

**В. І. Сівецький<sup>1</sup>**  
**О. М. Халімовський<sup>1</sup>**  
**О. Л. Сокольський<sup>1</sup>**  
**В. М. Куриленко<sup>1</sup>**  
**О. С. Богута<sup>1</sup>**

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Розроблено систему автоматичного керування швидкості руху штока інжектора в процесі формування виробів з інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів з урахуванням зміни в'язкості полімеру в порції, що містить також інтелектуальні датчики і транспортується штоком інжектора в задані просторові координати розплаву полімеру основного каналу головки екструдера.*

**Ключові слова:** автоматизація, формування, інтелектуальний датчик, векторне керування, асинхронний електропривід.

### **Вступ**

Завдання щодо отримання інформації про характеристики відповідальних деталей та вузлів, зокрема про їх напружено-деформований стан (НДС) в режимі реального часу, є надзвичайно актуальним. Забезпечити дистанційну діагностику стану цих виробів безпосередньо під час їх експлуатації [1], [2] можна за допомогою використання інтелектуальних датчиків (ІД), які вводяться безпосередньо у матеріал виробу в процесі формування. Під час виготовлення таких інтелектуальних виробів необхідно циклічно вводити ІД на задану глибину у визначені координати виробу безпосередньо в процесі його формування. Автоматизація процесу виробництва ІПКМ дозволить отримати вироби з ІД для безперервного неруйнівного контролю за їх НДС.

*Метою роботи є розробка системи автоматичного керування швидкості руху штока інжектора для циклічного введення суміші з ІД у задані просторові координати розплаву полімеру, що враховує зміну фізико-механічних властивостей суміші під час формування виробів з полімерних композиційних матеріалів.*

### **Результати досліджень**

Введення ІД під час безперервного технологічного процесу формування виробів з термопластичних полімерів за методом, що пропонується, досягається шляхом періодичного впорскування суміші розплаву полімеру з ІД на задану глибину в розплав полімеру у формувальний канал головки екструдера. Склад суміші, що впорскується, може бути з того ж самого полімеру, з якого формується виріб, або інший, сумісний з ним.

Заглиблення суміші з датчиками на задану глибину досягається завдяки швидкості її руху, достатньої для подолання в'язкого опору полімеру в основному потоці екструдера.

З метою забезпечення дозованого запрограмованого розподілу ІД в екструдованому виробі для подальшої розробки технологічної установки вибрано модифікований варіант конструктивного оформлення інжекційного пристрою [3] на основі аналізу варіантів оснащення формуючої головки додатковим пристроєм для введення суміші певної концентрації. Інжекційний пристрій складається з черв'ячного пластикатора, який готує суміш розплаву полімеру з ІД, та інжектора. Черв'ячний пластикатор під час наповнення інжекційного каналу полімером підтримує в ньому тиск, рівний тиску у формувальному каналі головки. Після цього шток інжектора здійснює впорскування сумі-

ші з ІД зі швидкістю переміщення штока. Проектуючи систему автоматичного керування, необхідно враховувати можливу зміну в'язкості полімеру в пластикаторі.

Функціональна схема системи автоматизації, що забезпечує транспортування суміші з ІД в розплав полімеру екструдера, показана на рис. 1. Особливість алгоритму роботи системи полягає у тому, що для забезпечення заданої глибини занурення полімеру з ІД в основний канал екструдера враховується зміна в'язкості полімеру пластикатора.



Рис. 1. Функціональна схема системи автоматизації

Контроль зміни глибини занурення полімеру з ІД можна оцінювати за рахунок зміни характеристик сигналу відгуку. Зі зміною величини сигналу відгуку в процесі його обробки за алгоритмом розрахунку визначається кількісна оцінка в'язкості полімеру з ІД, що подається в канал інжектора пластикатором зі швидкістю  $v_2$ . В цьому випадку для забезпечення заданої глибини  $h$  занурення ІД необхідно корегувати розмір порції, або лінійну швидкість руху штока інжектора  $v_1$  при транспортуванні ІД в формувальний канал головки екструдера. Об'єм порції полімеру з ІД, що формується пластикатором у циліндрі штока визначається швидкістю руху полімеру  $v_2$ , поперечним перерізом його вихідного отвору та тривалістю циклу завантаження. Швидкість руху полімеру  $v_2$  визначається величиною сигналу задання частоти обертання вала двигуна електроприводу пластикатора  $w_{02}$ . Якщо швидкість руху штока у фазі завантаження полімеру залишається незмінною, зі зміною об'єму порції, що інжектуються в формувальний канал головки екструдера, необхідно змінювати час завантаження полімеру з ІД в циліндр інжектора. Як наслідок, змінюється розрахунковий час робочого циклу алгоритму керування.

Зі зміною часу завантаження циліндру, для пристрою оцінки глибини розташування ІД у виробі потрібно корегувати його алгоритм роботи. У разі корекції лінійної швидкості руху штока інжектора при транспортуванні ІД в канал екструдера час робочого циклу суттєво не зміниться тому, що час формування порції суттєво більше часу її транспортування.

Для забезпечення транспортування суміші в задані просторові координати розроблено систему автоматичного керування (САК) швидкістю руху штока інжектора. Як електропривод (ЕП) штока під час проектування САК вибрано векторно-керований асинхронний електропривід. Лінійний рух штока забезпечується за рахунок передачі гвинт-гайка від вала двигуна, що обертається з частотою  $w_1$ . Для синтезу САК застосовувались стандартні налаштування [4].

Для моделювання САК вважається, що швидкість руху порції суміші з ІД  $v_1$  на вході до каналу екструдера з розплавом полімеру дорівнює лінійній швидкості руху штока у фазі впорскування.

Розрахунок необхідної швидкості руху штока інжектора для впорскуванні порції суміші з ІД на задану глибину виконувався за результатами моделювання процесу введення ІД у потік полімерного матеріалу. Моделювання здійснювалось на основі положень методу скінченних елементів. Розв'язувалась стаціонарна задача в ізотермічному наближенні. За основу взято узагальнену модель ньютонівського потоку [5], що базується на розв'язанні рівнянь нерозривності і руху нестисливої рідини.

Моделюючи процес занурення полімерної суміші з ІД в полімер формувального каналу головки екструдера, стан розплаву полімерного матеріалу вважається таким, що підпорядковується степеневому закону в'язкості:

$$\mu = \mu_0 \dot{\gamma}^{n-1},$$

де  $\mu_0$  — коефіцієнт консистенції;  $n$  — індекс текучості, знаходиться за довідковими даними для кожної рідини;  $\dot{\gamma}$  — швидкість зсуву під час течії з витратою  $Q$  в певній ділянці каналу діаметром  $d$

$$\dot{\gamma} = \frac{32Q}{\pi d^3}.$$

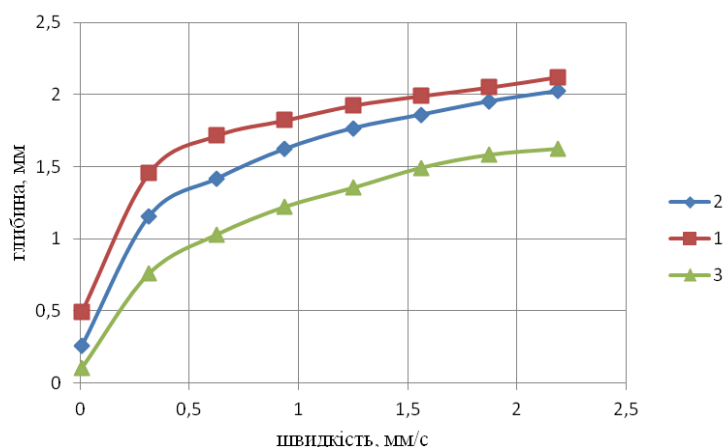


Рис. 2. Залежність глибини занурення ІД у складі сумішей різних полімерів:

- 1 — поліетилен високої густини (ПЕВГ) марки 203-003;  
 2 — поліетилен низької густини (ПЕНГ) марки 10812-020;  
 3 — співполімер етилену та вінілацетату (СЕВА) марки 11104-030

ність у вигляді

$$h = a + k_1 v,$$

де  $a$  — залежить від в'язкості полімеру;  $k_1$  — коефіцієнт пропорційності.

Для підтвердження можливості введення інтелектуальних датчиків на розрахункову глибину за допомогою розробленого пристрою проведено серію експериментальних досліджень. Швидкість інжекції становила 0,3...1 м/с. До основного потоку полімеру, яким був незабарвлений ПЕНГ 10812-020, інжектувалась суміш з іншого полімеру та барвника (для контрасту). Після виходу з філь'ери полімерний пруток охолоджувався та різався на зразки. Глибина занурення суміші вимірювалась по центру забарвленої суміші. Результати експериментів показано на рис. 3.

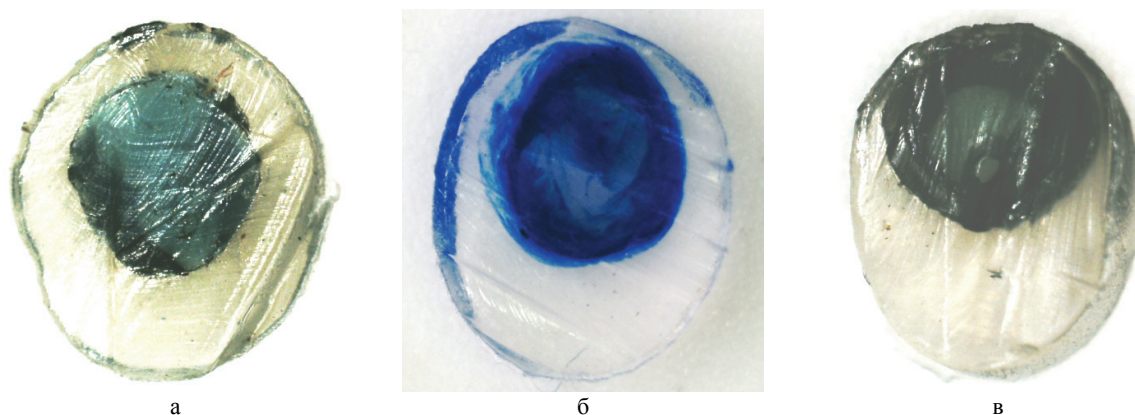


Рис. 3. Перерізи зразків за швидкості інжекції 1 м/с:  
 а — ПЕВГ марки 203-003; б — ПЕНГ марки 10812-020; в — СЕВА марки 11104-030

З результатів експериментів випливає, що збільшення в'язкості інжектованої суміші зумовлює збільшення глибини її занурення в основний потік, що відповідає розрахунковим даним.

Значення глибини занурення інжектованих полімерних сумішей різних марок (розрахункові та усереднені експериментальні) на швидкості в інжекційному каналі 0,3 м/с та 1 м/с показано в таблиці.

Значення глибини занурення інжектованих полімерних сумішей різних марок

Полімер	ПЕВП		ПЕНП		СЕВА	
	розрахункове	експериментальне	розрахункове	експериментальне	розрахункове	експериментальне
0,3	1,456	1,54	1,156	1,12	0,761	0,68
1	1,822	1,95	1,624	1,70	1,221	1,26

Результати моделювання САК швидкістю руху штоку інжектора показані на рисунках 4, 5.

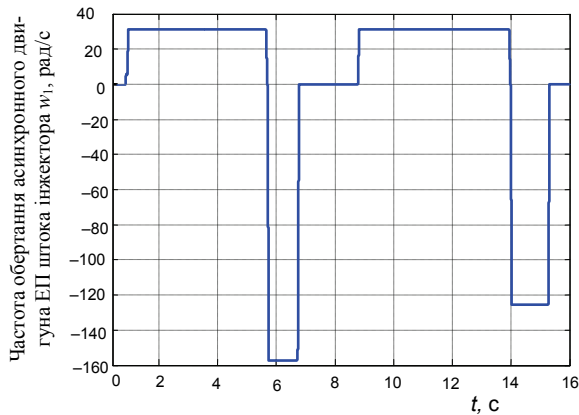


Рис. 4. Частота обертання асинхронного двигуна ЕП штока інжектора

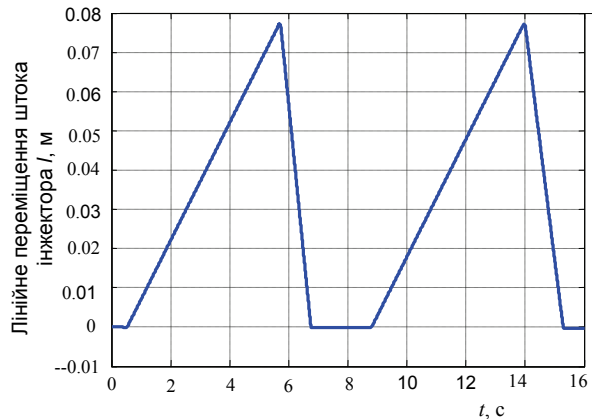


Рис. 5. Лінійне переміщення штока інжектора 1, м

Частота обертання валу двигуна (рис. 4) у фазі впорскування першого циклу з 5,75 с до 6,75 с дорівнює номінальній для транспортування порції полімеру із заданою в'язкістю  $\mu_1$  разом з ІД до екструдера. З 8,8 с у разі збільшення у другому циклі в'язкості полімеру до величини  $\mu_2$  швидкість двигуна у фазі впорскування з 14 с до 15,25 с зменшується, але час його руху збільшується несуттєво, порівняно з часом циклу, що дорівнює 8,5 с. В обох циклах САК забезпечує транспортування порції полімеру з ІД у задані просторові координати розплаву полімеру у формувальному каналі головки екструдера.

Аналіз результатів моделювання САК показав, що відхилення часу циклу, яке пов'язане із зміною часу фази впорскування із заданим відхиленням діапазону в'язкості полімеру складає не більше 3% і є допустимим при ідентифікації НДС виробів з ІПКМ.

### Висновки

За допомогою розробленого пристрою, що імітує введення порції полімерної суміші з ІД під час формування виробу, проведено експериментальні дослідження. Результати експериментальних досліджень підтвердили попередні розрахунки. Моделювання розробленої САК швидкістю руху штока інжектора підтвердили її працездатність для транспортування суміші з ІД в задані просторові координати з визначеним кроком зі зміною фізико-механічних властивостей суміші. Використання САК дозволить забезпечити умови для безперервного неруйнівного контролю НДС виробів з ІПКМ в процесі їх експлуатації.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івиський, О. С. Колосов, та В. М. Куриленко, «Методи та пристрої для виготовлення виробів з інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів», *Вісник НТУ «ХПІ», Механіко-технологічні системи та комплекси*, №. 4, с. 95-101, 2016.
- [2] I. Ivitskiy, V. Sivetskiy, V. Bazhenov, and D. Ivitska, «Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 5(85), p. 4-9, 2017.
- [3] О. М. Халімовський, О. Л. Сокольський, та О. С. Богута, «Оцінка можливості використання електроприводу у пристроях для виготовлення виробів з інтелектуальних полімерних композитів» у *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. XVII міжнар. наук.-техн. конференція*, Одеса, Україна, 8-13 червня 2017 р., с. 114-115.
- [4] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, 2nd edition. Springer, Berlin, 1996.
- [5] R. B. Bird, C. F. Curtiss, R. C. Armstrong, and O. Hassager, *Dynamics of Polymeric Liquid*. New York: Wiley-Interscience, 1987, 672 p.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.01.2018

**Сівецький Володимир Іванович** — канд. техн. наук, професор, завідувач кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування;

**Халімовський Олексій Модестович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу, e-mail: o.khalimovskyy@ukr.net ;

**Сокольський Олександр Леонідович** — канд. техн. наук, доцент кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування, e-mail: o.sokolskiy@kpi.ua ;

**Куриленко Валерій Миколайович** — аспірант кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування;

**Богута Олександр Сергійович** — студент факультету електроенергетики та автоматики.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

**V. I. Sivetskyi<sup>1</sup>**  
**O. M. Khalimovskyi<sup>1</sup>**  
**O. L. Sokolskyi<sup>1</sup>**  
**V. M. Kurylenko<sup>1</sup>**  
**O. S. Boguta<sup>1</sup>**

## **Automatization of the Intellectual Polymeric Composition Materials Production**

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

*In order to remotely diagnose the responsible details and units state, it is extremely important to receive information about their stress-strain state in real-time. The remote diagnostics of these products condition providing directly during their operation possible through the use of intelligent sensors (IS), which are introduced into the specified coordinates of the product directly in the process of its molding. Inputting of the IS during the molding continuous technological process of the thermoplastic polymers products according to the proposed method is achieved by periodically introducing a mixture of polymer melt with an IS to a predetermined depth into the polymer melt of the forming channel of the extrusion die. To provide of the mixture transportation in the preset spatial coordinates, an automatic speed control system has been developed for the injector rod movement. A vector-controlled asynchronous electric drive was selected as the electric drive of the rod in the design of the control system. The calculation of the required speed of the injector rod to inject a portion of the mixture with an IS at a predetermined depth was performed based on the results of the simulation of the introduction of the IS into the stream of polymer material. Simulation of the developed speed control system of the injector rod confirmed its ability to transport the mixture with the IS in the given spatial coordinates with a definite step when changing the physical and mechanical properties of the mixture. The analysis of the simulation results of the speed control system showed that the deviation of the cycle time associated with the change in the time of the injection phase with a given deviation of the polymer viscosity range is acceptable in identifying a stress-strain state of products from intelligent polymer composite materials. Possibility of introducing intelligent sensors to the estimated depth with the help of the developed device simulating the introduction of a portion of a polymeric mixture with an IS in the formation of the product, confirmed by a series of experimental studies. From the results of experiments, it follows that increasing the viscosity of the injected mixture leads to an increase in the depth of its immersion in the main stream, which corresponds to the estimated data.*

**Keywords:** automation, formation, intelligent sensor, vector control, induction electric drive, engine.

**Sivetskyi Volodymyr I.** — Cand. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Chemical, Polymer and Silica Engineering;

**Khalimovskyi Oleksii M.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Electromechanical Systems Automation and Electrical Drives, e-mail: o.khalimovskyy@ukr.net ;

**Sokolskyi Oleksandr L.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Chemical, Polymer and Silica Engineering, e-mail: o.sokolskiy@kpi.ua ;

**Kurylenko Valerii M.** — Post-Graduate Student of the Chair of Chemical, Polymer and Silica Engineering;

**Boguta Oleksandr S.** — Student of the Department of Electricity and Automation

**В. И. Сивецкий<sup>1</sup>**  
**А. М. Халимовский<sup>1</sup>**  
**А. Л. Сокольский<sup>1</sup>**  
**В. Н. Куриленко<sup>1</sup>**  
**А. С. Богута<sup>1</sup>**

## **Автоматизация процесса производства интеллектуальных полимерных композиционных материалов**

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Разработана система автоматического управления скорости движения штока инжектора в процессе формования изделий из интеллектуальных полимерных композиционных материалов с учетом изменения вязкости полимера в порции, содержащей также интеллектуальные датчики и транспортируемой штоком инжектора в заданные пространственные координаты расплава полимера основного канала головки экструдера.*

**Ключевые слова:** автоматизация, формование, интеллектуальный датчик, векторное управление, асинхронный электропривод.

**Сивецкий Владимир Иванович** — канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой химического, полимерного и силикатного машиностроения;

**Халимовский Алексей Модестович** — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации электромеханических систем и электропривода, e-mail: o.khalimovskyy@ukr.net ;

**Сокольский Александр Леонидович** — канд. техн. наук, доцент кафедры химического, полимерного и силикатного машиностроения, e-mail: o.sokolskiy@kpi.ua ;

**Куриленко Валерий Николаевич** — аспирант кафедры химического, полимерного и силикатного машиностроения;

**Богута Александр Сергеевич** — студент факультета электроэнергетики и автоматики