

Проведено дослідження адаптивної системи керування температурним режимом екструдера у режимі нормальної експлуатації в умовах дії збурень різної природи. Дослідження адаптивної системи керування відбувалось шляхом введення збурень у роботу системи. У якості збурень розглядалась зміна потужності споживання тепла. За результатами дослідження показана ефективність запропонованої системи керування процесу екструзії полімерів

Ключові слова: екструдер, система, керування, дослідження, регулятор, збурення, ефективність, температура, режим, адаптація

Проведено исследование адаптивной системы управления температурным режимом экструдера в режиме нормальной эксплуатации в условиях воздействия возмущений различной природы. Исследование адаптивной системы управления происходило путем введения возмущений в работу системы. В качестве возмущений рассматривалась изменение мощности потребления тепла. По результатам исследования показана эффективность предложенной системы управления процесса экструзии полимеров

Ключевые слова: экструдер, система, управление, исследования, регулятор, возмущения, эффективность, температура, режим, адаптация

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЕКСТРУЗІЇ ПОЛІМЕРІВ В УМОВАХ ДІЇ ЗБУРЕНЬ

О. А. Жученко

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: azhuch@ukr.net

О. О. Анієєв

Кандидат технічних наук, ст. викладач*

*Кафедра автоматизації хімічних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Одними з найпоширеніших матеріалів, які застосовуються практично в усіх галузях людської життєдіяльності – промисловості, сільському господарстві, космосі, медицині, побуті і т. д. – є пластмаси, світовий обсяг виробництва яких стабільно зростає і уже перевищив 300 млн. тон на рік [1]. В Україні виробництво полімерів за період з 2000 р. по 2006 р. збільшилося з 12,7 % до 25,5 % і продовжує зростати, а обсяг їх товарного виробництва у 2006 році досяг майже 1,5 млрд. доларів США [2].

Використання полімерних матеріалів за останні декілька десятиліть суттєво зростає завдяки їх багатоманітним властивостям, таким, як легкість формування у складні форми, невелика вага при високих показниках еластичності, удароміцності, стійкості на розрив, термо- та хімічній стійкості, поновлюваності та при цьому низькій вартості.

Одним із основних технологічних процесів, з яких складається полімерне виробництво, є процес екструзії. Процес екструзії – не новий процес, відомий ще у древньому Китаї [3]. Екструзійні методи формування виробів ґрунтуються на пластикації матеріалу, тобто переведенні його у в'язкотечійний стан, та продавлюванні розплаву через формувальний пристрій – екструзійну головку. У випадку переробки композиційних матеріалів екструдери використовують як розплавлявачі полімерів і для змішування. У гумовій промисловості екструдери застосовують

для пластикації каучуку, фільтрації та грануляції гумових сумішей, девулканізації гуми, зневоднення регенерату та ін.

Екструдери є одним із найпоширеніших видів устаткування, що використовується в галузях виробництва і переробки полімерів та композиційних матеріалів на їх основі. Екструдери з успіхом використовують як для переробки полімерів, так і для переробки гуми, продуктів сільського господарства, виробництва будівельних матеріалів і в багатьох інших галузях.

Із літератури відомо [3], що ефективність роботи екструдера визначається в основному його температурним режимом.

Найбільше наукових досліджень з питань моделювання та керування екструдерів присвячено саме температурним режимам [4, 5]. Всі без винятку дослідники підкреслюють важливість температурного режиму для забезпечення потрібної якості полімерних виробів.

2. Аналіз літературних даних та постановка задачі

Під час процесу екструзії в апараті відбувається інтенсивна деформація матеріалу та зростання тиску. Також відбуваються процеси: нагрівання матеріалу за рахунок енергії дисипації та енергії, що підводиться від системи нагрівання циліндра; ініційовані зростаючою температурою та тиском хімічні, фазові та інші перетворення; ущільнення та монолітизація сипких матеріалів; змішування компонентів; вилучення

з матеріалів газоподібних та інших компонентів. Така різноманітність процесів зумовлює використання екструдерів на різних стадіях у технологічних схемах виробництва полімерів і виробів з них, для виготовлення композиційних матеріалів на основі полімерів, переробки біосировини, вторинної сировини та інших матеріалів.

У процесі екструзії полімерів температура розплаву є однією з найважливіших змінних [3, 4], відхилення якої від заданого значення може викликати зниження якості готового продукту. В умовах порушень температурного режиму можуть виникнути декілька проблем у роботі екструдера: пульсації на виході, погіршення механічних властивостей продукту, нестабільність геометричних розмірів, неякісна поверхня виробів, зниження оптичної прозорості тощо [6].

Однорідність температури розплаву у формувальній головці залежить від правильного вибору режиму роботи екструдера. Неоднорідність цієї температури зростає з підвищенням швидкості обертання шнеку [7]. З іншого боку, робота екструдера на високих обертах шнеку підвищує енергетичну ефективність [8].

Робота екструдера визначається не тільки характеристиками технологічного обладнання, а й властивостями сировини. До властивостей сировини, які впливають на процес екструзії, відносять [4–6] сипучість гранульованих або порошкоподібних матеріалів, текучість розплаву та його теплофізичні властивості.

Найбільш важливими властивостями сипучих матеріалів є насипна щільність, розмір та форма частинок, їх здатність до пакування та агломерації, зовнішній та внутрішній коефіцієнти тертя. До найбільш важливих властивостей розплаву відносять в'язкість при зсувній течії та розтягуванні у залежності від швидкості деформації та температури. Основними термічними властивостями матеріалу є питома теплоємність, температура початку плавлення кристалічної фази, теплопровідність, густина та інші.

Фактично всі названі вище властивості полімерних матеріалів є змінними величинами. Наприклад, насипна щільність матеріалу може змінюватись не тільки від партії до партії, а й при поставках тієї ж самої партії [6]. Зміни властивостей розплаву полімеру зв'язані з тепловим режимом роботи екструдера, який теж не є гарантовано стабільним.

Така різноманітність процесів обумовлює нестаціонарні та нелінійні властивості екструдера як об'єкта керування [7, 9, 10], а також некерувану зміну режимів його роботи, що можна класифікувати як неконтрольовані випадкові збурення [11, 12].

У роботі [13] автором була синтезована адаптивна система керування температурним режимом екструдера, запропоновані відповідні методи ідентифікації параметрів моделі та структури адаптивного регулятора, але не було проведено дослідження на вплив збурень.

Метою даної роботи є дослідження запропонованої адаптивної системи керування температурним режимом процесу екструзії полімерних матеріалів у режимі нормальної експлуатації в умовах дії збурень різної природи. Дослідження дасть змогу зробити висновки щодо ефективності запропонованої системи керування в умовах непередбачуваної зміни технологічних параметрів процесу.

3. Структура адаптивного регулятора та алгоритми ідентифікації параметрів моделі

У роботі [13] була розроблена адаптивна система керування температурним режимом процесу екструзії полімерних матеріалів. Було запропоновано різні структури адаптивного регулятора та алгоритми ідентифікації параметрів моделі, які наведено нижче.

Як математична модель, параметри якої мають бути оцінені в процесі керування, використовується модель авторегресії-ковзного середнього (АРКС-модель) [14], що рекомендується і в інших дослідженнях систем керування процесу екструзії [9, 15, 16]. АРКС-модель має вигляд:

$$A(d)y(k) = B(d)u(k), \tag{1}$$

де $u(k), y(k)$ – m -вимірні вектори відповідно керувань та виходів (температур) в момент часу k , $A(d), B(d)$ – поліноміальні матриці вимірністю $m \times m$.

$$A(d) = I + A_1d + A_2d^2 + \dots + A_{na}d^{na},$$

$$B(d) = B_0 + B_1d + \dots + B_{nb}d^{nb},$$

де d – оператор зсуву назад; $k = 0, 1, 2, \dots$ – дискретний час.

При використанні рекурентних методів оцінювання АРКС-модель (1) записується у вигляді

$$y(k) = \Theta^T \phi(k-1); k \geq 0,$$

де $\phi(k-1) = [-y^T(k-1), -y^T(k-2), \dots, -y^T(k-n_a), u^T(k-1), u^T(k-2), \dots, u^T(k-n_b)]^T$ – вектор даних (вектор регресу), а $\Theta^T = [A_1, A_2, \dots, A_{na}, B_0, B_1, \dots, B_{nb}]$ – матриця параметрів.

Для оцінювання параметрів математичної моделі (1) використовувались наступні алгоритми оцінювання [17]:

- алгоритм А

$$\Theta(k) = \Theta(k-1) + \frac{P(k-1)\phi(k-1)\varepsilon^T(k)}{1 + \phi^T(k-1)P(k-1)\phi(k-1)},$$

$$\varepsilon(k) = y^T(k) - \phi^T(k-1)\Theta(k-1),$$

$$P(k) = P(k-1) + \frac{P(k-1)\phi(k-1)\phi^T(k-1)P(k-1)}{1 + \phi^T(k-1)P(k-1)\phi(k-1)},$$

при початкових заданих матрицях $\Theta(0)$ та $P(0) > 0$;

- алгоритм Б повторює попередній з розрахунком матриці $P(k)$ за формулою $P(k) = Q(k)Q^T(k)$, де матриця $Q(k)$ обчислюється, як наведено у [18];

- алгоритм В

$$\Theta(k) = \Theta(k-1) + \frac{\gamma\phi(k-1)\varepsilon^T(k)}{1 + \phi^T(k-1)\phi(k-1)},$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - \Theta^T(k-1)\phi(k-1).$$

Параметр γ рекомендується вибирати з діапазону $0 < \gamma < 2$.

Процес адаптації здійснюється у відповідності до критерію

$$J = 1/2\{\|y(k) - y^{zad}(k)\|^2 + \|W(d)u(k)\|^2\},$$

де Q (позитивно визначена) та $W(d) = W_0 + W_1d + \dots + W_{nw}d^{nw}$ - вагові матриці, $y^{zad}(k)$ - завдання по температурі.

Продиференціювавши цей вираз по $u(k)$ з врахуванням (1), отримаємо такий результат:

$$\begin{aligned} \partial J / \partial u(k) &= B_0^T Q [A y(k) + B u(k) - \\ &- y^{zad}(k)] + W_0^T W(d) u(k). \end{aligned}$$

Прирівнюючи це рівняння до нуля, маємо:

$$\begin{aligned} [B_0^T Q B(d) + W_0^T W(d)] u(k) &= \\ = -B_0^T Q A(d) y(k) + B_0^T Q y^{zad}(k). \end{aligned} \quad (2)$$

З останнього рівняння можна визначити закон керування (матриця $B_0^T Q B_0 + W_0^T W_0$ не є сингулярною, тому що всі її складові - несингулярні матриці).

У відповідності до рівнянь (1) та (2) структура регулятора залежить від матриць параметрів моделі $A(d)$ та $B(d)$, а також від матриць налаштування $W(d)$ та Q . У подальших дослідженнях розглядалися такі структури матриць $A(d)$ та $B(d)$:

- структура А: $A(d) = A_0 + A_1d, B = B_0$,
- структура Б: $A(d) = A + A_0 + A_1d, B = B_0 + B_1d$.

Матриця $Q = I$, а матриця $W(d)$ розглядалася у двох варіантах:

- фільтр А: $W(d) = I$,
- фільтр Б: $W(d) = 0,2(1-d)I$.

Найбільш ефективною виявилась система керування даним об'єктом, що використовує структуру Б з фільтром Б та алгоритм Б і В ідентифікації параметрів математичної моделі. Подальші дослідження проводились для цієї системи керування.

4. Дослідження ефективності адаптивної системи в умовах дії збурень

Вплив збурень на роботу адаптивної системи керування досліджувався на прикладі однієї (третьої) температурної зони. Як збурення розглядалась зміна потужності споживання тепла у 3-ій зоні (наприклад, за рахунок дисипації). У момент часу $k=75$ ця потужність була збільшена на 75 %, а у момент часу $k=175$ - зменшена на 40 % з введенням синусоїдального збурення амплітудою 20 % від величини потужності.

Результати проведеного дослідження представлені на рис. 1-9. У системі з алгоритмом Б вплив збурень, різних за характером, практично невідчувається (рис. 1). Однак збурення викликають значні зміни сигналу керування 3-ї зони (рис. 2, 3). Отже, можна стверджувати, що здатність адаптивного регулятора компенсувати збурення достатньо висока.

Аналогічні дослідження були проведені з адаптивною системою, яка використовує алгоритм В. Отримані результати підтверджують ефективність пропо-

нованої системи. Температура 3-ї зони залишається у межах ± 2 °C ($\pm 1,5$ %) при дії обох збурень (рис. 4-6), а зміни температур 1-ї та 2-ї зон не перевищують $\pm 0,5$ °C (рис. 7). У той же час сигнал керування у 3-ій зоні змінюється приблизно на 50 % в умовах дії східчастого збурення у момент часу $k=75$ та на приблизно 40 % при дії синусоїдального збурення у момент часу $k=175$ (рис. 8, 9).

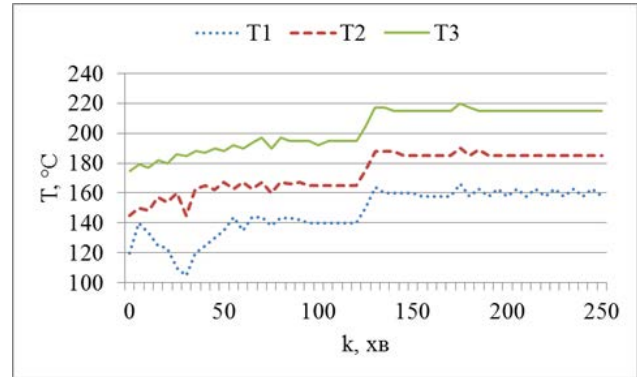


Рис. 1. Зміна температур по зонах при використанні алгоритму Б в умовах дії збурень, де T1— температура у 1-й зоні екструдера, °C, T2 - температура у 2-й зоні екструдера, °C, T3 - температура у 3-й зоні екструдера, °C

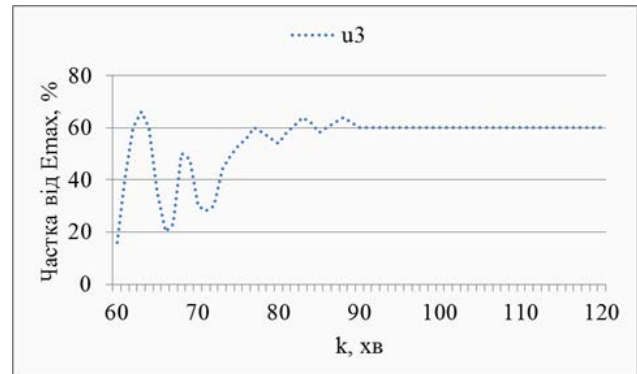


Рис. 2. Зміна сигналу керування при східчастому збуренні у момент часу $k=75$ (алгоритм Б), де u_3 - сигнал керування у 3-й зоні

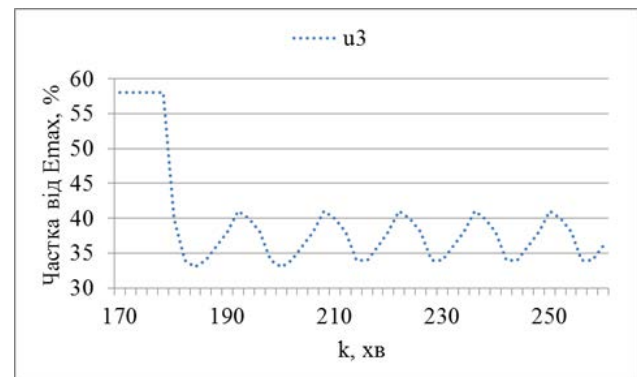


Рис. 3. Зміна сигналу керування при синусоїдальному збуренні у момент часу $k=175$ (алгоритм Б), де u_3 - сигнал керування у 3-й зоні

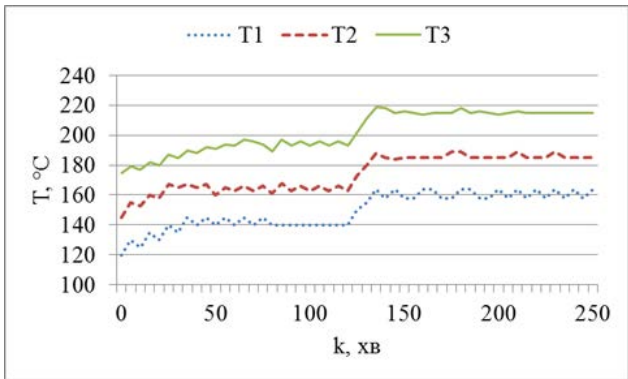


Рис. 4. Зміна температур по зонах при використанні алгоритму В в умовах дії збурень, де T1— температура у 1-й зоні екструдера, °C, T2 - температура у 2-й зоні екструдера, °C, T3 - температура у 3-й зоні екструдера, °C

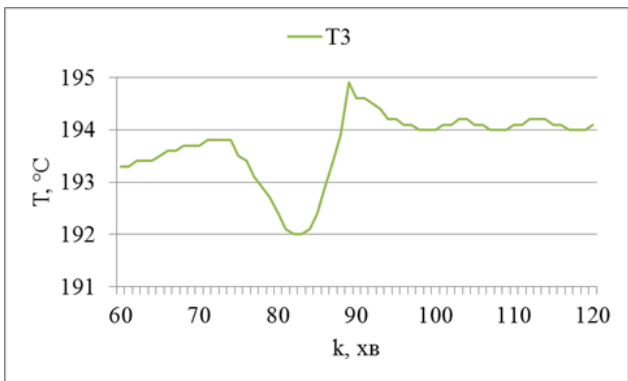


Рис. 5. Збільшене зображення зміни температур у 3-й зоні при східчастому збуренні у момент часу k=75 (алгоритм В)

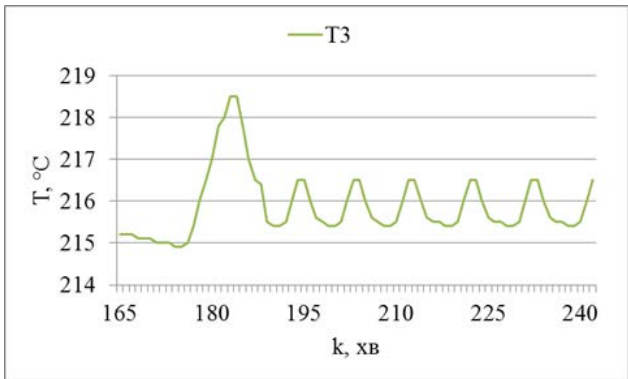
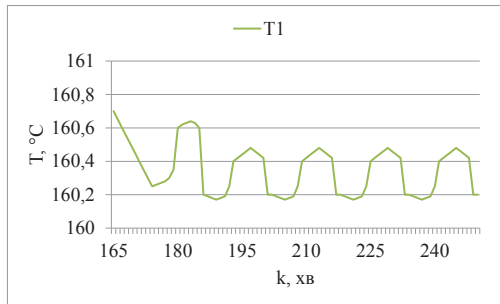
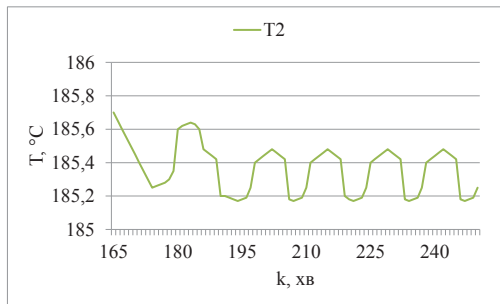


Рис. 6. Збільшене зображення зміни температур у 3-й зоні при синусоїдальному збуренні у момент часу k=175 (алгоритм В)

Провівши аналіз зображених вище графіків, можна побачити, що система керування відпрацьовує відповідне завдання в умовах внесення у її роботу збурень різного типу та задовольняє регламент температур.



а



б

Рис. 7. Збільшене зображення зміни температур у 1-й (а) та 2-й (б) зонах при східчастому збуренні у 3-й зоні у момент часу k=175 (алгоритм В): а – збільшене зображення температури у 1-й зоні; б - збільшене зображення температури у 2-й зоні

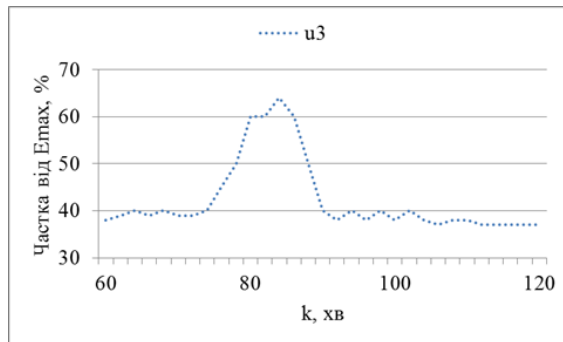


Рис. 8. Зміна сигналу керування у 3-й зоні при східчастому збуренні у момент часу k=75 (алгоритм В), де u3 – сигнал керування у 3-й зоні

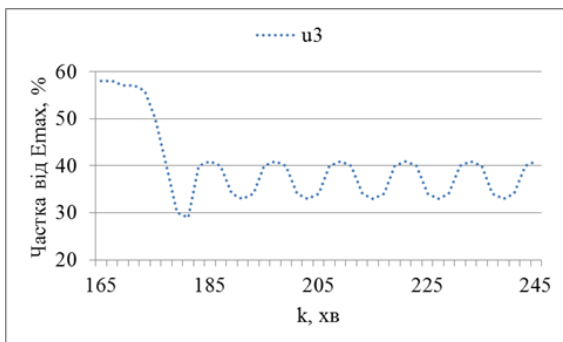


Рис. 9. Зміна сигналу керування у 3-й зоні при синусоїдальному збуренні у момент часу k=175 (алгоритм В)

5. Висновки

У роботі проведено дослідження адаптивної системи керування температурним режимом процесу екструзії полімерних матеріалів у режимі нормальної експлуатації в умовах дії збурень. Адаптивна система керування побудована на основі моделі авторегресії-ковзного середнього та використовує рекурент-

ний метод найменших квадратів та його модифікації для оцінки параметрів моделі. Як збурення розглядалась зміна потужності споживання тепла, наприклад, за рахунок дисипації механічної енергії.

Запропонована система керування демонструє високу ефективність і в умовах дії збурень різної природи, про що свідчать представлені результати проведених досліджень.

Література

1. Рябцев, Г. Л. Полімерні пакувальні матеріали (стан та шляхи вдосконалення) [Текст] / Г. Л. Рябцев, І. О. Мікульонок // Упаковка. – 2006. – № 1. – С. 42–47.
2. Мікульонок, І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини [Текст]: моногр. / І. О. Мікульонок. – К.: НТУУ “КПІ”, 2009. – 264 с.
3. Ким, В. С. Теория и практика экструзии полимеров [Текст] / В. С. Ким. – КОЛОСС, 2005. – 568 с.
4. Рауендаль, К. Экструзия полимеров [Текст] / К. Рауендаль. – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
5. Tadmor, Z. Principles of Polymer Processing [Text] / Z. Tadmor, C. G. Gogos. – Wiley Interscience, 2006. – 961 p.
6. Рауендаль, К. Выявление и устранение проблем в экструзии [Текст] / К. Рауендаль, М. П. Норега, Х. Харрис. – СПб.: Профессия, 2008. – 328 с.
7. Abeykoon, C. Extruder Melt Temperature Control With Fuzzy Logic [Text] / C. Abeykoon, K. Li, M. McAfee, P. J. Martin, G. W. Irwin // Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy), 2011. – P. 8577–8582. doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.01576
8. Abeykoon, C. Modelling the effects of operating conditions on motor power consumption in single screw extrusion [Text] / C. Abeykoon, M. McAfee, K. Li, P. J. Martin, J. Deng, A. L. Kelly // LSMS/ICSEE, Part II, LNCS 6329, 2010. – P. 9–20. doi:10.1007/978-3-642-15597-0_2
9. Tsai, C.-C. Fuzzy supervisory predictive PID control of a plastics extruder barrel [Text] / C.-C. Tsai, Chi-Huang Lu // Journal of the Chinese Institute of Engineers. – 1998. – № 21. – P. 619–624. doi: 10.1080/02533839.1998.9670423
10. Ravi, S. Design of Intelligent Self-Tuning GA ANFIS Temperature Controller for Plastic Extrusion System [Text] / S. Ravi, M. Sudha, P. Balakrishnan // Hindawi Publishing Corporation Modelling and Simulation in Engineering Volume. – 2011. – № 12. – P. 611–624. doi:10.1155/2011/101437
11. Yusuf, I. Temperature Control for Plastic Extruder Used Fuzzy Genetic Algorithms [Text] / I. Yusuf, N. Iksan, N. A. Suryana Herman // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer scientists, 2010. – № 2.
12. Хобин, В. А. Управление процессом экструдирования растительного сырья в условиях ограниченности ресурсов и неопределенностей [Текст]: сб. докл. II Всеукр. науч.-практ. конф./ В. А. Хобин, В. Б. Егоров // Информационные технологии и автоматизация – 2009. – С. 30–31.
13. Жученко, О. А. Адаптивна система керування температурним режимом процесу екструзії полімерних матеріалів [Текст] / О. А. Жученко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 3, № 2 (69). – С. 57–61.
14. Острем, К. Системы управления с ЭВМ [Текст]: учебник / К. Острем, Б. Виттенмарк. – М.: Мир, 1987. – 480 с.
15. Wang, Y.-T. Modelling and Control for a Thermal Barrel in Plastic Molding Process [Text] / Y.-T. Wang, S.-L. Wu // Tamkang Journal of Science and Engineering. – 2006. – Vol. 9, № 2. – P. 129–140.
16. Lu, Q. Model and strategies for computer control of a twin-extruder [Text] / Q. Lu, S. J. Mulvaney, F. Hsieh, H. E. Huff // Food Control. – 1993. – Vol. 4, Issue 1. – P. 25–33. doi:10.1016/0956-7135(93)90124-7
17. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления [Текст]: учебник / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 683 с.
18. Жученко, О. А. Дослідження алгоритмів ідентифікації параметрів моделі в адаптивній системі керування екструдером [Текст] / О. А. Жученко, П. І. Бідюк // Адаптивні системи автоматичного управління. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2010. – Вип. 16 (36). – С. 147–154.