

УДК 678.027.3

ЖУЧЕНКО О. А., асистент  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ ПУСКУ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ

Наведено новий спосіб моделювання режиму пуску екструзії полімерів, що базується на нейронних мережах. Досліджено декілька різних структур моделі. Як критерій оцінювання якості нейромоделей використано накопичену суму квадратів помилок. Як навчальний алгоритм застосовано алгоритм зворотного розрахунку помилки. У процесі синтезу системи керування використано дані реального процесу екструдювання. Показано, що найкращим чином працює нейромережа, що включає три нейрони у схованому шарі та записання на два кроки. Визначено оптимальну структуру та параметри нейромережі.

**Ключові слова:** нейромоделі, екструзія, система керування, режим пуску

© Жученко О. А., 2013.

**Постановка проблеми.** Повний цикл екструдювання полімерів складається з чотирьох стадій: розігрівання екструдера – доведення температурного режиму до заданого технологом рівня; пуску екструзії – перехід від стану, коли продукція не випускається, до стану, коли вона повністю відповідає заданим показникам; режиму нормальної експлуатації – робочий стан процесу; зупинення екструдера.

Режим пуску є стадією повністю непродуктивної роботи екструдера, коли сировинні та енергетичні ресурси мають бути мінімізовані. Цю задачу можна вирішити двома шляхами. Перший полягає в експериментальному вивченні процесу запуску з метою побудови певного алгоритму дій оператора. Цей метод має багато недоліків. По-перше, проведення таких експериментів вимагає значних фінансових і часових затрат. По-друге, практичне застосування розробленого в такий спосіб алгоритму є обмеженим, оскільки під час його реалізації можуть виникати непередбачені раніше виробничі ситуації. По-третє, алгоритм дій не захищений від помилок оператора. По-четверте, алгоритм дій не є загальним і стосується лише дослідженого полімеру. Виходом є використання іншого шляху – моделювання режиму пуску екструзії, яке дозволяє проводити потрібну кількість майже безкоштовних експериментів в необмежених часових рамках.

**Аналіз попередніх досліджень.** Існує достатня кількість фундаментальних праць із математичного моделювання екструдювання полімерів [1–3]. Проте в них майже не приділено уваги режиму пуску екструдера. Це можна пояснити складністю та неоднозначністю цього процесу, що фактично не дає можливості створити його математичну модель у класичному вигляді. У зв'язку з цим, вбачається за доцільне побудувати модель режиму пуску екструзії у вигляді штучних нейромереж (ШНМ-модель) [4].

**Метою** статті є створення та дослідження моделі режиму пуску екструзії полімерів на основі штучних нейронних мереж.

**Розроблення ШНМ-моделі.** Розроблення складається з вибору вхідних та вихідних змінних, формування топології та налаштування ваг [5, 6]. Оскільки пускові передують стадія розігрівання екструдера, тобто потрібного режиму роботи вже досягнуто, температури за зонами екструдера як вхідні змінні не розглядають. Якщо не використовувати системи охолодження, єдиною вхідною змінною є частота  $n$  обертання шнека, значення якої змінюється від нуля до величини, що забезпечує потрібну якість продукту.

Режим нормальної експлуатації екструдера визначається температурою  $T_{\text{гол}}$  і тиском  $P$  у головці екструдера [1–3]. У зв'язку з цим,  $T_{\text{гол}}$  і  $P$  вважатимемо вихідними змінними.

Однією з задач керування пуском є попередження блокування шнека екструдера. Для цього використаємо обернено пропорційну залежність між частотою  $n$  і моментом  $m$  на валу шнека [7].

Визначимо структуру ШНМ-моделі у загальному вигляді (рис. 1). Вона є тришаровою зі зворотним зв'язком. Окрім неї розглядали і прямо спрямовану модель без зворотного зв'язку.

Щоб сформулювати топологію моделі, слід визначити кількість нейронів у кожному шарі (табл. 1). Кожний нейрон у цій топології відповідає за одну змінну. Якщо з вхідною змінною зв'язані два нейрони, це означає, що враховуються поточне  $n(t)$  і попереднє  $n(t-1)$  значення частоти обертання шнека, якщо три нейрони –  $n(t)$ ,  $n(t-1)$  і  $n(t-2)$ . Так само – для змінних зворотного зв'язку. Наприклад, для варіанта 11 – три вхідних нейрони  $n(t)$ ,  $n(t-1)$  і  $n(t-2)$ , а також три вхідних нейрони зворотного зв'язку  $T_{\text{гол}}(t)$ ,  $T_{\text{гол}}(t-1)$  і  $T_{\text{гол}}(t-2)$ .

Налаштування ваг мережі здійснювали методом зворотної передачі помилки [5, 6].

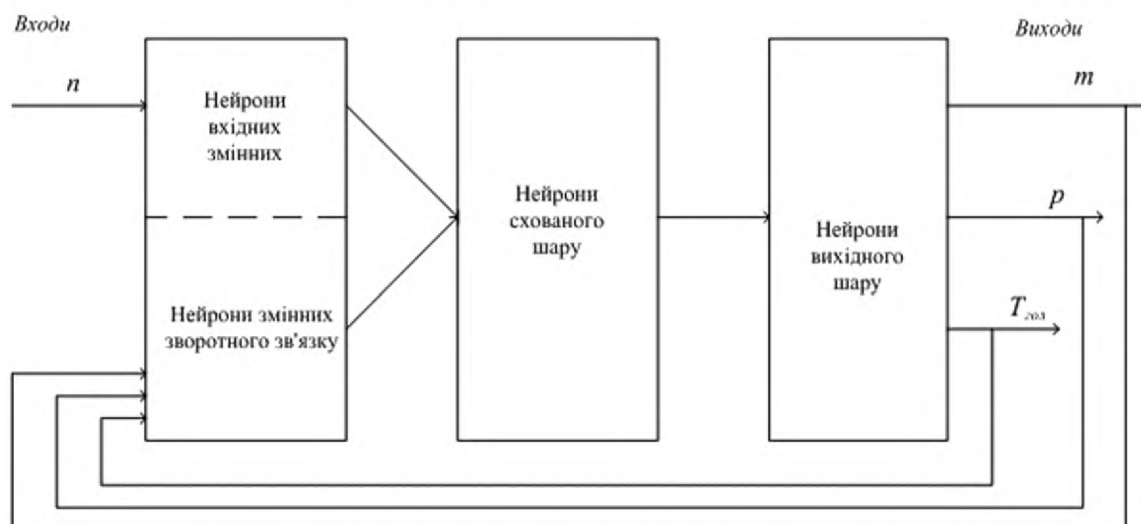


Рис. 1 – Загальна структура ШНМ-моделі режиму пуску екструзії

Якість моделі визначали за критерієм  $E = \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^L \frac{[y_{mj}(i) - y_{\varphi j}(i)]^2}{y_{\max j}^2}$ , де  $y_{mj}(i)$  – розраховане за моделлю

значення вихідної змінної  $j$  в експерименті  $i$ ;  $y_{\varphi j}(i)$  – фактичне значення відповідної змінної;  $y_{\max j}$  – максимальне значення змінної  $j$ ;  $L = 3$  – кількість вихідних змінних;  $N$  – кількість сукупностей експериментальних значень (довжина експерименту).

Таблиця 1 – Варіанти топологій досліджуваних моделей

Варіант	Кількість нейронів у шарі			Наявність зворотного зв'язку за змінною		
	Вхідний (вхід/зв. зв'язок)	Схований	Вихідний	$m$	$p$	$T_{\text{гол}}$
1	1/3	2	3	+	+	+
2	1/2	2	3	+	-	+
3	1/1	2	3	-	-	+
4	1/0	2	3	-	-	-
5	2/6	3	3	+	+	+
6	2/4	3	3	+	-	+
7	2/2	3	3	-	-	+
8	2/0	3	3	-	-	-
9	3/6	3	3	+	+	+
10	3/4	3	3	+	-	+
11	3/2	3	3	-	-	+
12	3/0	3	3	-	-	-
13	4/6	4	3	+	+	+
14	4/14	4	3	+	-	+
15	4/2	4	3	-	-	+
16	4/0	4	3	-	-	-
17	3/9	4	3	+	+	+
18	3/6	4	3	+	-	+
19	3/3	4	3	-	-	+
20	3/0	4	3	-	-	-
21	3/2	5	3	-	-	+
22	3/2	6	3	-	-	+

Під час налаштування ваг  $E$  спочатку зменшується, потім зменшення уповільнюється до усталення  $E$ . Цей момент вважали точкою закінчення навчання нейромережі за навчальною вибіркою.

Найкращі показники одержано для моделі за варіантом 11 (табл. 2; рис. 2).

Таблиця 2 – Результати оцінювання якості моделей

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Значення $E$	156,2	148,9	113,1	143,8	140,7	120,3	92,4	98,8	121,6	96,4	<b>81,4</b>	101,3	121,7	116,9	112,9	118,6	123,2	118,6	108,6	112,8	101,3	98,2

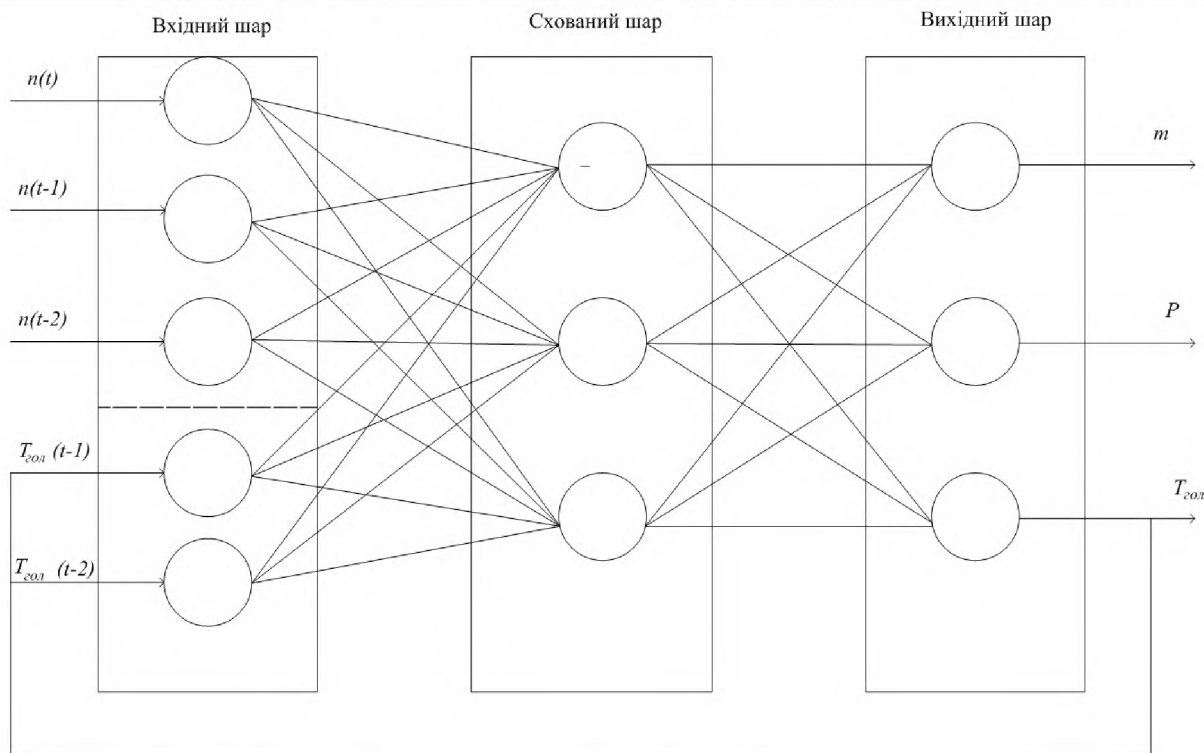


Рис. 2 – Топологічна структура найкращої моделі режиму пуску екструзії

Проаналізовано залежність  $E$  від запізнення та кількості нейронів у схованому шарі (рис. 3 і 4).

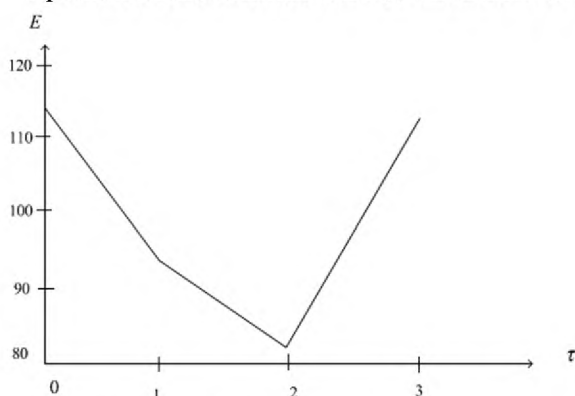


Рис. 3 – Залежність критерію  $E$  від величини запізнення

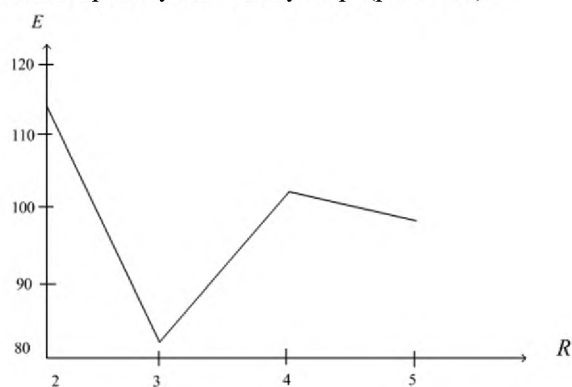
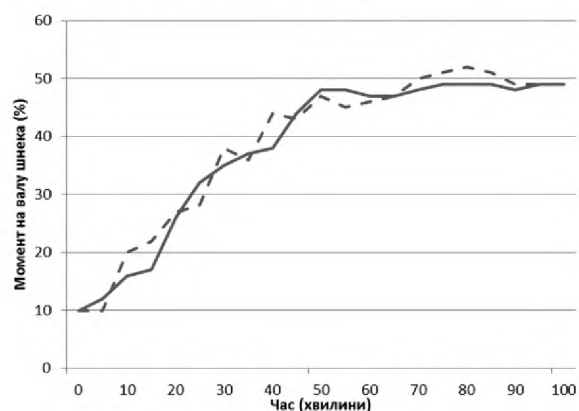


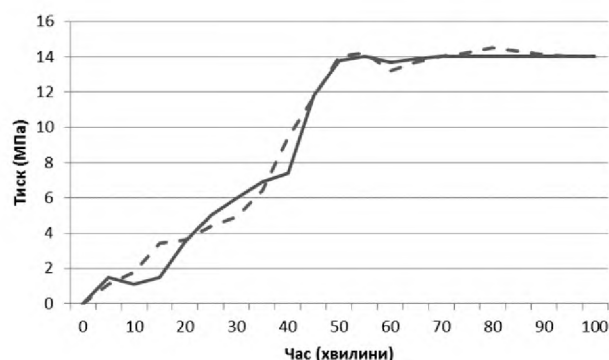
Рис. 4 – Залежність критерію  $E$  від кількості нейронів  $R$  у схованому шарі

Дослідження ШНМ-моделі. Для дослідження працездатності розробленої моделі використано вибірку даних, що відрізнялася від навчальної. Встановлено, що модель достатньо точно відтворює реальні тренди (рис. 5). Максимальні відносні похибки становлять: за моментом на валу шнека – 5,4 % (значення  $m$  на рис. 5,  $a$  наведено у відсотках від максимально допустимого значення), за тиском – 4,2 %, за температурою

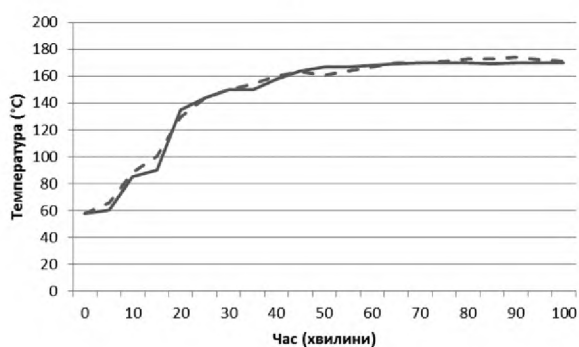
головки – 2,3 %. Точне відтворення значень температури можна пояснити тим, що протягом пуску вона змінюється найменше завдяки підтриманню на сталому рівні температури зони дозування (найближчої до головки) за допомогою відповідної системи керування.



а



б



в

а – момент на валу шнека; б – тиск розплаву;  
в – температура головки екструдера

Рис. 5 – Графіки зміни у часі реальних виходів (штрихована крива) та виходів ШНМ-моделі (суцільна крива)

**Висновки.** Доведено принципову можливість використання розробленої ШНМ-моделі для моделювання режимів пуску екструзії полімерів.

Встановлено, що якість моделі суттєво залежить від її топології, зокрема, від кількості нейронів у схованому шарі, а також від запізнення у значеннях вхідних змінних.

Оскільки в статті розглянуто обмежену кількість можливих топологічних структур, у подальших дослідженнях доцільно використати генетичні алгоритми для визначення оптимальної топологічної структури моделі. Перспективною є також побудова нейро-фаззі-регулятора для керування режимом пуску.

Наведену ШНМ-модель можна використати не лише для полімерів, але й інших продуктів, зокрема харчових. У цьому випадку структура моделі має відображати особливості відповідних технологічних процесів.

#### Список використаної літератури

1. Раувендаль К. Экструзия полимеров / К. Раувендаль – СПб. : Профессия, 2006. – 768 с.
2. Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров / Р. В. Торнер. – М. : Химия, 1977. – 464 с.
3. Tadmor Z. Principles of Polymer Processing / Z. Tadmor, C. G. Gogos. – N.-Y. : Wiley-Interscience, 2006. – 961 p.
4. Popescu O. A new approach to modeling and control of a food extrusion process using neural networks and expert system / O. Popescu, D. C. Popescu, J. Wilder, M. V. Karwe // J. of Food Process Eng. – 2001. – 24 (1). – P. 17-36.
5. Ямпольський Л. С. Системи штучного інтелекту в плануванні, моделюванні та управлінні / Л. С. Ямпольський, Б. П. Ткач, О. І. Лісовиченко. – К. : Персонал, 2011. – 544 с.
6. Ямпольський Л. С. Гнучкі комп'ютерно-інтегровані системи: планування, моделювання, верифікація та управління / Л. С. Ямпольський, П. П. Мельничук, К. Б. Остапченко, О. І. Лісовиченко. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – 786 с.
7. Le S. J. Application of fuzzy control to start-up of twin screw extruder / S. J. Le, C. G. Hong, T. S. Han et al // Food Control. – 2002. – 13. – P. 301-306.

Надійшла до редакції 12.01.2013.

Zhuchenko O. A.

#### MODELING OF THE START-UP PART OF A POLYMER EXTRUSION PROCESS

*The paper presents a new approach to the modeling of the start-up part of a polymer extrusion process, based on a neural network. Some different model structures were researched. As a performance criterion in estimating the quality of the neural network model the cumulated squared error over a whole training sequence of data was used. The backpropagation algorithm was used as a training algorithm. The design steps, which included choosing the network topology, training, validation and testing, were illustrated with data taken from a real process that uses polymer material.*

*It was found that for the extruder system presented in the paper, 3 hidden neurons and 2 input and output delays gave optimum performance. As a result the optimal model structure and parameters of the neural network (weights and biases) were determined.*

*Simulation results with real data are also presented and confirm good performance of proposed control system. The neural network model approximated the transient part of the process well even when input variables were quite far away from training data.*

**Keywords:** neural network, extrusion, control system, start-up part.

#### References

1. Rauvandal K. Ekstruziya polymerov [Polymer extrusion] / K. Rauvandal. – SPb. : Professya Publ., 2006. – 768 p.
2. Torner R. V. Teoreticheskiye osnovy pererabotky polymerov [Theoretical basis of polymer processing] / R. V. Torner. – Moscow : Khimiya, 1977. – 464 p.
3. Tadmor Z. Principles of Polymer Processing / Z. Tadmor, C. G. Gogos. – N.-Y. : Wiley-Interscience, 2006. – 961 p.
4. Popescu O. A new approach to modeling and control of a food extrusion process using neural networks and expert system / O. Popescu, D. C. Popescu, J. Wilder, M. V. Karwe // J. of Food Process Eng. – 2001. – 24 (1). – P. 17-36.
5. Yampolskyi L. S. Systemy shuchnoho intelektu v planuvanni, modeliuvanni ta upravlinni [Artificial intelligence in planning, modeling and control] / L. S. Yampolskyi, B. P. Tkach, O. I. Lisovychenko. – K. : Personal, 2011. – 544 s.
6. Yampolskyi L. S. Hnuchki kompiuterno-intehrovani systemy: planuvannia, modeliuvannia, veryfikatsiia ta upravlinnia [Flexible computer-integrated systems: planning, design, verification and management] / L. S. Yampolskyi, P. P. Melnychuk, K. B. Ostapchenko, O. I. Lysovychenko. – Zhytomyr : ZhDTU, 2010. – 786 s.
7. Le S. J. Application of fuzzy control to start-up of twin screw extruder / S. J. Le, C. G. Hong, T. S. Han et al // Food Control. – 2002. – 13. – P. 301-306.

---

УДК 65.012.122

**КУБРАК А. І., к.т.н., проф.; СИТНІКОВ О. В., ас.**  
**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»**

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВАННИ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

*Розглянуто ванну скловарної печі, що є об'єктом у системі керування скловарним виробництвом. Розроблено математичну модель скловарної печі з урахуванням усіх межових умов і виведено передатні функції за каналами температура газу – температура скломаси, температура газу – температура кладки. Задачу розв'язано за допомогою перетворення за Лапласом рівнянь теплопровідності для скломаси і кладки з отриманням їх характеристичних рівнянь. Наступним кроком було створення матриці коефіцієнтів системи та за її розрахунком – отримання коефіцієнтів рівнянь теплопровідності.*

**Ключові слова:** скловарна піч, математичне моделювання, система керування, передатна функція.

© Кубрак А. І., Ситніков О. В., 2013.

**Постановка задачі.** Із зростанням вимог до економії сировинних і паливно-енергетичних ресурсів стає актуальним точне та якісне керування технологічними режимами скловарних печей. Оптимізація печі в ручному режимі ускладнюється тим, що скловарна піч є складним інерційним об'єктом із багатьма зв'язками.