель системи керування.

**Ключові слова.** Дроблення, автоматизація, моделювання, регулятор, fuzzy.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-108-39-44

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** У гірничо-металургійних промислових процесах основною метою автоматизації є підвищення якісних та кількісних показників процесу та зменшення втрат корисних компонентів у відходах. Підвищення продуктивності в гірничо-металургійних процесах досить сильно залежить від ступеня автоматизації виробничих процесів. Характеризується широким використанням науково обґрунтованих методів проектування, використанням комп'ютерних технологій та переходом від створення локалізовано регульованих підрозділів до інтегрованих автоматизованих систем [1-5].

Не дивлячись на стрімкий ріст рівня автоматизації у всіх сферах промисловості, на сьогодні багато дробильних та гірничо-збагачувальних фабрик і досі використовують застарілі засоби регулювання. Часто вони не передбачають навіть комп'ютеризації регулювання і використовуються релейно-контактні схеми, двопозиційні та трипозиційні регулятори і навіть при застосуванні комп'ютеризованого автоматизованого регулювання багато систем керування будуються на класичних законах регулювання з передаточними функціями та класичним ПІД-регулюванням.

**Аналіз досліджень та публікацій.** На сьогодні дуже добре себе зарекомендували такі види автоматизованого регулювання, як нечітке керування та нейронні мережі. Розглянемо детальніше їх переваги.

Застосування нечіткого управління може бути найбільш ефективно в тих випадках, коли відсутня явна модель процесу або аналітична модель є занадто складною для подання або отримання рішення в реальному масштабі часу. Іншою перевагою нечіткої логіки є можливість безпосереднього поєднання досвіду кількох фахівців. Нечітке управління, будучи багатозначним управлінням, більше обмежується значеннями висловлювань «істина» або «брехня». Ця особливість робить нечітке управління адекватним засобом для моделювання емпіричного досвіду експертів, оперуючи тими поняттями, в термінах яких формуються управляючі дії на заданій множині входів [6-11].

Щодо інтелектуальних нейронних мереж можна сказати, що ідентифікація технічних об'єктів з використанням апарату ІНМ має такі переваги:

нейромережева модель об'єкта управління при успішному навчанні є більш точною, ніж модель, в основі якої лежить передавальна функція, особливо при ідентифікації об'єктів високого порядку зі складним математичним описом;

застосування нейромережевих моделей дає можливість моделювання динаміки ОУ в різних режимах, в тому числі екстремальних, які неможливо відтворити на наявному лабораторному устаткуванні;

нейрорегулятори дозволяють синтезувати високоякісні САУ нестационарними об'єктами і об'єктами з розподіленими параметрами.

Традиційні автоматизовані системи управління порівнювалися з нечіткими системами управління багатьма авторами. Наприклад, в роботі С.В. Фролова, І.А. Єлізарова і С.А. Лоскутова [12] проведено порівняння трьох моделей систем автоматичного регулювання (САР): моделі релейно-імпульсної САР, моделі САР з пропорційно-диференціальною (ПД) ланкою і моделі САР з блоком нечіткого виведення (нечіткої САР). Отримані авторами результати показав-

ли, що нечітка САР не поступається за якістю регулювання САР, що реалізується традиційним способом. Як перевагу нечіткого регулювання було відмічено те, що при наявності сучасних систем програмування ПЛК з вбудованими бібліотеками нечіткого управління, що мають хороший графічний інтерфейс, дуже легко і наочно представляється і коригується вид функцій приналежності і нечіткого виведення. Отже, спрощується і налаштування САР. В роботі М.А. Панько [13] розглядаються особливості нечітких алгоритмів регулювання та обумовлені ними відмінності динаміки автоматичних систем регулювання з класичними і нечіткими алгоритмами. Моделювання проводилося в середовищі MATLAB Simulink. В результаті були зроблені наступні висновки:

система з нечітким алгоритмом нелінійна і вид перехідних процесів в САР залежить від форми і розміру впливу збурень;

при малих, обмежених по модулю і швидкості зміни значеннях сигналу розузгодження нечіткий і класичний ПІ-алгоритми в динамічному відношенні еквівалентні;

при перевищенні сигналом неузгодженості або його збільшення меж нормованого діапазону проявляється ефект насичення – нечіткий алгоритм стає істотно нелінійним.

Нечітка реалізація ПІ і ПІД-алгоритмів при підборі параметрів дозволяє отримати працездатну систему, але оптимальне рішення задач мінімізації помилки регулювання при дії збурень і переведення системи в інший стан вони не забезпечують. У статті І.П. Шанцевої [14] розглянуті структури регуляторів електричних печей опору на основі нечіткої логіки. Показники якості і точності регулювання розроблених моделей порівнювалися з аналогічними показниками ПІД-регулятора. На основі математичної моделі була доведена можливість реалізувати нечіткий алгоритм управління і забезпечити бажаний перехідний процес зміни температури. Дослідження показали, що нечіткий регулятор забезпечує більш високу якість регулювання температури, ніж ПІД-регулятор. В роботі А.А. Коростельова [15] проводиться порівняння ПІ-регулятора з нечітким регулятором. Порівняльний аналіз якості регулювання проводився при збуреннях, що йдуть по каналах завдання, регулювання і параметричного збурення. Якість регулювання визначалася за такими характеристиками: динамічної помилки, ступеня затухання, часу регулювання. Отримані в роботі результати показали, що система з нечітким регулятором перевершує систему з ПІ-регулятором за швидкодією. Динамічна помилка системи з нечітким регулятором незначно відрізняється від динамічної помилки системи з ПІ-регулятором.

**Постановка задачі.** Метою дослідження обрано обґрунтування вибору способу регулювання продуктивності процесу мілкового дроблення залізної руди на основі інтелектуальних методів керування, а саме нечіткого регулятора та нейрорегулятора. Для досягнення вказаної мети були поставлені наступні задачі: Проведено аналіз сучасного стану питання управління дробильними комплексами та перспектив його удосконалення у зв'язку із швидким розвитком комп'ютеризації в умовах гірничо-металургійних підприємств; узагальнено математичний опис роботи конусних дробарок для ефективного прогнозування параметрів роботи обладнання в залежності від управлінських параметрів обладнання, сформовано алгоритм та побудовано систему управління параметрами процесу мілкового дроблення залізної руди на основі нечіткої логіки та нейрорегулятора; порівняно результати роботи обох регуляторів.

**Викладення матеріалу та результати.** У якості об'єкту управління обрано конусну дробарку мілкового дроблення КМД 2200. Конусна дробарка - це об'єкт, робота якого характеризується продуктивністю живильника, шириною розвантажувальної щілини, крупністю і міцністю сировини, а також потужністю, споживаною в процесі дроблення, та гранулометричним складом дробленого продукту, який характеризується середньозваженим діаметром шматків.

Можливі відхилення ширини розвантажувальної щілини від цільового значення зазвичай своєчасно усуваються обслуговуючим персоналом під час профілактичних оглядів. Крім того, зміна ширини розвантажувальної щілини під час роботи настільки мала, що її ефектом можна знехтувати.

Динамічні властивості процесу дроблення відповідають аперіодичній ланці першого порядку

$$W_{op}(p) = \frac{h(p)}{s(p)} = \frac{k_{op} e^{-pt_{op}}}{T_{op}p + 1},$$

де  $k_{op} = \frac{DPQ_{баз}}{DQP_{баз}}$  – коефіцієнт моделі підсилення дробарки;  $T_{op} = \frac{3600V_{NP}}{q}$  – постійна часу дробарки;  $t_{op} = \frac{1}{v}$  – транспортне запізнювання;  $q$  – продуктивність дробарки;  $P$  – потужність приводу дробарки;  $Q$  – кількість сировини у дробарці.

Далі були визначені передаточні функції асинхронного двигуна, перетворювача частоти і проведено налаштування контуру регулювання швидкості двигуна.

Структурна схема керування продуктивністю конусної дробарки представлена на рис. 1.

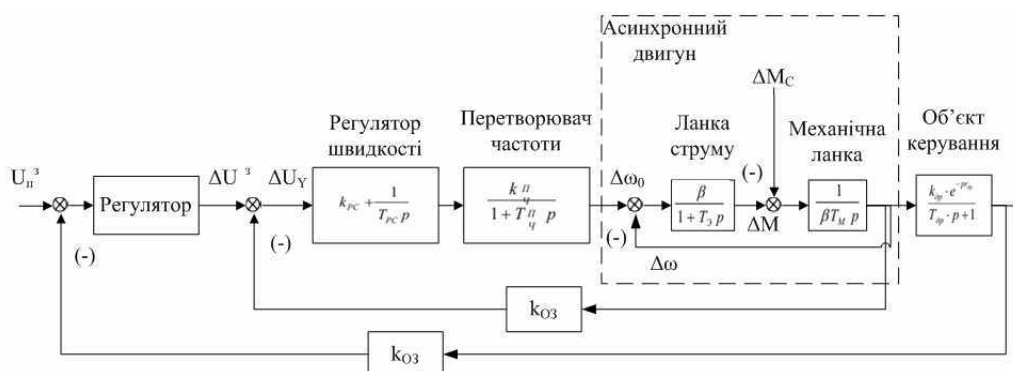


Рис. 1. Структурна схема регулювання продуктивності конусної дробарки

На рис. 1 прийнято наступні умовні позначення:  $U_n^3$  – вхідне завдання напруги для перетворювача частоти;  $\Delta U^3$  – завдання регулятора;  $\Delta U_Y$  – сформоване завдання напруги;  $\Delta \omega_0$ ,  $\Delta \omega$  – завдання частоти обертання від перетворювача частоти та сформоване завдання частоти обертання;  $\Delta M$ ,  $\Delta M_c$  – механічний момент та механічне збурення моменту;  $k_{O3}$  – коефіцієнти оберненого зв'язку.

Формалізація нечітких змінних для регулятора наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Формалізація нечітких змінних

Найменування	Область визначення	Терм-множина	Область визначення терм-множини
Неузгодження продуктивності, ум. од.	[-1, 1]	Minus	[-1; -0.3]
		Norma	[-0.6; 0.6]
		Plus	[0.3; 1]
Швидкість зміни неузгодження, %	[0, 100]	Low	[0; 40]
		Medium	[30; 70]
		High	[60; 100]
Напруга завдання по швидкості, В.	[0, 10]	U1	[0; 4]
		U2	[4; 8]
		U3	[8; 12]

Таким чином, в розробленій системі контролюються такі параметри, як напруга живлення, яка надходить на перетворювач частоти і пропорційно впливає на швидкість приводу живильника, яка безумовно у пропорційному відношенні впливає на продуктивність дробарки (позначення, прийняте у Simulink - Zадание).

Керуючими ефектами є сигнал невідповідності продуктивності дробарки від завдання ( $\Delta Q$ ) і швидкість його зміни ( $v\Delta Q$ ).

Розроблену модель системи керування зображено на рис. 2.

Рис. 2 показує, що система побудована відповідно до моделі, сформованої на рис. 1. Вхідний сигнал невідповідності продуктивності дробарки надходить у нечіткий регулятор як безпосередньо, так і як похідна через мультиплексор, формуючи, таким чином, два входи регулятора, описані вище. У схемі застосовано блок транспортної затримки для двох цілей - щоб уникнути алгебраїчної петлі в розрахунках і продемонструвати інерційність процесу дроблення. В кінці ланцюга моделі вимірюється сигнал продуктивності конусної дробарки. Його форма повинна

бути максимально прямою, без коливань, що свідчить про стабілізацію процесу управління та ефективність регулятора.

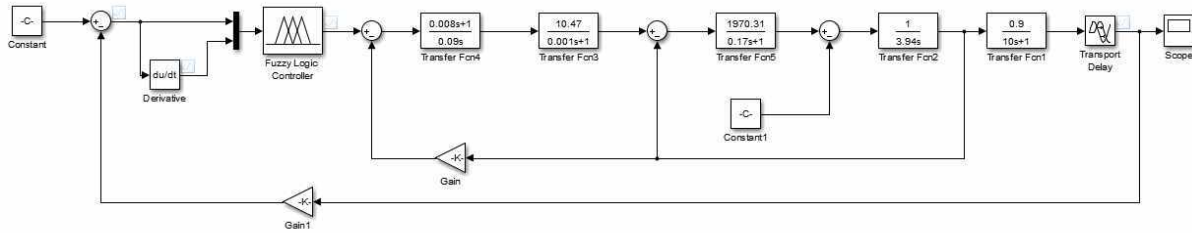


Рис. 2. Модель системи керування продуктивністю конусної дробарки

На рис. 3а показано результат моделювання продуктивності конусної дробарки при застосуванні нечіткого регулятора. Так як продуктивність була прийнята в умовних одиницях, графік повинен наблизитися якомога ближче до одиниці, бажано з мінімальним пере регулюванням та якомога меншим часом переходу до усталеного режиму.

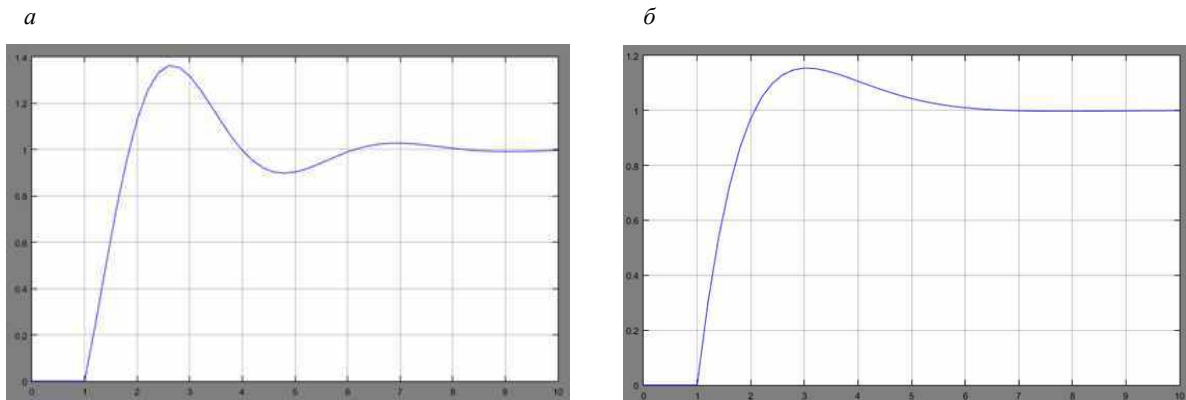


Рис. 3. Результати моделювання; а – результат моделювання при застосуванні нечіткого регулятора; б – результат моделювання при застосуванні нейрорегулятора

Оскільки результати вимірювались у умовних одиницях, графік повинен бути якомога ближчим до одиниці, бажано з мінімальним пере регулюванням та якомога швидшим перехідним процесом. При цих налаштуваннях регулятора результат є задовільним. Застосуємо замість нечіткого регулятора нейронну мережу, побудовану на базі алгоритму оберненого розповсюдження похибки. На рис. 3б показано результат моделювання при нейронному регуляторі.

Як видно з результату моделювання, зображеного на рис. 3б, після застосування нейронного регулятора загальна працездатність системи стала значно краще порівняно з рис. 3а. Порівняно з попереднім результатом перерегулювання значно зменшилося, як і час переходу до усталеного режиму, а тому працездатність нейронного регулятора у даному випадку можна вважати кращою порівняно з нечітким регулятором.

При моделюванні процесу дроблення було додатково перевірено реакцію розробленої віртуальної моделі на перехід роботи дробарки з однієї усталеної швидкості до іншої у процесі роботи. У цьому випадку темп розвитку процесу не вносить значних збурень і результати є правдоподібними.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** У ході дослідження підтверджена можливість використання сучасних регуляторів для автоматизованого управління процесом, і теоретично доведено значимість використання нечітких та нейронних регуляторів порівняно з класичними засобами управління. Обґрунтовано застосування нечіткого керування та керування, побудованого на базі нейронної мережі для управління процесом мілкого дроблення залізної руди. Підвищення продуктивності дробарок мілкого дроблення дає можливість, за умов зниження завантаження на їх входах, виключати з роботи одну або дві дробарки секції мілкого дроблення. Це призводить до зменшення витрат як активної так і реактивної енергії. Була створена попередня спрощена модель об'єкта управління, яка може бути оновлена та доповнена для створення систе-

ми управління процесом з урахуванням подальшого збільшення кількості параметрів управління, які будуть враховуватися. Розроблена модель дозволяє регулювати такий параметр дроблення, як продуктивність дробарки. Враховано параметри технологічного процесу, що впливають на продуктивність дробарки та вплив параметрів кінцевого подрібненого продукту на подальші процеси збагачувальної фабрики. Відомо, що чим дрібніше кінцевий продукт дробильної фабрики, що надходить на збагачувальну фабрику, тим меншу потужність споживатимуть млини на збагачувальній фабриці, що в свою чергу якісно впливає на енергоефективність усього процесу видобутку та переробки. При створенні моделі враховувались лише найважливіші параметри, які найпростіше виміряти та контролювати в реальних умовах, щоб модель була спрощена. Напрямок подальших досліджень - вдосконалення моделі та перетворення її на повноцінну модель системи управління і відповідне удосконалення досліджуваних регуляторів.

#### Список літератури

1. **Alfano G., Saba P., Surracco H.** Top size control in fine mineral grinding. *Proc. XX Int. Miner. Process. Congr.* Aachen, 1997. V2. p.337-344.
2. **Christoph B., Luhmann J., Klein R.** Partikelmess techniken im Vergleich – Untersuchungen zur Korngrößenbestimmung toniger Rohstoffe. *Ziegelind Int.* 2000. №6. p.38-45.
3. **Heiskanen K., Morsky P., Knuutinen T.** Autogenos grinding parameter estimation. *Int. Proc. Miner. Process. Congr.* Aachen, 1997.V.2. p. 299-306.
4. **Hyotyniemi H., Ylinen R.** Modelling of visual flotation froth data. *Automation in mining, mineral and metal processing.* 1998. №1. p. 309-314.
5. **Itavuo, P., Vilkko, M., Jaatinen, A., Viilo, K.** Dynamic modeling and simulation of cone crushing circuits. *Minerals Engineering.* 2013. № 43. p. 29–35.
6. **Jayson T., Carl D., Gianni B.,** 2007. A machine vision approach to on-line estimation of run-of-mine ore composition on conveyor belts. *Minerals Engineering.* 2011. №20, p. 1129–1144.
7. **Lindqvist, M.** Energy considerations in compressive and impact crushing of rock. *Minerals Engineering.* 2008. vol. 21, № 9. p. 631 – 641.
8. **Spenser S.J., Suterland D.N.** Stereological correction of mineral liberation grade distributions. *Proc. XXI Int. Miner. Process. Congr. Rome,* 2000. p. 45-67.
9. **Tumidajski T.** Certain aspects of the analysis of particle size distributions of grained materials. *Arch Mining. Sci.* 1997. №2. p.305-318.
10. **Zelin Zhang, Jianguo Yang, Dongyang Dou.** A surface probability model for estimation of size distribution on a conveyor belt. *Physicochemical Problems of Mineral Processing.* 2014. №50. p.591–605.
11. **Zhang Z, Yang J, Ding L, Zhao Y.** Estimation of coal particle size distribution by image segmentation. *Int J Min Sci Technol.* 2012. №22. p. 739–44.
12. **Фролов С.В., Елизаров И.А., Лоскутов С.А.** Реализация нечеткого импульсного регулятора // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – № 1. – С. 23–25.
13. **Панько М.А., Аракелян Э.К.** Особенности нечетких алгоритмов регулирования в сравнении с классическими // Теплоэнергетика. – 2001. – № 10. – С. 39–42
14. **Шанцева И.П.** Фаззи-регулятор температуры электрических печей сопротивления // Вестник МЭИ. – 2008. – № 3. – С. 51–56.
15. **Коростелёв А.А.** Сравнительный анализ функциональных возможностей интеллектуальных нечетких и ПИ-регуляторов: мат-лы конф. «Первый открытый конкурс молодых специалистов ЗАО «СибКОЭС». – Томск: ТПУ, 2008.

Рукопис подано до редакції 08.10.2020

УДК 681.518.3: 339.371

І.В. ЗАВСЕГДАШНЯ, канд. екон. наук, доц., С.А. РУБАН, канд. техн. наук, доц.,  
О.В. ПИЛИПЕНКО, О.О. ЗАВСЕГДАШНЯ, асистенти, І.О. ФИЛИПОВА, магістрантка  
Криворізький національний університет

### ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТОВАРНИМИ ЗАПАСАМИ ДЛЯ УМОВ МАЛОГО БІЗНЕСУ У СФЕРІ E-COMMERCE

**Мета** роботи полягає у розробці та обґрунтуванні концепції інформаційної системи для оптимізації обсягів запасів товарів на складах для умов підприємств малого бізнесу, які функціонують у сфері електронної комерції.

**Методи дослідження:** використовувався метод теоретичного аналізу науково-практичних розробок у напрямі управління товарними запасами (в тому числі для умов функціонування малих підприємств); системний аналіз вико-

© Завсегдашня І.В., Рубан С.А., Пилипенко О.В., Завсегдашня О.О., Филипова І.О., 2020