

# КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

---

УДК 681.5.01:004.896

*М.П. Грама, В.М. Сідлецький*

## ПОРІВНЯННЯ РОБОТИ ПІДСИСТЕМ ПРОГНОЗУВАННЯ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ВИПАРНИМ АПАРАТОМ

**Грама Михайло Петрович**

Національний університет харчових технологій, м. Київ,  
*trpgramb@gmail.com*

**Сідлецький Віктор Михайлович**

Національний університет харчових технологій, м. Київ,  
*sidleckyivm@nuft.edu.ua*

Мета дослідження — обґрунтування методів регулювання тиску пари у випарному апараті з підсистемою прогнозування, що дозволить спрогнозувати поведінку системи та дослідити вплив кількості часових інтервалів алгоритму прогнозування на точність прогнозу роботи випарної станції. Розроблено систему обміну даними між рівнем технологічного процесу і рівнем виробництва. Досліджується робота випарної установки з підсистемою прогнозування регулювання тиску пари. У схемі автоматизації регулювання тиску пари як датчик використовуються перетворювачі тиску РС-28. Виконавчими механізмами служать пневматичні сідельні клапани з вбудованим дроселем та електро-пневмоперетворювачем. Використання нейронечітких регуляторів відбувається лише в окремих специфічних випадках інтелектуального керування процесом випаровування, відсутні дані порівняння застосування інтелектуальних регуляторів з класичними, можливість комбінування роботи кількох типів інтелектуальних регуляторів, а також чітких засобів прогнозування їх роботи. Тому у даній роботі використано метод прогнозування для порівняння методів регулювання тиску пари в апараті, що дозволило спрогнозувати поведінку системи при формуванні керування та вивести готовий прогноз на екран оператора і, таким чином, підвищити ефективність роботи випарної станції. Зібрано статистичні дані поведінки контурів системи автоматизації у різних режимах роботи з використанням інтелектуальних та класичних регуляторів і побудовано модель прогнозування роботи випарної станції методом локальної тенденції та модифіковано алгоритм прогнозування. Перевага даного методу — легка і швидка його реалізація, яка не потребує великих економічних та енергетичних затрат. Побудовано модель прогнозування роботи випарної станції методом локальної тенденції та розроблено алгоритм прогнозування. Також оцінено точність отриманої моделі прогнозування: 97 % — для ПІД-регулятора, 97 % — для нейронечіткого регулятора та 96,5 % — для нейромережевого при використанні дев'яти інтервалів, що вище за точність при використанні шести інтервалів. Запропонована модель для прогнозування роботи випарної станції характеризується високою точністю в цілому, але

під час коливань у перехідному процесі виникає несуттєве запізнення їх прогнозування. Точність роботи даної моделі напряму залежить від збільшення кількості часових інтервалів при розробці алгоритму прогнозування.

**Ключові слова:** випарювання, тиск пари, автоматизоване керування, прогнозування.

### Вступ

Систему автоматичного керування випарною установкою можна охарактеризувати як таку, що потребує втручання оператора-технолога, який у процесі роботи вносить корективи в параметри налаштування регуляторів, що відповідають за температуру та матеріальні потоки. Такі коригування можна пояснити як зміною технологічних і якісних показників компонентів на вході випарної станції, так і необхідністю їх зміни на виході з секції. Під час внесення змін у роботу системи автоматизації оператор повинен враховувати, як суміжні секції впливають на роботу випарної станції, а також вплив випарної станції на роботу суміжних ділянок заводу [1].

Для впровадження сучасної системи автоматизації необхідно використовувати сучасні програмно-технічні засоби. Використання інтелектуальних систем в автоматизації процесу випарювання цукру передбачає появу великої кількості варіантів, деякі з яких можуть призвести до надзвичайних і аварійних ситуацій. Тому дуже важливо своєчасно попередити їх появу [2]. Для цього необхідно спрогнозувати стан даної системи. Це дозволить спрогнозувати стан системи на короткий проміжок часу вперед і приймати рішення щодо впливу на роботу технологічної ділянки [3].

Досконалість процесу випаровування — досить важливе завдання. У дослідженні [2] автор розглядає модель процесу випаровування, яка враховує баланс маси та енергії на стадіях випаровування. Однак у цьому дослідженні залишаються невирішеними питання, пов'язані з виникненням нелінійності та проблемою відхилення витрати рідини. Крім того, в даному дослідженні не розглядалася можливість використання інтелектуальних регуляторів у процесі випаровування. Причиною цього можуть бути труднощі, що виникають через необхідність використання спеціального програмного забезпечення. Дослідження [3] дає можливість подолати проблему його виникнення. У даній роботі досліджується процес лінеаризації нелінійної моделі, що складається з 14 нелінійних рівнів бурякового соку первинного порядку, яка є динамічною моделлю випарника. У цьому дослідженні вперше виявлено функцію зміни концентрації продукту від відхилення швидкості потоку рідини. Однак дослідження щодо використання інтелектуальних регуляторів не проводилося. Це може бути пов'язано з труднощами розробки баз правил для нейронних нечітких регуляторів або відсутністю відповідної моделі навчання нейронної мережі.

Випарні апарати для цукрової промисловості комплектуються, як правило, випарними апаратами з природною циркуляцією. У разі недотримання оптимального режиму в процесі випаровування виникає зниження лужності за рахунок розкладання і карамелізації сахарози, що призводить до розкладання амідів, таких як аспаргін [4]. Соки конденсатів (аміачні води) і парів з випарника містять діоксид вуглецю, оксид вуглецю та аміак. Цукровий сік містить глюкозу ( $C_6H_{12}O_6$ ), наведені вище фактори викликають зміну її властивостей. При досягненні температури глюкози  $160^\circ C$  і перебуванні її незмінною протягом тривалого часу відбувається відщеплення однієї з двох молекул води, тобто отримуємо ангідрид глюкози ( $C_6H_{10}O_5$ ), з якого утворення кристалізованого цукру неможливе. При подальшому підвищенні температури до  $220^\circ C$  (з продуктів тваринного і рослинного походження) з цукрового соку утворюється карамель без смаку або гіркий ассамар, які не здатні до ферментації. Тому утворення цукру з та-

ких речовин неможливе [1]. Отже, для запобігання перетримки та перегрівання цукрового сиропу слід забезпечити найкращі параметри контролю якості.

Необхідність оновлення існуючих систем управління вказана в роботі [5], а також представлені деякі підходи, що використовуються для розподіленого рівня управління технологічними процесами. Роз'яснення цих підходів корисно для кращого розуміння процесів, що відбуваються при формуванні керуючого впливу, особливо, коли розробники програмного забезпечення для промислових САУ використовують велику кількість налаштувань для роботи системи. Такий підхід доступний лише для кваліфікованих фахівців зі значним досвідом роботи. Проте знання про ці процеси фахівцями можуть також забезпечити більш гнучку роботу при структуруванні даних. Але ця публікація не розкриває питання використання інтелектуальних регуляторів у процесі випарювання. Можливо, це пов'язано зі складністю проведення розрахунків.

Досліджено використання методів регулювання тиску пари у випарному апараті з підсистемою прогнозування, що дозволить передбачити поведінку системи та вивести готовий прогноз, таким чином підвищити ефективність роботи випарної станції.

Мета роботи — обґрунтування методів регулювання тиску пари у випарнику з підсистемою прогнозування та дослідження залежності точності отриманого прогнозу від кількості часових інтервалів, що використовуються при його розробці. Це дасть можливість прогнозувати поведінку системи під час формування керуючої дії та виводити готовий прогноз на екран оператора, підвищуючи ефективність роботи випарної станції.

### Матеріали і методи

**Об'єкт і предмети.** Як установку для дослідження взято п'ятикорпусну випарну станцію цукрового заводу. На рис. 1 зображено схему автоматизації контурів регулювання тиску у першому корпусі випарної станції. Як датчик у першому корпусі (РТ 6а) використовуються перетворювачі тиску РС-28, що призначені для вимірювання розрідження, а також надлишкового й абсолютного тиску газів, парів і рідин. Вимірювальним елементом є п'єзорезистивна кремнієва монолітна структура, вбудована в приймач тиску, що відділений від вимірюваного середовища розділовою мембраною і заповнений спеціальною манометричною рідиною. Залита силіконовим компаундом електронна схема поміщена в корпус зі ступенем захисту з IP65 до IP68, залежно від обраного електричного з'єднання. Як вторинні прилади (PIS 6b) обрано КД140М виготовлення «ЛПЗ Львівський приладобудівний завод». Вони призначені для роботи в комплекті з невзаємозамінними первинними перетворювачами (датчиками), що перетворюють вимірювані неелектричні величини (тиск, витрата, рівень, вакуум) в вихідний сигнал змінного струму ( $340 \pm 30$  мВ (при струмі 250 мА) на 1 мм переміщення плунжера датчика.

Сигнал надходить до контролера (PLC) на блок керування (перехрестя з С), а також до людино-машинного інтерфейсу (SCADA), в якому відбувається відображення значення тиску у корпусах випарної станції на екрані автоматизованого робочого місця оператора (комп'ютера) (перетин з І). Отримані дані зберігаються у пам'яті (R). Ці дані (фактичні значення тиску у корпусах випарної станції) використовуються для проведення даного експерименту. Якщо значення тиску у корпусах випарної станції перевищує встановлені межі, то генерується сигнал тривоги (А). Сигнал керування, який виведено контролером (АО), надходить до електропневматичного перетворювача (PY 6d), що перетворює аналоговий уніфікований електричний сигнал. У свою чергу, виконавчий механізм (наприклад, 1g)

змінює положення регулюючих клапанів. Оператор може контролювати положення регулятора в дистанційному (ручному) режимі (перехрестя з С — дистанційне керування від оператора SCADA). Для перемикання режиму «Ручний/Автомат» (HS 6с, HC 6с) використано блоки ручного управління моделі БРУ-17, застосовуються для ручного управління аналоговим сигналом та аналоговим виконавчим механізмом. Має один аналоговий вхід з підтримкою уніфікованого сигналу 0-5 мА, 0-20 мА або 0-10 В та один аналоговий вихід з підтримкою уніфікованого сигналу 0-5 мА, 0-20 мА або 0-10 В. Підтримує інтерфейси і протоколи мережі RS-485 та ModBus. Як контролер використовується Modicon M340 — промисловий логічний контролер для виробників машин, малих і середніх систем автоматизації. Підтримує 4 Мб пам'яті для збереження програм та 256 Кб — для збереження даних. Оснащений вбудованими комунікаціями типу шина CANopen, підтримує мережу Ethernet TCP/IP, послідовний інтерфейс RTU та символічний інтерфейс ASCII. Як виконавчі механізми використано пневматичні сидельні клапани (6е) Danfoss VFG33 з вбудованим дроселем та електропневмоперетворювачем [4].

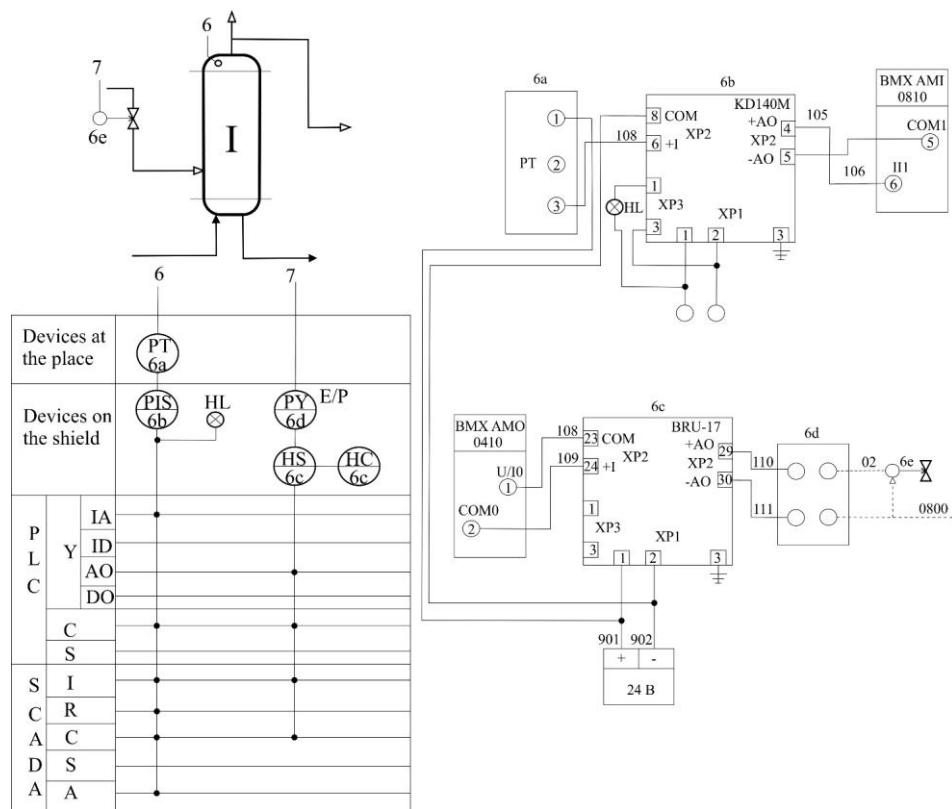


Рис. 1

Як видно з рис. 2, система має двохрівневу структуру: технологічного процесу та виробництва. На рівні технологічного процесу (ТП) в систему входить дві підсистеми:

- автоматизована система управління випарною станцією (АСУТП ВИП);
- автоматизована система управління вакуум-апаратом (АС1 ВАП).

Підсистема АС1 функціонує на виробництві як повністю автономна і після модернізації має бути включена в загальну структуру інтегрованої автоматизованої системи управління виробництвом (ІАСУВ).

Підсистема АСУТП ВИП, яка розробляється як складова ІАСУВ для управління технологічним процесом приготування цукру, має трьохрівневу структуру:

- рівень датчиків (датчики, перетворювачі частоти PDS, розподілені засоби вводу/виводу);
- рівень контролерів (ПЛК ВИП);
- рівень SCADA/НМІ (ПК ВИП).

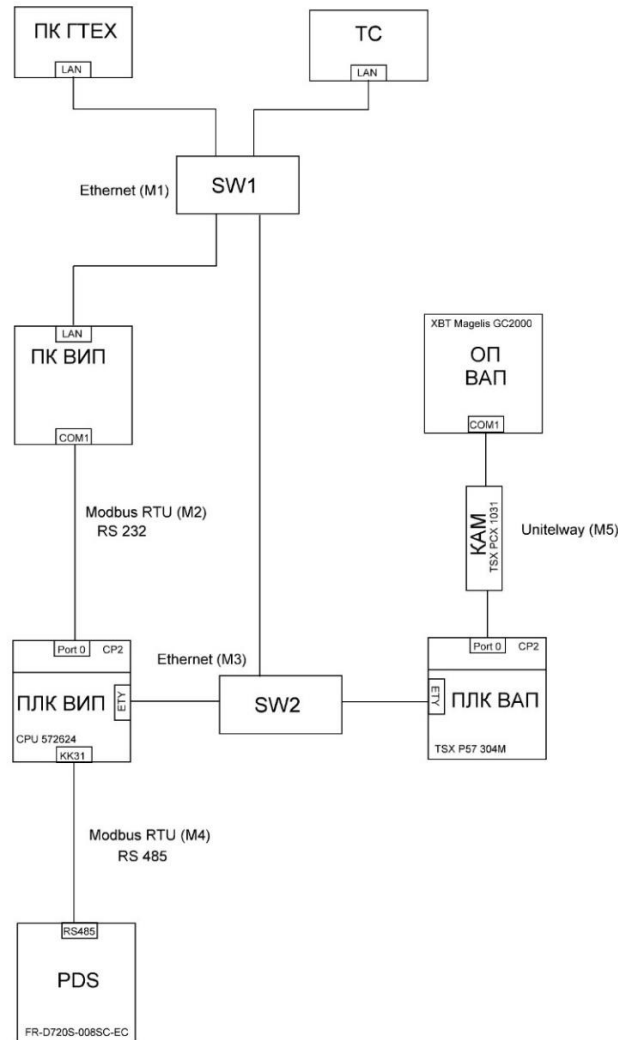


Рис. 2

### Опис прогнозування методом локальних тенденцій

Прогнозування роботи контурів регулювання тиску пари випарної станції за методом локальних тенденцій відбувається за допомогою нечітких моделей часових рядів [6].

Для отримання прогнозованої локальної тенденції генерується модель нечіткого часового ряду [7]. Для цього використано модель (рис. 3) нечіткого динамічного процесу з нечітким приростом, який виглядає наступним чином:  $X_t (t = 1, 2, \dots) \subset R^1$  — універсальна множина, для якої визначено нечіткі множини  $\tilde{x}_t^i, (i = 1, 2, \dots), \tilde{v}_t^j, (j = 1, 2, \dots), \tilde{a}_t^s, (s = 1, 2, \dots)$  [8];

```

1  #include <stdio.h>
2  #include <vcl.h>
3  #include <iostream.h>
4  #pragma hdrstop
5
6  //-----
7
8  #pragma argsused
9  int main(int argc, char* argv[])
10 {
11     x_i=Fuzzy(x_i);
12     u_i=TTend(x_i,x_(i-1));
13     u_(i+1)=f_u(u_i);
14     a_i=RTend(a_i,a_(i-1));
15     a_(i+1)=f_a(a_i);
16     x_(i+1)=Comp(x_(i+1),u_(i+1),a+1);
17     x_(i+1)=DeFuzzy(x_(i+1))+e_(i+1);
18
19     return 0;
20 }

```

Рис. 3

Fuzzy — операція фазифікації шкали; TTend — операція визначення типу відмінності; RTend — операція виявлення інтенсивності відмінності; Comp — операція розрахунку нової нечіткої оцінки; DeFuzzy — операція дефазифікації шкали;  $\tilde{f}_v, \tilde{f}_a$  — нечіткі залежності представлені у вигляді композитного правила імплікації;  $x_{i+1}, e_{i+1}$  — числова оцінка та помилка прогнозованого рівня часового ряду.

Далі розраховується сума інтенсивностей нечітких елементарних тенденцій для кожного інтервалу, в результаті чого отримуємо алгоритм нечітких локальних тенденцій для даного випадку [8], для цього задається значення параметрів моделі часового ряду першого порядку [9].

Для прогнозування роботи контурів регулювання тиску пари випарної станції необхідно перетворити початковий часовий ряд у нечіткий часовий ряд. Далі необхідно перетворити отриманий нечіткий часовий ряд у часовий ряд нечіткої елементарної тенденції та провести дефазифікацію методом центру тяжіння інтенсивності кожної нечіткої елементарної тенденції по кожному часовому ряду ( $a_t = \text{DeFuzzy}(\tilde{a}_t)$ ) [10].

Проаналізуємо стабільність моделі прогнозування. Відбувається запуск системи автоматизації п'ятикорпусної випарної станції (див. рис. 1), після чого зі SCADA-системи знімаються графіки перехідного процесу та прогнозованих значень під час роботи установки [8]. Далі графіки розділяються на довільну кількість рівних часових інтервалів [11]. Кожен часовий інтервал відділяється від наступного крапкою, позначеною латинською літерою. Значення, якому відповідає перехідний процес у даний момент часу, є фактичним, а значення, якому відповідає графік з прогнозованими значеннями у даний момент часу, — прогнозованим. Всі ці значення заносяться до табл. 1, а також розраховуються і заносяться значення абсолютної і відносної похибки прогнозування для кожної точки [8].

Таблиця 1

№	a	b	c	d	g
ПЦД-регулятор (7 точок)					
1	A	0	0	0	9,5
2	B	0,3	0,31	0,01	
3	C	0,26	0,22	0,04	
4	D	0,25	0,22	0,03	
5	E	0,25	0,22	0,03	
6	F	0,25	0,22	0,03	
7	G	0,25	0,22	0,03	
Точність моделі прогнозування (4):					90,5 %

ПД-регулятор (10 точок)					
1	A	0	0	0	3
2	B1	0,26	0,26	0	
3	C1	0,3	0,31	0,01	
4	D1	0,28	0,29	0,01	
5	E1	0,26	0,27	0,01	
6	F1	0,25	0,26	0,01	
7	G1	0,25	0,26	0,01	
8	H1	0,25	0,26	0,01	
9	I1	0,25	0,26	0,01	
10	J1	0,25	0,26	0,01	
Точність моделі прогнозування (4):					97 %
Нейромережевий регулятор (7 точок)					
1	A	0	0	0	8,4
2	B	0,24	0,27	0,03	
3	C	0,26	0,24	0,02	
4	D	0,26	0,24	0,02	
5	E	0,26	0,24	0,02	
6	F	0,26	0,24	0,02	
7	G	0,26	0,24	0,02	
Точність моделі прогнозування (4):					91,6 %
Нейромережевий регулятор (10 точок)					
1	A	0	0	0	3,5
2	B1	0,26	0,27	0,01	
3	C1	0,26	0,25	0,01	
4	D1	0,24	0,23	0,01	
5	E1	0,26	0,27	0,01	
6	F1	0,26	0,27	0,01	
7	G1	0,26	0,27	0,01	
8	H1	0,26	0,27	0,01	
9	I1	0,26	0,27	0,01	
10	J1	0,26	0,27	0,01	
Точність моделі прогнозування (4):					96,5 %
Нейронечіткий регулятор (7 точок)					
1	A	0	0	0	7
2	B	0,25	0,27	0,02	
3	C	0,25	0,23	0,02	
4	D	0,25	0,23	0,02	
5	E	0,25	0,23	0,02	
6	F	0,25	0,23	0,02	
7	G	0,25	0,23	0,02	
Точність моделі прогнозування (4):					93 %
Нейронечіткий регулятор (10 точок)					
1	A	0	0	0	3
2	B1	0,27	0,27	0	
3	C1	0,26	0,27	0,01	
4	D1	0,24	0,24	0	
5	E1	0,25	0,26	0,01	
6	F1	0,25	0,26	0,01	
7	G1	0,25	0,26	0,01	
8	H1	0,25	0,26	0,01	
9	I1	0,25	0,26	0,01	
10	J1	0,25	0,26	0,01	
Точність моделі прогнозування (4):					97 %

Розглянемо позначення:  $a$  — назва точки,  $b$  — прогнозоване значення, %;  $c$  — фактичне значення, %;  $d$  — абсолютна похибка, %;  $g$  — середня відносна похибка прогнозування (SVP).

Значення абсолютної похибки ( $A$ ) розраховується за формулою

$$A = |Z(t) - \tilde{Z}(t)|, \quad (1)$$

де  $Z(t)$  — фактичне значення часового ряду,  $\tilde{Z}(t)$  — прогнозне значення часового ряду.

Значення відносної похибки ( $V$ ) для кожного значення точки часового ряду розраховується за формулою

$$V = \frac{|Z(t) - \tilde{Z}(t)|}{Z(t)} \times 100 \%. \quad (2)$$

Після цього оцінюємо точність системи. Відбувається запуск системи автоматизації п'ятикорпусної випарної станції (див. рис. 1), обирається тип регулювання, зі SCADA-системи знімаються графіки перехідного процесу та прогнозованих значень під час роботи установки. Далі графіки розділяються на довільну кількість рівних часових інтервалів [11]. Кожен часовий інтервал відділяється від наступного крапкою, позначеною латинською літерою. Значення, якому відповідає перехідний процес у даний момент часу, є фактичним, а значення, якому відповідає графік з прогнозованими значеннями у даний момент часу, — прогнозованим. Всі ці значення заносяться до табл. 2. Значення абсолютних похибок розраховуються за формулою (1).

Таблиця 2

Name	Value	Range changes	$C$	$I$	$A$	$R$
PE1	0,25 МПа	0-0,4 МПа	$\pm 0,05$ МПа	5 с	$> 0,3$ МПа $< 60$ °C	10 с, 1 міс
PE5	0,052 МПа	0-0,1 МПа	$\pm 0,001$ МПа	5 с	$> 0,1$ МПа $< 60$ °C	10 с, 1 міс

Тут  $I$  — відображення параметра;  $C$  — автоматизоване регулювання, вказана допустима статична похибка;  $A$  — сигналізація, вказані умови спрацювання;  $R$  — архівування, вказана періодичність запису та глибина архіву.

$$SVP = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|Z(t) - \tilde{Z}(t)|}{Z(t)} \times 100 \%. \quad (3)$$

Середня відносна похибка прогнозування (SVP) розраховується за формулою (3) [9].

Точність моделі прогнозування ( $T$ ) розраховується за формулою

$$T = 100\% - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n V. \quad (4)$$

З метою визначення впливу кількості обраних часових інтервалів на точність моделі проведемо дослід, кілька разів змінюючи кількість часових інтервалів на графіках перехідних процесів регулювання тиску пари випарної станції.

Чим ближче до 100 % наближається показник точності моделі ( $T$ ), тим точнішою є модель [9].

### Синтез алгоритму локальних тенденцій

Розглянемо роботу алгоритму локальних тенденцій та випарної станції. У роботі [11] описується управління декількома випарними станціями з повною інтег-



рацією нечіткого керування та використанням бездротових мережевих датчиків та виконавчих механізмів. Проте порівняння використання нейронечітких регуляторів з іншими типами інтелектуального регулювання та обґрунтування доцільності або недоцільності використання саме такого типу регулювання у випадку можливості впровадження системи з іншим типом інтелектуального керування не проводиться. Крім того, нейронечітке регулювання у даному дослідженні застосовується не для всіх контурів регулювання. Причиною цього може бути висока складність та вартість проведення такого дослідження.

У роботі [12] також розглядаються варіанти удосконалення процесу випаровування та проводяться складні розрахунки. У [13] автори доводять, що швидкість випаровування помітно зменшується з часом, та проводять розрахунок, який показує, що дифузія в рідкій фазі є кроком, що обмежує швидкість для цієї системи, на відміну від випаровування чистої води. У роботі [14] розроблено узагальнену стаціонарну математичну модель для моделювання системи багатоканального випарника. У [15] розглядаються проблеми виявлення несправностей промислових процесів з використанням динамічних нейронних мереж на прикладі випарного апарата. Розглянута нейронна мережа має багаторівневу структуру подачі. У роботі [16] автор досліджує застосування оптимізації в реальному часі в секції випаровування з використанням методів, що скорочують час на розробку моделей. У [17] автори розглядають використання генетичних алгоритмів у цукровому виробництві. У дослідженні [18] аналізується розробка структури автоматизованої системи управління з використанням тензорних методів у цукровому виробництві. Проте автори даних робіт також не застосовують інтелектуальне регулювання. Причиною цього може бути висока складність проведення розрахунків або відсутність необхідного технічного чи програмного забезпечення.

У роботі [6] автор стверджує, що за допомогою інтелектуального управління можна забезпечити більш швидке зниження температури корпусу і досягти більш стабільного контролю перегріву в першому резервуарі випарника. Але у даній роботі також відсутнє розкриття питання використання інтелектуальних регуляторів для регулювання інших параметрів (наприклад, тиск, рівень бурякового соку, витрата). Крім того, у даній роботі розглядається лише можливість використання інтелектуальних регуляторів у інших корпусах, крім першого. Можливо, причиною цього стала висока складність розрахунків та необхідність використання специфічного програмного забезпечення. Проблему контролю інших параметрів процесу випаровування розглянуто в [7]. У вказаній роботі доведено, що контроль випарювання може бути реалізований шляхом рециркуляції рідини в секції випаровування або шляхом подачі тільки рідини у випарник; питання використання інтелектуальних регуляторів у процесі випаровування не розглянуто.

Необхідно вдосконалити модель прогнозування роботи випарної станції методом локальної тенденції та алгоритм прогнозування і визначити вплив алгоритму на точність та стабільність отриманої моделі прогнозування.

Для роботи з алгоритмом локальних тенденцій задаємо наступні залежності параметрів [9] (рис. 4).

У даній моделі відбувається визначення абсолютної нечіткої оцінки  $\tilde{x}_i$  за допомогою фазифікації шкали за значенням оцінюваного об'єкта  $x_i$ . Далі йде операція з визначення типу відмінностей і процес визначення інтенсивності відмінностей. Після цього розраховується нова абсолютна нечітка оцінка [19]. Останнім кроком є дефазифікація шкали за визначенням оцінюваного об'єкта  $x_i$  за абсолютною нечіткою оцінкою  $\tilde{x}_i$ .

Розроблено двоступінчастий алгоритм вибору моделі прогнозування часового ряду. Розраховуємо суму інтенсивностей нечітких елементарних тенденцій для кожного інтервалу наступним чином [8].

```

20 if P_up (t_t)=true then ST_up=ST_up+a_t;
21 if P_down (t_t)=true then ST_down=ST_down+a_t;
22 if ST_up=0 and ST_down=0 then
23 u=""Stable\","a=0,"
24 if ST_up≥2·ST_down then
25 u=""Up\","a=abs"(ST_up-ST_down);
26 if ST_down≥2·ST_up then
27 u=""Down\","a=abs"(ST_up-ST_down);
28 if 0,9·ST_up≤ST_down≤1,2·ST_up
29 or 0,9·ST_down≤ST_up≤1,2·ST_down
30 then u=""Regular\","a="(ST_up+ST_down)/2;
31 else u=""Chaos\","a=abs"(ST_up-ST_down);
32 a=Fuzzy(a);

```

Рис. 4

За допомогою алгоритму локальних тенденцій можна проводити оцінку локальних тенденцій з використанням лінгвістичної та числової форм [10], де  $P$  — кінцева множина точок на інтервалі  $n$  (кінцева множина тенденцій),  $ST$  — часовий інтервал протяжності нечіткої тенденції. Для роботи даного алгоритму необхідно перетворити початковий часовий ряд на нечіткий часовий ряд [20], використовуючи модель, наведену на рис. 1. Наступним кроком виконання даного алгоритму є розділення отриманого часового ряду на певну кількість інтервалів. На кожному інтервалі розраховується сума інтенсивностей однотипних нечітких елементарних тенденцій. Далі, порівнюючи часові інтервали при зростанні ( $ST_{up}$ ) та спаданні ( $ST_{down}$ ) часових інтервалів протяжності нечіткої тенденції, обирається тип локальної тенденції («Стабільна», «Зростаюча» тощо) [19].

Даний алгоритм не потребує додаткової інтерпретації користувачем. Недоліком даного алгоритму є обмеження його роботи кількістю попередньо заданих часових інтервалів, через що кількість ідентифікованих локальних тенденцій рівна кількості заданих розробником інтервалів [10]. Даний алгоритм дозволяє отримати часові ряди, які можуть використовуватися для прогнозування локальних тенденцій [14]. Перевага даного алгоритму — можливість скорочення бази знань, яку можна представити у вигляді сукупності правил, що генеруються за нечітким часовим рядом [8].

### Аналіз і синтез керування випарною станцією з використанням методів прогнозування

Пропонуємо використати структурну схему регулювання [21], модифікувавши її таким чином, щоб включити до неї можливість прогнозування [9] та зміни типу регулювання [22].

Структурна схема регулювання наведена на рис. 5, де  $Y_z(t)$  — сигнал завдання,  $e(t)$  — розузгодження між сигналом завдання та зворотним зв'язком,  $u(t)$  — керуючий сигнал,  $v(t)$  — зовнішнє збурення,  $Y(t)$  — вихідний сигнал,  $Y_m(t)$  — вихідний сигнал з моделі об'єкта.

Більш детально роботу інтелектуальних регуляторів, на прикладі нечітких, розглянуто у роботі [21], де нечіткий ПІД-контролер досліджується як дискретний варіант звичайного ПІД-контролера, тому зберігає таку ж структуру, але має самостійний регульований коефіцієнт управління. Доведено, що можна вдосконалити класичний ПІД-регулятор з певною адаптивною здатністю керування. Але його не можна вважати повноцінним нейронечітким регулятором. Крім того, у даній

роботі також не розглянуто використання інших типів інтелектуальних регуляторів. Можливою причиною цього може бути витратна частина у проведенні досліджень. Детальніше проблематику використання нейронечітких регуляторів розглянуто в [23]. Дана робота представляє новий ПІД-регулятор нечіткої логіки. Цей регулятор є нечітким ПІД-контролером з обчислювальною ефективною аналітичною схемою. Автор доводить, що контролер стабільний з обмеженим входом/обмеженим виходом, проте даний регулятор дуже складний у реалізації, а також у даній роботі не наведено можливість використання інших типів інтелектуальних регуляторів. Крім того, відсутня можливість використання його для деяких параметрів регулювання. Також у жодній з наведених вище робіт необґрунтована необхідність оновлення існуючих систем автоматизації випарної станції. Можливою причиною цього може бути також витратна частина у проведенні досліджень. Використання нейронечітких регуляторів розглянуто у [18], де описано один з наявних методів вдосконалення систем керування — додавання нечіткої і нейронечіткої логіки. Методи динамічного контролю потужності аналізувалися з використанням нечіткої логіки та адаптивних нейронних мереж. Одним з можливих варіантів регулювання потужності є використання нечітких висновків (так званої нечіткої системи). Керуюча дія формується шляхом перевірки узгодженості нечітких правил на фактичні параметри системи. Правила створюються відповідно до досвіду оператора, що відображає його/її дії при зміні технологічних параметрів, але дана робота не розглядає використання нейронечітких регуляторів у процесі випаровування. Крім того, не розглянуто інші типи інтелектуального регулювання.

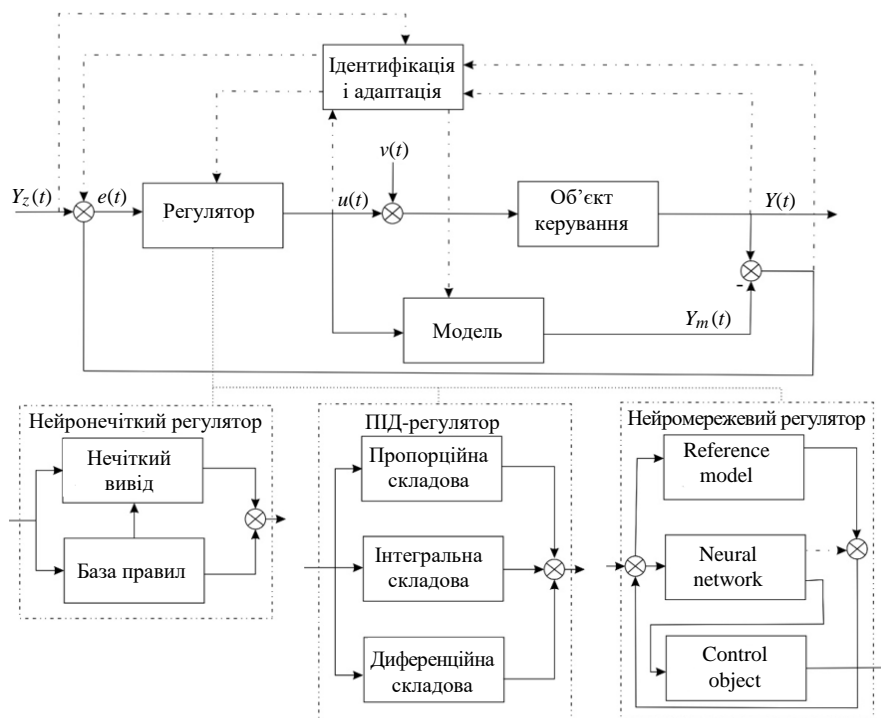


Рис. 5

### Аналіз роботи алгоритму прогнозування тиску пари у випарній станції

Результат виконання алгоритму (див. рис. 4) прогнозування тиску пари у першому корпусі випарної станції з використанням нейронечіткого регулю-

вання наведено на рис. 6. У табл. 1 знаходяться результати розрахунків для тиску пари у першому корпусі випарної станції з використанням ПД, нейронечіткого та нейромережевого регуляторів. Тому можна зробити висновок, що оскільки значення  $SP$  від'ємне, то прогноз завищено відносно фактичних даних [9]. Це відповідає дійсності, оскільки прогноз показує невелику абсолютну похибку в 1 % при використанні нейронечіткого регулювання, а при фактичному використанні даного типу регулювання вона відсутня, проте таке завищення несуттєве, що видно з показника середньої відносної похибки прогнозування [8].

В теорії, при застосуванні середньої відносної похибки при оцінці точності моделі прогнозування процесу випаровування, значення точності прогнозу може досягати відмітки у 100 % [9]. Це означає, що обрана модель прогнозування описує процес з абсолютною точністю [10]. На практиці таке явище майже неможливе, оскільки прогноз не може врахувати абсолютно всі чинники, які впливають на систему автоматизації [19]. У випадку, коли значення точності прогнозу наближається до нуля, дана модель зовсім не описує прогнозований процес [24].

Показник точності прогнозу також використовується з метою вибору оптимальної моделі прогнозування. Оптимальною вважається та модель, точність якої найбільше наближається до 100 % [9], оскільки вона з більшою вірогідністю дасть точніший прогноз.

У даному випадку значення середньої відносної похибки становить 9 %, тому звідси випливає, що точність моделі становить 95 %, що є дуже високою оцінкою якості нашої системи прогнозування. Оскільки точність моделі прогнозування близька до 100 %, то її можна вважати оптимальною [8].

Оскільки в усіх трьох випадках (використання ПД, нейромережевого та нейронечіткого регуляторів) показник точності з використанням десяти точок (дев'ятичасових інтервалів) при прогнозуванні вищий за показник точності при використанні семи точок (шестичасових інтервалів), то можна зробити висновок, що при збільшенні кількості інтервалів під час розробки алгоритму прогнозування підвищується точність прогнозу результату.

Для того щоб правильно розуміти, наскільки можна довіряти отриманому алгоритму прогнозування процесу випарювання, необхідно також оцінити точність отриманого прогнозу [9]. На рис. 6 наведено порівняння прогнозованого значення зміни тиску пари у першому корпусі випарної станції з використанням ПД, нейронечіткого та нейромережевого регуляторів та фактичної зміни тиску пари.

Порівняємо перехідні процеси прогнозованого та фактичного тисків пари у першому корпусі випарної станції з використанням: а) ПД; б) нейронечіткого; в) нейромережевого регуляторів (1 — прогнозоване значення тиску пари з використанням шести інтервалів, 2 — прогнозоване значення тиску пари з використанням дев'яти інтервалів, 3 — фактичне значення тиску пари (ПД-регулятор), 4 — фактичне значення тиску пари (нейронечіткий регулятор), 5 — фактичне значення тиску пари (нейромережевий регулятор), АВ, ВС, CD, ..., ПП1 — інтервали часового ряду).

В інших дослідженнях велика частина проблематики інтелектуального керування в процесі випаровування залишається невирішеною. Використання нейронечітких регуляторів відбувається лише в окремих специфічних випадках. Крім того, відсутнє порівняння використання інтелектуальних регулято-

рів з класичними, також не висвітлені можливості комбінування роботи кількох типів інтелектуальних регуляторів у разі виникнення необхідності. Також не вказані чіткі засоби прогнозування роботи інтелектуальних регуляторів.

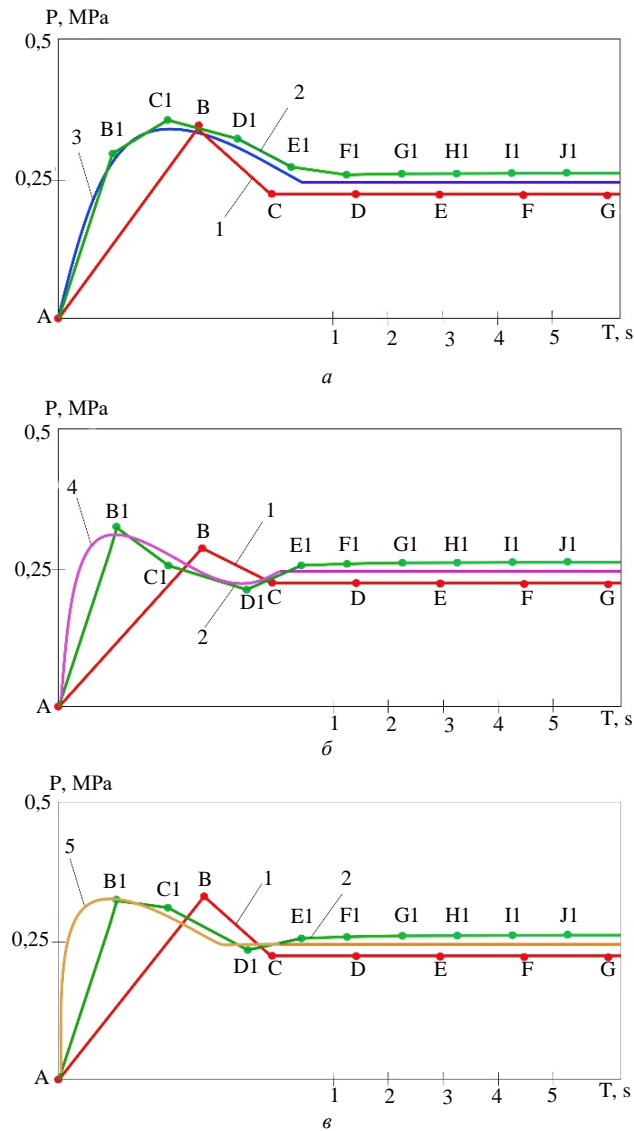


Рис. 6

У даному дослідженні використано метод прогнозування для порівняння методів регулювання тиску пари в апараті, що дозволяє спрогнозувати поведінку системи при формуванні керування та вивести готовий прогноз на екран оператора і таким чином підвищити ефективність роботи випарної станції. Перевага даного методу — легка і швидка його реалізація, яка не потребує великих економічних та енергетичних затрат, недолік — необхідність розбиття перехідного процесу на окремі часові проміжки числового ряду вручну та пряма залежність точності моделі від кількості елементів часового ряду.

### Розробка системи обміну даними між рівнем технологічного процесу і рівнем виробництва

Для обміну даними між рівнем технологічного процесу і рівнем виробництва використовуємо SQL-запити. Для визначення формату побудови

SQL-запитів необхідно ознайомитись з форматом збереження даних системою SCADA. Фрагмент збереження даних наведено у табл. 2.

Таким чином, будуємо SQL-запити.

```
select * from SCADA  
WHERE Name = 'PE1'
```

Такий запис означає отримання всіх записів у SCADA, які стосуються параметра PE.

Для того щоб отримувати всі значення, крім певного параметра (наприклад, PE1), будуємо наступний запит.

```
select * from SCADA  
WHERE Name NOT IN ('PE1')
```

Для того щоб отримати одразу кілька параметрів, будуємо запити наступним чином.

```
select * from SCADA  
WHERE Name = 'PE1' OR Name IN ('PE5')
```

Для сортування таблиці за певним параметром розроблено такий запит.

```
select * from SCADA  
ORDER BY Value
```

За необхідності можна розробити записи з додатковими SQL-запитами.

### **Висновок**

У результаті дослідження великої кількості джерел зроблено висновок, що велика частина проблематики інтелектуального керування у процесі випаровування залишається невирішеною. Використання нейронечітких регуляторів відбувається лише в окремих специфічних випадках, тому побудовано модель прогнозування роботи випарної станції методом локальної тенденції та розроблено алгоритм прогнозування.

Побудовано модель прогнозування роботи випарної станції методом локальної тенденції та розроблено алгоритм прогнозування. Також оцінено точність отриманої моделі прогнозування з використанням шести- та дев'ятичасових інтервалів. Точність моделі прогнозування при використанні дев'ятичасових інтервалів склала 97 % для ПД-регулятора, 97 % — для нейронечіткого регулятора та 96,5 % для нейромережевого, що є високими показниками. Точність моделі прогнозування при використанні шестичасових інтервалів склала 90,5 % — для ПД-регулятора, 93 % — для нейронечіткого регулятора та 91,6 % — для нейромережевого, тобто даний показник нижчий за варіант з використанням дев'ятичасових інтервалів. Оскільки у всіх трьох випадках (використання ПД, нейромережевого та нейронечіткого регуляторів) показник точності з використанням десяти точок (дев'ятичасових інтервалів) при прогнозуванні вищий за показник точності при використанні семи точок (шестичасових інтервалів), то можна зробити висновок, що при збільшенні кількості інтервалів під час розробки алгоритму прогнозування підвищується точність прогнозу в результаті. Перевага даної моделі — висока точність в цілому, але недоліком є те, що при коливаннях у перхідному процесі виникає несуттєве запізнення їх прогнозування.

Зібрано статистичні дані поведінки контурів системи автоматизації у різних режимах роботи з використанням інтелектуальних та класичних регуляторів і побудовано модель прогнозування роботи випарної станції методом локальної тен-

денції та розроблено алгоритм прогнозування. Перевага даного методу — легка і швидка його реалізація, яка не потребує великих економічних та енергетичних затрат, недолік — необхідність розбиття перехідного процесу на окремі часові проміжки числового ряду вручну та пряма залежність точності моделі від кількості елементів часового ряду.

Розроблено систему обміну даними між рівнем технологічного процесу і рівнем виробництва з використанням SQL-запитів. Для визначення формату побудови SQL-запитів використовувався формат збереження даних системою SCADA.

*M. Hrama, V. Sidletskyi*

## COMPARISON OF THE FORECASTING SUBSYSTEMS FUNCTIONING IN THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF EVAPORATOR

**Mykhailo Hrama**

National University of Food Technology, Kyiv,

*mpgmay6@gmail.com*

**Viktor Sidletskyi**

National University of Food Technology, Kyiv,

*sidlekyivm@nuft.edu.ua*

The purpose of the presented research is to substantiate the methods of steam pressure regulation in the evaporator with the forecasting subsystem, which will allow predicting the behavior of the system and the study of the influence of the number of time intervals of the forecasting algorithm on the accuracy of the forecast of the evaporating plant operation. Development of a data exchange system between the level of the technological process and the level of production. The operation of the evaporator with the forecasting subsystem of steam pressure regulation is investigated. In the steam pressure control automation scheme, PC-28 pressure transducers are used as sensors. Pneumatic seat valves with a built-in throttle and an electro-pneumatic transducer are used as executive mechanisms. The use of neurofuzzy regulators occurs only in some specific cases of intelligent control of the evaporation process, there are no data comparing the use of intelligent regulators with classical ones, the possibility of combining the operation of several types of intelligent regulators, as well as clear means of predicting their operation. Therefore, in this work, the forecasting method was used to compare the methods of regulating the steam pressure in the apparatus, which made it possible to predict the behavior of the system during the formation of the control action and to display the ready forecast on the operator's screen and, thus, to increase the efficiency of the evaporation station. Statistical data on the behavior of automation system circuits in different operating modes using intelligent and classical regulators were collected, and a forecasting model of the operation of the evaporation plant was built using the local trend method, and the forecasting algorithm was modified. The advantage of this method is its easy and quick implementation, which does not require large economic and energy costs. A model for forecasting the operation of the evaporation plant was built using the local

trend method and a forecasting algorithm was developed. The accuracy of the obtained prediction model was also evaluated. The accuracy of the prediction model was 97 % for the PID controller, 97 % for the neurofuzzy controller, and 96,5 % for the neural network when using 9 intervals, which is higher than the accuracy when using 6 intervals. The proposed model for predicting the operation of the evaporation plant is characterized by high accuracy as a whole, but during the occurrence of fluctuations in the transient process, there is an insignificant delay in forecasting these fluctuations. The accuracy of this model directly depends on the increase in the number of time intervals during the development of the forecasting algorithm.

**Keywords:** evaporation, vapor pressure, automated control, forecasting.

## REFERENCES

1. Hrama M., Sidletskyi V., Elperin I. Comparison between PID and fuzzy regulator for control evaporator plants. *2019 IEEE 39th International Conference on electronics and nanotechnology (ELNANO). Conference proceedings*. 2019. P. 54–59. DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783428.
2. Chantasiriwan S. Distribution of juice heater surface for optimum performance of evaporation process in raw sugar manufacturing. *Journal of Food Engineering*. 2017. **195**. P. 21–30. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.09.014.
3. Verma O., Gaurav M., Vinay K. Simulation and control of a complex nonlinear dynamic behavior of multi-stage evaporator using PID and Fuzzy-PID controllers. *J. Comput. Sci.* 2018. **25**. P. 238–251. DOI:10.1016/j.jocs.2017.04.001.
4. Hrama M., Sidletskyi V., Elperin I. Justification of the neuro-fuzzy regulation in evaporator plant control system. *Ukrainian Food Journal*. 2019. **8**. P. 873–890. DOI: 10.24263/2304-974x-2019-8-4-17.
5. Сідлецький В., Ельперін І., Полупан В. Аналіз невимірюваних параметрів на рівні розподіленого керування для автоматизованої системи, об'єктів і комплексів харчової промисловості. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2016. **22**(3). С. 7–15. Режим доступу: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/23714>.
6. Jolly P.G., Tso C.P., Chia P.K., Wong Y.W. Intelligent control to reduce superheat hunting and optimize evaporator performance in container refrigeration. *HVAC&R Research*. 2000. **6**. P. 243–255. DOI: 10.1080/10789669.2000.10391261.
7. Lahtinen S. Identification of fuzzy controller for use with a falling-film evaporator. *Food Control*. 2001. **12**. P. 175–180. DOI:10.1016/S0956-7135(01)00004-4.
8. Dong Q., Sun Y., Li P. A novel forecasting model based on a hybrid processing strategy and an optimized local linear fuzzy neural network to make wind power forecasting: A case study of wind farms in China. *Renewable Energy*. 2017. **102**. P. 241–257. DOI: 10.1016/j.renene.2016.10.030.
9. Lei H., Xia Y., Qin X. Estimation of semivarying coefficient time series models with ARMA errors. *Annals of Statistics*. 2016. **44**. P. 1618–1660. DOI: 10.1214/15-AOS1430.
10. Anghinoni L., Zhao L., Ji D., Pan H. Time series trend detection and forecasting using complex network topology analysis. *Neural Networks*. 2019. **117**. P. 95–306. DOI: 10.1016/j.neunet.2019.05.018.
11. González-Potes A., Mata-López W., Ochoa-Brust A., Escobar-del Pozo C. Smart control of multiple evaporator systems with wireless sensor and actuator networks. *Energies*. 2016. **9**. P. 1–24. DOI:10.3390/en9030142.
12. Srivastava D., Mohanty B., Bhargava. R. Modeling and simulation of mee system used in the sugar industry. *Chemical Engineering Communications*. 2013. **200**. P. 1089–1101. DOI:10.1080/00986445.2012.737876.
13. Roger K., Sparr E., Wennerström H. Evaporation, diffusion- and self-assembly at drying interfaces. *Physical chemistry chemical physics: PCCP*. 2018. **20**. P. 10430–10438. DOI: 10.1039/c8cp00305j.
14. Hrama M., Sidletskyi V., Elperin I. Intelligent automatic control of sugar factory evaporator operation using behavior prediction subsystem. *Ukrainian Food Journal*. 2022. **11**(1). P. 148–163. DOI: 10.24263/2304-974x-2022-11-1-14.



15. Patan K., Parisini T. Identification of neural dynamic models for fault detection and isolation: the case of a real sugar evaporation process. *Journal of Process Control*. 2005. **15**(1). P. 67–79. DOI:10.1016/j.jprocont.2004.04.001.
16. Merino A., Acebes L., Alves R., de Prada C. Real Time Optimization for steam management in an evaporation section. *Control Engineering Practice*. 2018. **79**. P. 91–104. DOI:10.3390/pr7080537.
17. Polupan V., Sidletsykyi V. Genetic algorithm usage for optimization of saturator operation. *Ukrainian Food Journal*. 2018. **7**(4). P. 754–762. DOI: 10.24263/2304-974X-2018-7-4-18.
18. Sidletsykyi V., Korobiichuk I., Ladaniuk A., Elperin I., Rzeplinska-Rykala. K. Development of the structure of an automated control system using tensor techniques for a diffusion station. *AUTOMATION 2019*. 2019. P. 175–185. DOI: 10.1007/978-3-030-13273-6\_18.
19. Tensorized LSTM with adaptive shared memory for learning trends in Multivariate. D. Xu, C. Wei, Z. Bo, S. Dongjin, N. Jingchao, Y. Wenchao, L. Yanchi, C. Haifeng, Z. Xiang. *Time Series. AAAI*. 2020. **34**(2). P. 1395–1402. DOI:10.1609/aaai.v34i02.5496.
20. Mehmood B., Hussain L., Mahmood A., Lone K. Artificial Intelligence based accurately load forecasting system to forecast short and medium-term load demands. *Mathematical biosciences and engineering: MBE*. 2020. **18**(1). P. 400–425. DOI: 10.3934/mbe.2021022.
21. Tang W., Man K., Chen G., Kwong S. An optimal fuzzy PID controller. *IEEE Trans. Ind. Electron*. 2001. **48**. P. 757–765, DOI:10.1109/41.937407.
22. Лапін М.В., Сідлецький В.М. Використання систем нечіткої логіки для динамічного управління потужністю парових котлоагрегатів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2016. **22**(4). С. 24–31.
23. Carvajal J. Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis. *Inf. Sci*. 2000. **123**. P. 249–270. DOI:10.1016/S0020-0255(99)00127-9.
24. Chowdhury J., Nguyen B., Thornhill D. Modelling of evaporator in waste heat recovery system using finite volume method and fuzzy technique. *Energies*. 2015. **8**. P. 14078–14097. DOI: 10.3390/en81212413.

Отримано 28.10.2022