

8. Халил, Х. К. Нелинейные системы [Текст] / Х. К. Халил; пер. с англ. И. А. Макарова; под ред. А. Л. Фрадкова. – Изд. 3-е. – М., Ижевск: Ин-т компьютер. исслед.: Регуляр. и хаотич. динамика, 2009. – 812 с.
9. Фрадков, А. Л. Метод пассивации в задачах адаптивного управления, наблюдения и синхронизации: Нелинейные системы. Частотные и матричные неравенства. [Текст] / А. Л. Фрадков, Б. Р. Андриевский, А. Е. Барабанов, В. А. Бондарко и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – С. 452–499 с.
10. Zhou, J. Adaptive Backstepping Control of Uncertain Systems Nonsmooth Nonlinearities, Interactions or Time-Variations. [Текст] / J. Zhou, C. Wen // SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 2008. – 241 p.
11. Freeman, R. A. Robust Control of Nonlinear Systems. [Текст] / R. A. Freeman, P. V. Kokotovic // Boston: Birkhauser, 1996. – 258 p.
12. Kokotovic, P. V. Constructive nonlinear control: progress in the 90's. [Текст] / P. V. Kokotovic // Prepr. 14th IF AC World Congress. Beijing, China, 1999. – Plenary vol. – pp. 49-77.
13. Семенов, Е. В. Процесс флотации сахара при очистке диффузионного сока [Текст] / Е. В. Семенов, А. М. Гаврилов, А. А. Славянский, И. С. Хабибулина // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2003. – № 9. – С. 53-56.
14. Голыбин, В. А. Предефекция в схеме очистки диффузионного сока [Текст] / В. А. Голыбин, А. В. Пономарев, А. К. Жигульский // Материалы докладов международной научно-практической конференции «Разработка новых и совершенствование существующих технологий, оборудования и методов контроля сахарного производства». – Воронежская гос. технол. академия. – Воронеж, 2005. – С. 27-31.

Запропонована каскадна система керування процесом екструзії полімерів, яка включає у себе два контури: внутрішній забезпечує стабілізацію температури та тиску полімеру у формувальній головці, зовнішній призначений для формування оптимальних завдань названих вище змінних. Оптимізація здійснюється з метою мінімізації питомих енерговитрат та досягнення потрібної якості вихідного продукту. Проведене імітаційне моделювання показало високу ефективність запропонованої системи керування

Ключові слова: екструдер, система керування, оптимізатор, якість продукту

Предложена каскадная система управления процессом экструзии полимеров, которая включает в себя два контура: внутренний обеспечивает стабилизацию температуры и давления полимера в формочной головке, внешний предназначен для формирования оптимальных задач названных выше переменных. Оптимизация осуществляется с целью минимизации удельных энергозатрат и достижения требуемого качества исходного продукта. Проведенное имитационное моделирование показало высокую эффективность предложенной системы управления

Ключевые слова: экструдер, система управления, оптимизатор, качество продукта

УДК 681.51

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕКСТРУЗІЄЮ ПОЛІМЕРНИХ ВИРОБІВ

Л. Д. Ярошук

Кандидат технічних наук, доцент

О. А. Жученко

Асистент*

*Кафедра автоматизації хімічних

виробництв

Національний технічний університет

України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, корп. 19, м. Київ,

Україна, 03056

1. Вступ

Не можна назвати галузі людської життєдіяльності, де б не використовувалися полімерні вироби: промисловість, сільське господарство, медицина, спорт, побут і т.д. У зв'язку з цим постійна увага науковців звернена на технологічні процеси виробництва полімерних матеріалів з точки зору, по-перше, підвищення ефективності полімерних виробництв за рахунок впровадження режимів енерго- та ресурсозбереження, по-друге, покращення якості готової продукції.

Одним з основних технологічних процесів виробництва полімерних матеріалів є процес екструзії [1 – 7]. Незважаючи на різноманітну номенклатуру полімерних виробів (труби, плівки, листи і т.д.) показники якості останніх можна умовно поділити на три групи [8]: зовнішній вигляд, геометричні розміри, механічні властивості.

На жаль, далеко не всі ці показники підлягають автоматичному контролю, що ускладнює задачу забезпечення роботи технологічного обладнання в режимах енерго- та ресурсозбереження при високій якості готової продукції.

Розв'язання даної задачі можливе тільки за рахунок створення відповідної автоматичної системи керування.

2. Постановка задачі

Незважаючи на існування фундаментальних досліджень екструзії полімерів [1 – 7] проблемам пошуку та реалізації у реальному часі оптимальних режимів функціонування даного процесу з точки зору ресурсо- та енергозбереження, а також керування якістю полімерних виробів практично не приділяється належної уваги.

Реалізувати керування показниками якості полімерів у реальному часі засобами класичних автоматичних систем фактично неможливо у зв'язку з або повною відсутністю відповідних автоматичних вимірювальних пристроїв, або, навіть якщо деякі з них існують (це дуже невелика частка), то вартість таких пристроїв занадто висока, що практично не дозволяє їх використовувати в умовах промислового виробництва.

Тому майже всі показники якості полімерних виробів контролюється лабораторними методами при значній дискретності у часі, що негативно впливає на кінцевий результат.

Названі вище обставини є причинами того, що контроль якості полімерних виробів в існуючих системах автоматизації процесів екструзії здійснюється непрямыми методами на основі аналізу технологічних змінних, які можуть бути виміряні автоматично. До таких змінних відносяться температури корпусу екструдера по зонах, температура і тиск у головці, витрата води для охолодження шнеку (якщо шнек охолоджується), кількість обертів шнеку, потужність привода шнеку [4, 5, 9, 10]. Однак контроль цих змінних не достатній для забезпечення потрібної якості продукції, особливо в умовах дії неконтрольованих збурень [11, 12].

За останні роки цілий ряд досліджень [13 – 24] присвячений розробкам систем керування температурним режимом корпусу екструдера.

У той же час відомо лише декілька досліджень [25 – 27], у яких пропонуються системи керування якісними показниками продуктів процесу екструзії, але діапазон застосування запропонованих систем дуже обмежений.

Таким чином, метою даної статті є розробка системи автоматичного керування процесом екструзії полімерних виробів, яка забезпечує: по-перше, роботу технологічного обладнання у режимі енерго- та ресурсозбереження і, по-друге, потрібні показники якості продукції, що випускається.

3. Процес екструзії полімерів як об'єкт керування

З урахуванням сформульованих вище вимог до системи керування процесом екструзії останній як об'єкт керування умовно зображений на рис. 1.

Показники якості полімерної продукції $Q = [q_1 q_2 \dots q_n]^T$ (n – кількість показників, що контролюються) можуть бути різними у залежності від типу готового виробу [8]. Так, наприклад, для полімерних плівок такими показниками є [28]: товщина плівки, її ширина, маса $1m^2$, водопоглинення та ін.

З точки зору побудови ефективної системи керування показниками якості полімерних виробів у процесі екструзії основна проблема полягає у можливості автоматичного вимірювання цих показників у реальному часі. У цьому зв'язку, якщо для вимірювання, наприклад, товщини плівки існують автоматичні технічні засоби [4, 11], то для більшості показників якості таких засобів нема. Для контролю за такими показниками використовуються лабораторні методи, результати яких можуть бути використані у системі керування процесом, але із значним запізненням, що суттєво погіршує якість самої системи керування.

У зв'язку з цим автоматичний контроль показників якості здійснюється непрямыми методами, вимірюючи вихідні змінні процесу $Y = [T_{гол}, P_{гол}, S]^T$: температуру $T_{гол}$ та тиск $P_{гол}$ у формувальній головці, питомі енерговитрати S ($S = \frac{E}{M}$, E – потужність, що витрачається на процес екструзії, M – продуктивність процесу) та температури по зонах екструдера $T = [T_1 T_2 \dots T_m]^T$ (m – кількість температурних зон екструдера, яка, як правило, дорівнює кількості нагрівачів).

Як показали проведені дослідження [25, 26, 29], вплив температур по зонах екструдера на показники якості полімерних виробів значно менший, між інших наведених вище змінних. Тому доцільно температури по зонах підтримувати стабільними у відповідності до профілю температур, заданого технологіями для певного полімерного виробу.

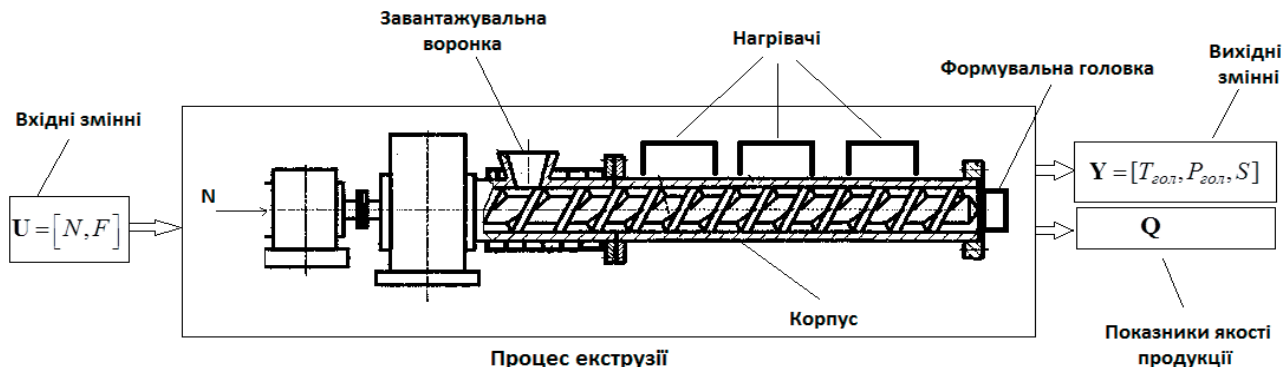


Рис. 1. Схема процесу екструзії як об'єкта керування

Для цього має бути створена відповідна система керування.

Для забезпечення режиму ресурсо- та енергозбереження при веденні процесу екструзії як вихідна змінна розглядається питома потужність S . Як показали результати моделювання [25, 29], змінні $T_{\text{гол}}$ та S сильно корельовані і тому у системі керування екструзією достатньо використовувати одну з них.

Як керувальні змінні пропонується застосовувати кількість обертів шнеку N та витрати полімеру у завантажувальну воронку F . Якщо завантаження полімеру в екструдер здійснюється примусово, то значення F визначається режимом роботи відповідного пристрою завантаження. У випадку, коли полімер поступає в екструдер за рахунок гравітаційних сил, значення F залежить від рівня H полімеру у завантажувальній воронці.

4. Структура системи керування

На рис. 2 представлена структурна схема системи керування процесом екструзії. Дана система має два контури керування: внутрішній та зовнішній.

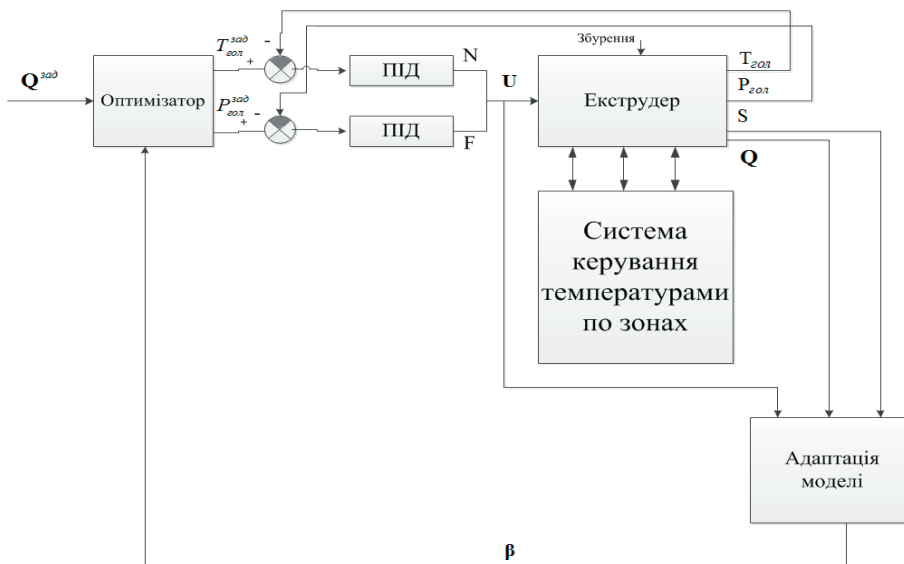


Рис. 2. Структурна схема системи керування процесом екструзії

Внутрішній контур призначений для стабілізації на заданому рівні $T_{\text{гол}}^{\text{зад}}$ та $P_{\text{гол}}^{\text{зад}}$ на часовому інтервалі керування вихідних змінних – температури $T_{\text{гол}}$ та тиску $P_{\text{гол}}$ у формувальній головці. Завдання стабілізації реалізується за допомогою ПІД-регуляторів, вихідний сигнал яких керує швидкістю N обертання шнеку та завантаженням F (рівнем H) полімеру у завантажувальній головці. Однак даний контур керування не може забезпечити стабільності потрібної якості вихідного продукту особливо в умовах дії збурень різної природи.

Тому у системі керування передбачений зовнішній контур (оптимізатор), завданням якого є максимізація продуктивності M процесу екструзії, що відповідає мінімальній питомій потужності S , при умові забезпечення потрібної якості $Q^{\text{зад}}$ полімерних виробів. Оптимізатор розв'язує задачу статичної оптимізації, у результаті чого визначається значення $T_{\text{гол}}^{\text{зад}}$ та $P_{\text{гол}}^{\text{зад}}$, що є

установками для ПІД-регуляторів внутрішнього контуру на наступний інтервал керування.

Для розрахунків оптимальних значень $T_{\text{гол}}^{\text{зад}}$ та $P_{\text{гол}}^{\text{зад}}$ потрібна відповідна математична модель (назвемо її M_c). В якості такої моделі використовується статичний варіант моделі [30]. Дана модель M_c містить параметри $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_r]^T$, які можуть змінюватись у процесі керування екструдером. До таких параметрів відносяться параметри, що характеризують теплофізичні та реологічні властивості екструдату, наприклад, коефіцієнти тепловіддачі, теплопровідності, в'язкості і т.д. Для підвищення точності розрахунків за моделлю ці параметри підлягають уточненню у процесі керування, чому слугує блок адаптації моделі.

5. Оптимізатор

Процедура оптимізації полягає у визначенні для кожного інтервалу керування значення оптимальних керувань U (N та F), які мінімізують наступний критерій якості:

$$J = (Q^{\text{зад}} - \hat{Q})^T M_Q (Q^{\text{зад}} - \hat{Q}) - \alpha F, \quad (1)$$

де \hat{Q} - показники якості, розраховані за моделлю M_y , M_Q - вагова матриця, α - масштабний коефіцієнт.

В якості моделі M_y використовується модель такої структури:

$$Q_g = \sum_{i=1}^2 a_{g,i} u_i + \sum_{i=1}^2 \sum_{j \geq 1} a_{g,ij} u_i u_j, \quad (2)$$

де $g = 1, 2, \dots, n$.

Параметрична ідентифікація даної моделі здійснюється методом найменших квадратів [31 – 35].

Дана задача оптимізації є умовною, тобто на незалежні керування накладені обмеження:

$$N_{\text{min}} \leq N \leq N_{\text{max}},$$

$$F_{\text{min}} \leq F \leq F_{\text{max}}. \quad (3)$$

Результатом розв'язання оптимальної задачі є значення керувань $N^{\text{опт}} = u_1^{\text{опт}}$ та $F = u_2^{\text{опт}}$, підставляючи які у модель M_c , знаходимо $T_{\text{гол}}^{\text{зад}}$ та $P_{\text{гол}}^{\text{зад}}$.

6. Адаптація моделі

Задача адаптації моделі полягає у визначенні параметрів β моделі M_c , які відповідають поточному установленому режиму процесу екструзії. Для розв'язання даної задачі використовується функція якості вигляду:

$$V = \left(\begin{bmatrix} Y \\ Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{Q} \end{bmatrix} \right)^T M_Y \left(\begin{bmatrix} Y \\ Q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{Q} \end{bmatrix} \right), \quad (4)$$

де Y, Q - поточні значення вихідних змінних та показників якості; \hat{Y}, \hat{Q} - відповідні змінні розраховані за моделями M_c та M_y ; M_y - вагова матриця.

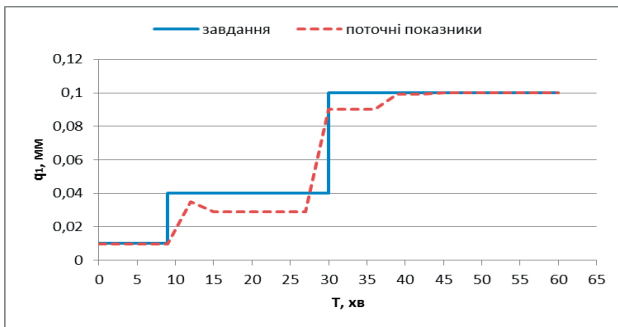
Пошук оптимуму здійснюється за параметрами β в умовах обмежень:

$$\beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \quad (5)$$

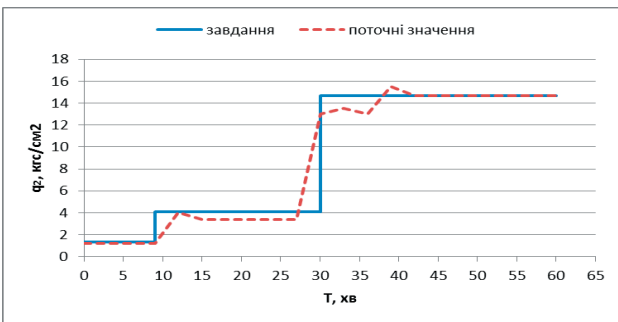
Якщо весь вектор Q , або його частина невідомі (наприклад, у зв'язку з відсутністю відповідних лабораторних аналізів), то відповідні елементи матриці M_y дорівнюють нулю і адаптація моделі виконується тільки по значеннях Y .

7. Дослідження системи керування

Дослідження запропонованої системи керування проводилося на основі метода імітаційного моделювання [36 – 39]. В процесі моделювання досліджувалась якість роботи системи керування при зміні завдання на показники якості вихідного продукту. Досліджувався процес екструзії полімерної плівки (тип Н-0,1), а в якості досліджуваних показників були вибрані товщина плівки q_1 та міцність при розтягуванні q_2 . Результати моделювання представлені на рис. 3.



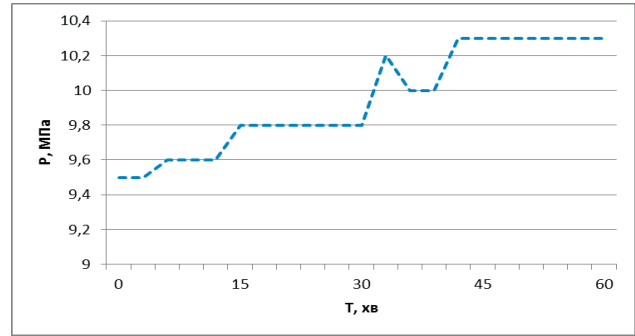
а



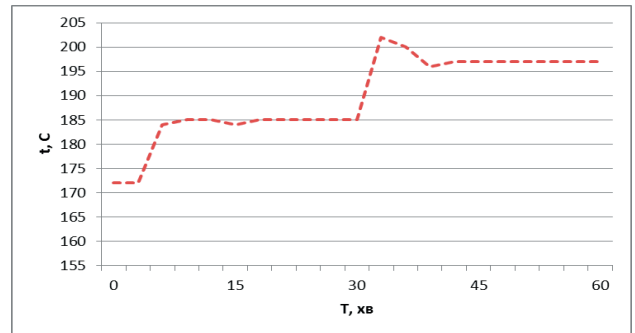
б

Рис. 3. Зміна показників якості плівки: а – зміна товщини плівки q_1 у часі T , б – зміна міцності при розтягуванні q_2 у часі T при зміні завдання

Під час дослідження завдання для системи керування змінювалось двічі – на 9-й та 30-й хвилині. Як видно з результатів моделювання система керування досить ефективно реагує на зміни завдань. На рис. 4 показані графіки зміни температури і тиску у формувальній головці.



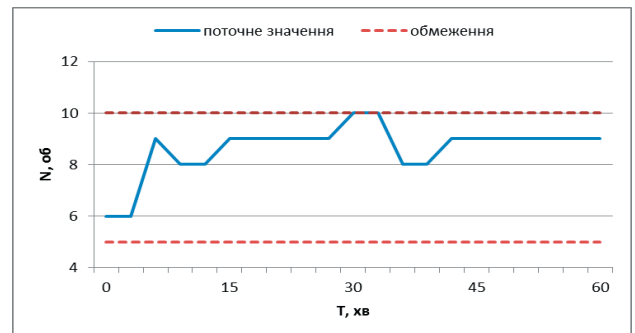
а



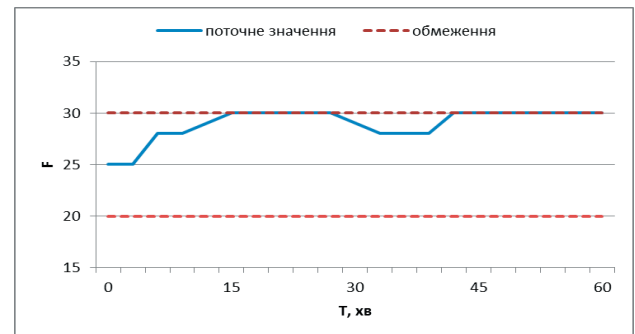
б

Рис. 4. Зміна тиску: а - у формувальній головці P у часі T ; б - зміна температури у формувальній головці t у часі T

Відповідні зміни керувань (швидкість обертів шнеку та подача полімеру) представлені на рис. 5.



а



б

Рис. 5. Графіки: а - зміни швидкості обертання шнеку N у часі T ; б - подачі полімеру F

Результати адаптації математичної моделі процесу екструзії зведені у табл. 1.

Таблиця 1

Результати адаптації математичної моделі

Параметри	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Min	21	8	6E-10	1.8E+09	4.00E+05	5.18E+03
Max	29	13.2	1.16E-09	2.5E+09	4.56E+05	5.48E+03
№ ітерації						
0	25	10.6	8.80E-10	2.15E+09	4.28E+05	5.27E+03
1	28.6	10.0	1.16E-09	2.37E+09	4.30E+05	5.30E+03
2	28.5	10.0	1.16E-09	2.44E+09	4.35E+05	5.34E+03
3	28.7	10.0	1.16E-09	2.5E+09	4.37E+05	5.39E+03
4	28	10.0	1.15E-09	2.5E+09	4.37E+05	5.38E+03
5	28.1	10.0	1.16E-09	2.5E+09	4.37E+05	5.38E+03
6	27.8	10.0	1.16E-09	2.5E+09	4.37E+05	5.29E+03
7	29	8.3	1.10E-09	2.45E+09	4.00E+05	5.21E+03
8	29	8.3	1.10E-09	2.45E+09	4.00E+05	5.21E+03
9	29	8.3	1.10E-09	2.45E+09	4.00E+05	5.21E+03
10	29	8.3	1.10E-09	2.45E+9	4.00E+05	5.21E+03

Було проведено 10 ітерацій уточнення параметрів моделі. Цими параметрами були в'язкість полімеру ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) та коефіцієнти тепловіддачі від корпусу екструдера до полімеру ($\beta_4, \beta_5, \beta_6$) по зонах екструдера (всього розглядалось 3 зони екструдера).

До внесення збурення параметри β_3 та β_4 знаходилися на своєму максимальному рівні. Після внесення збурення значення всіх параметрів змінилося і відповідало новій робочій точці. При цьому параметр β_1 став мати максимальне значення, а параметр β_5 - мінімальне.

8. Висновки

Запропонована нова система керування процесом екструзії полімерних виробів. Ця система складається з двох контурів – внутрішнього та зовнішнього. Внутрішній контур забезпечує стабільність температури та тиску у формувальній головці на заданому рівні. Зовнішній контур визначає ці рівні для забезпечення максимальної продуктивності процесу екструзії та потрібних показників якості полімерних виробів. Для підвищення ефективності системи керування здійснюється адаптація математичної моделі, на основі якої проводяться розрахунки.

Наведені результати дослідження якості представленої системи керування, які підтвердили її високу ефективність.

Враховуючи, що показники якості полімерних виробів визначаються, як правило, у результаті лабораторних аналізів, що вносить певні запізнення у роботу системи керування, а, значить, знижує її ефективність, у подальших дослідженнях доцільно розглянути можливість використання інтелектуальних систем керування.

Література

1. Бернхардт, Э. Переработка термопластичных материалов [Текст] / Э. Бернхардт. – М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1962. – 748 с.
2. Торнер, Р. В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) [Текст] / Р. В. Торнер. – М.: Химия, 1977. – 462 с.
3. Технология пластических масс [Текст] : учеб. / под ред. В. В. Коршака. – М.: Химия, 1976. – 608 с.
4. Раувендаль, К. Экструзия полимеров [Текст] / К. Раувендаль. – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
5. Ким, В. С. Теория и практика экструзии полимеров [Текст] / В. С. Ким. – М.: Химия, КолосС, 2005. – 568 с.
6. Переработка пластмасс [Текст] / Шварц О., Эбелинг Ф.-В., Фурт Б.; под общ. ред. А. Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия, 2005. – 320 с.
7. Tadmor, Z. Principles of Polymer Processing [Текст] / Z. Tadmor, C. G. Gogos. – Wiley Interscience, 2006. – 961p.
8. ГОСТ 10354-82. Межгосударственный стандарт "Пленка полиэтиленовая. Технические условия" [Текст]. – Введ. 1998-06-02.
9. Matamoros, C. F. C. Modeling and control for the isothermal extrusion of aluminium. A dissertation for the degree of doctor of technical sciences. Swiss Federal Institute of technology [Текст] / C. F. C. Matamoros. – Zurich, 1999. – 138 p.
10. Zhao, X. Modeling and control of freez-form extrusion fabrication. A thesis of master of science in mechanical engineering [Текст] / X. Zhao. – University of Missouri, Rolla, 2007. – 70 p.
11. Раувендаль, К. Выявление и устранение проблем в экструзии [Текст] / К. Раувендаль, М. П. Норега, Х. Харрис. – СПб.: Профессия, 2008. – 328 с.
12. Tadmor, Z. Engineering Principles of Plasticating Extrusion [Текст] / Z. Tadmor, I. Klein. – Krieger Publishing Company, 1978. – 500 p.
13. Gawthrop, P. J. Adaptive temperature control of industrial processes: a comparative study [Текст] / P. J. Gawthrop, P. E. Nomikos, L. S. P. S. Smith. – Dept. of Mech. Eng., Glasgow Univ., UK Control Theory and Applications, IEE Proceedings, 1990. – pp.137-144.
14. Ravi, S. Stable self tuning genetic fuzzy temperature controller for plastic extrusion system [Текст] / S. Ravi, P. A. Balakrishnan // International Journal of Reviews in Computing. – vol. 5. – 2011. – pp. 21-28.
15. Yin-Tien Wang. Modeling and Control for a Thermal Barrel in Plastic Molding Processes [Текст] / Yin-Tien Wang, Sung-Lin Wu // Tamkang Journal of Science and Engineering. – Vol. 9, No 2. – 2006. – pp. 129-140.

16. Ching-Chih Tsai. Fuzzy supervisory predictive PID control of a plastics extruder barrel [Текст] / Ching-Chih Tsai, Chi-Huang Lu // Journal of the Chinese Institute of Engineers. – Vol. 21, №5. – 1998. – pp. 619-624.
17. Abeykoon, C. Extruder Melt Temperature Control With Fuzzy Logic [Текст] / Chamil Abeykoon, Kang Li, Marion McAfee, Peter J. Martin, George W. Irwin. – Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy), 2011. – pp. 8577 – 8582.
18. Ravi, S. Design of Intelligent Self-Tuning GA ANFIS Temperature Controller for Plastic Extrusion System [Текст] / S. Ravi, M. Sudha, P. Balakrishnan. – Hindawi Publishing Corporation Modelling and Simulation in Engineering Volume. – 2011.
19. Барабанов, Н. Н. Математическое моделирование основных процессов переработки пластмасс [Текст] : учеб. пособие / Н. Н. Барабанов, В. Т. Земскова, Ю. Т. Панов. – Владим.политехн. ин-т. Владимир, 2007. – 64 с.
20. Ravi, S. Dual Screw Profile Extruder Temperature Control Using LabVIEW Enhanced Genetic Fuzzy Algorithm [Текст] / S. Ravi, P.A.E. Balakrishnan // European Journal of Scientific Research. – Vol.50, No.1. – 2011. – pp. 35-47.
21. Baskaran, C. Modelling and Simulation of Hybrid Neuro Fuzzy Controller for Temperature Response Regulation of Plastic Extrusion Plant [Текст] / C. Baskaran, M. Dharmendirakumar, A. Kayathri // European Journal of Scientific Research. – Vol.79, No.1. – 2012. – pp. 89-98.
22. Kuen-Yih, Shy. Grey Modeling and Control of a Thermal Barrel in Plastic Molding Processes [Текст] / Kuen-Yih Shy, Yin-Tien Wang. – Intelligent Control and Automation, Proceedings of the 4th World Congress. – Vol.4. – 2002. – pp. 2557-2560.
23. Huailin, Shu. Decoupled Temperature Control System Based on PID Neural Network [Текст] / Huailin, Shu, Youguo Pi. – ACSE 05 Conference, 2005.
24. Yusuf, I. Temperature Control for Plastic Extruder Used Fuzzy Genetic Algorithms [Текст] / I. Yusuf, N. Iksan, N.A. Suryana Herman // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer scientists. – Vol. 2. – 2010.
25. Haley, T. A. On-line system identification and control design of an extrusion cooking process: Part II. Modeling predictive and inferential control design [Текст] / T. A. Haley, S. J. Mulvaney // Food control, 11. – 2000. – pp. 121-129.
26. Wang, L. Inferential control of product quality attributes – Application to food cooking extrusion process [Текст] / L. Wang, C. Chessari, E. Karpel. // Journal of process control, 11. – 2011. – pp. 621-636.
27. Егоров, В. Б. Функциональная организация, альтернативные структуры и алгоритмы САУ процессом экструдирования био-полимеров [Текст] / В. Б. Егоров, В. А. Хобин // ОНАХТ, Збірник «Наукові праці». – №42, том 1. – 2012. – С. 283-291.
28. ДСТУ Б А.1.1-28-94. Вироби полімерні погонажні профільні та оздоблювальні стінові (рулонні і листові).
29. Pomerleau, D. Approche phenomenologique de la regulation et de l'optimisation des procedes: Applications au frotage et a l'extrusion, Ph.D. Thesis [Текст] / D. Pomerleau. – Universite Laval. – 2003.
30. Кубрак, А. І. Математична модель керування тепловим режимом процесу екструзії полімерних матеріалів [Текст] / А. І. Кубрак, О. А. Жученко; НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка» // Наукові вісті. – №2. – 2010. – С. 107-114.
31. Assi, A. H. Engineering Education and Research Using Matlab [Текст] / Assi A. H. – InTech, 2011. – 490 p.
32. Blanchet, G. Digital Signal and Image Processing Using MATLAB [Текст] / G. Blanchet, M. Charbit. – ISTE Publishing Company, 2008. – 768 p.
33. Chapra, S. C. Applied Numerical Methods with MATLAB for Engineering and Science [Текст] / S. C. Chapra. – McGraw-Hill Science, 2004. – 550 p.
34. Gopi, E. S. Algorithm Collections for Digital Signal Processing Applications Using Matlab [Текст] / E. S. Gopi. – Springer, 2007. – 199 p.
35. Kalechman, M. Practical MATLAB Basics for Engineers [Текст] / M. Kalechman. – Taylor & Francis, 2008. – 698 p.
36. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
37. Остапенко, Ю. О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування [Текст] / Ю. О. Остапенко. – К.:Задруга, 1999. – 424 с.
38. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука [текст] / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
39. Потапов, В. Д. Имитационное моделирование производственных процес сов [Текст] / В. Д. Потапов, А. Д. Яризов. – М.: Высшая школа, 1981. – 191 с.