

УДК 621.31:678.027.3

© Халімовський О.М.¹, Сокольський О.Л.², Куриленко В.М.³**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ
З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ
З УРАХУВАННЯМ ВІДНОСНОЇ ШВИДКОСТІ РУХУ КОМПОНЕНТІВ**

Розроблено конструкцію пристрою, яка дозволяє забезпечити введення інтелектуальних датчиків (ІД) в структуру виробів з композитних полімерних матеріалів для контролю їх напружено-деформаційного стану. За результатами експериментальних досліджень було уточнено алгоритм узгодженої роботи векторно-керованих асинхронних електроприводів елементів пристрою. Наведено результати моделювання перехідних процесів режимів роботи системи автоматичного введення ІД в задані просторові координати полімеру каналу екструдера.

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

Халимовский А.М., Сокольский А.Л., Куриленко В.Н. Автоматизация процесса изготовления изделий из интеллектуальных полимерных композитов с учетом относительной скорости движения компонентов. Разработана конструкция устройства, которая позволяет обеспечить введение интеллектуальных датчиков (ИД) в структуру изделий из композитных полимерных материалов для контроля их напряженно-деформационного состояния. По результатам экспериментальных исследований был уточнен алгоритм согласованной работы векторно-управляемых асинхронных электроприводов элементов устройства. Приведены результаты моделирования переходных процессов режимов работы системы автоматического введения ИД в заданные пространственные координаты полимера канала экструдера.

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

O.M. Khalimovskyy, O.L. Sokolskiy, V.M. Kurylenko. Automation of manufacturing products from intelligent polymeric composites with regard to the components relative velocity. A device design has been developed that makes it possible to insert intelligent sensors (IS) into the products from composite polymeric materials to control their stress-strain state. The results of the experiments made it possible to improve the algorithm of coordinated work of the vector controlled induction electric drive of the device elements. The simulation results of the transient processes of the operating conditions of the IS automatic insertions into the predetermined spatial coordinates of the extruder channel polymer have been shown. The presence of such sensors within the given spatial coordinates of a product is realized due to rapid movement of molten polymer with included IS under use of the scheme of influx fitting to the polymer that moves in the main channel of the extruder. Based on the simulation results a dependence function for the immersion depth of the polymer melt with included IS from its movement velocity has been obtained. The approximation of this dependence via a polynomial function of 5-th order made it possible to determine with the relative error less than 1% analytically the linear velocity of the rod in the cylinder injector for transporting of the molten polymer with included IS to the predetermined spatial coordinates of the polymer channel of the extruder. For inserting of the intelligent sensors (IS) into the depth of 1.2 mm a required motor speed of

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, o.khalimovskyy@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, o.sokolskiy@kpi.ua

³ асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

electric drive was calculated under considering of the peculiarities of the chosen kinematic scheme. The obtained experimental data have confirmed the possibility of technical implementation of the developed device as well as allowed refining of the algorithm for the automation system. The simulation results for the system have been presented. The system used the vector-controlled asynchronous electric drives with standard settings for their contours to provide the agreed movement of the plasticiser screw and the injector rod by inserting of IS at a given depth with a given step.

Keywords: automation; molding; intelligent sensor; vector control; induction electric drive.

Постановка проблеми. Високовідповідальні конструктивні елементи та вироби, які здатні сигналізувати про настання критичних навантажень або зміни контрольованих параметрів, називають інтелектуальними. З метою забезпечення максимальних експлуатаційних характеристик відповідальних конструктивних елементів останнім часом все ширше використовують наномодифіковані композиційні матеріали.

Наномодифіковані інтелектуальні полімерні композиційні матеріали (ІПКМ) – це полімерні композиційні матеріали, які мають специфічні властивості завдяки їх модифікації нанонаповнювачами з уведеними у їх структуру інтелектуальними датчиками (ІД), що дозволяють контролювати напружено-деформований стан (НДС) виробів та здійснювати певні перетворення форми або структури матеріалу [1].

Для оцінки якості структури матеріалу виробів безпосередньо у процесі їх виготовлення необхідно використовувати методи неруйнівного контролю. На сьогоднішній день визначення НДС виробу та якості готових виробів з композиційних полімерних матеріалів (ІПКМ) виконують за допомогою застосування методів руйнівного контролю в процесі лабораторних досліджень. Використання методів неруйнівного контролю передбачає отримання, обробку та оцінку інформації про стан виробу у процесі їх виробництва. Одним з варіантів забезпечення можливості такого контролю є використання ІД, введених безпосередньо у виріб під час його виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з провідних тенденцій розвитку світової індустрії є збільшення числа досліджень і публікацій в області нанотехнологій, зростання числа патентів по нанотехнологічних розробках. Разом з тим збільшується спектр можливих застосувань інтелектуальних датчиків та актюаторів у складі композиційних матеріалів.

Бурхливий розвиток наукових досліджень в області нанотехнологій відбивається у величезному потоці публікацій (щорічно їх з'являється близько 800 тис.), а також зростанні чисельності патентів на винаходи, за кількістю яких лідерство належить Китаю. На частку китайських компаній, університетів і приватних осіб припадає близько 30% всіх виданих в світі патентів. У підсумку – на сучасному етапі Україна значно відстає від світових нанотехнологічних лідерів – Китаю, США та ЄС як за показниками розвитку науково-дослідних робіт, так і по комерціалізації винаходів. Про це свідчить і число міжнародних нанотехнологічних патентів – в 2016 році їх було всього близько 30 (питома вага українських винаходів – менше 0,2%).

На підставі аналізу світового ринку нанотехнологій можна виділити дві головні тенденції його розвитку:

- збільшення числа досліджень і публікацій в області нанотехнології, зростання числа патентів та науково-технічних розробок в даній галузі;
- зростання обсягу інвестицій в галузь, посилення конкурентної боротьби за лідерство між країнами.

На даний момент частка України в загальносвітовому технологічному секторі становить близько 0,3%, а на ринку нанотехнологій – 0,04%. Це зумовлено тим, що промисловість України звернула свою увагу на розробки в галузі нанотехнологій значно пізніше, ніж країни-лідери в цій галузі.

Український ринок нанотехнологій знаходиться на початковому етапі свого становлення, комерційні застосування нанотехнологій в промисловості практично відсутні, хоча наукові розробки у цій тематиці проводяться [2]. Свідчить про це той факт, що чисельність підприємств, які вже приступили до етапу комерціалізації своїх винаходів, становить менше 20% від загального числа учасників сектора.

Для контролю НДС у виробі при його експлуатації можна використовувати інтелектуальні датчики. ІД являють собою мініатюрні вимірювальні пристрої у вигляді конструктивної сукупності одного або декількох вимірювальних перетворювачів величини, яка вимірюється і контролюється, який виробляє вихідний сигнал, зручний для дистанційного передавання, зберігання та використання у системах керування, і має нормовані характеристики. Наприклад, для перетворення деформації в електричне поле ІД є частинками п'єзокераміки $BaTiO_3$, а для перетворення в магнітне поле – з ферромагнітного матеріалу. В останньому випадку для вимірювання глибини занурення та зміни напруження використовувався електростатичний амплітудно-фазовий спосіб неруйнівного контролю з використанням ортогональних опорних сигналів [3].

Системи, що складаються з одного датчика, можуть давати лише обмежену інформацію. При використанні системи сенсорів виникає проблема обробки величезної кількості даних. Це вимагає введення обмежень у кількості датчиків та контрольованих у виборі параметрів для забезпечення адекватної оцінки стану матеріалу і конструкції [4].

Мета статті. При серійному виробництві виробів з ППКМ, які можуть надійно передавати достовірну інформацію, необхідно досягти в автоматичному режимі роботи установки можливості точного позиціонування обмеженої кількості ІД в заданих координатах об'єму виробів. Для виробів, які отримуються найбільш поширеними методами (пресування, екструзії та лиття під тиском), необхідно розробити систему автоматичного керування інжекційним введенням ІД у компоненти ППКМ.

Виклад основного матеріалу. *Розробка конструкції пристрою дозованого введення ІД для процесів виготовлення виробів з ППКМ.* Існує багато різноманітних профільно-погонажних конструктивних елементів, наприклад, в авіакосмічній, суднобудівній, автомобілебудівній промисловостях, де життєво необхідно контролювати їх стан в процесі експлуатації. Широка гама таких виробів виготовляється екструзійним методом, який дозволяє отримувати профільні вироби різноманітної конфігурації при невеликих затратах. У зв'язку з розвитком інноваційних технологій контролю напружено-деформованого стану конструкційних виробів задача введення ІД в ході технологічних процесів пресування, екструзії та лиття під тиском є однією з актуальних і потребує глибокого дослідження. Типові конструкції формуючих головок для виробництва профільних погонажних виробів не забезпечують цільове введення ІД в найбільш небезпечні зони конструкції виробу. Можливість введення датчиків у процесі екструзії за рахунок додаткових живлячих пристроїв досліджено в [2]. Подача полімеру з ІД може відбуватися безперервно або циклічно з визначеним кроком.

З метою забезпечення дозованого заданого розподілу ІД в екструдованому виробі пропонується варіант конструктивного оформлення інжекційного пристрою (ІІ). Схема інжекційного пристрою представлена на рис. 1.

За наведеною схемою під час наповнення інжекційного каналу черв'ячний пластикатор 1 підтримує в ньому тиск, рівний тиску у формуючому каналі. Після цього шток інжектора здійснює впрыск суміші з ІД зі швидкістю переміщення штока. Лінійний рух штоку забезпечується за рахунок передачі гвинт-гайка від обертового руху валу двигуна.

На пластикаторі 1 змонтовано систему терморегулювання, яка включає нагрівники та вентилятори. Підтримання заданої температури ускладнено, оскільки черв'як в пластикаторі обертається в періодичному режимі, а в процес підготовки розплавленої суміші суттєвий вклад вносить дисипація механічної енергії від його обертання.

Конструкція пристрою (рис. 1) передбачає заповнення циліндра 2 інжектора полімером з ІД та стрімке введення цього матеріалу штоком в полімер основного каналу екструдера 3, що формує виріб екструзійним способом. Клапан 4 забезпечує можливість послідовно відпрацювати фази наповнення циліндру полімером з ІД та його інжекційного введення. Бажані фізико-механічні властивості виробів з наявними ІД залежать від кількості та глибини h введення цих датчиків. Кількість датчиків у виробі залежить від кроку подачі порції матеріалу з ІД в полімер основного каналу. Задана швидкість руху штоку v визначає час заповнення циліндра та час виштовхування з нього полімеру з датчиками на задану глибину в полімер основного каналу екструдера.

В результаті моделювання процесу введення полімеру з допоміжного каналу в полімер основного каналу було визначено, що максимальна глибина проникнення відповідає куту введення у 25° .

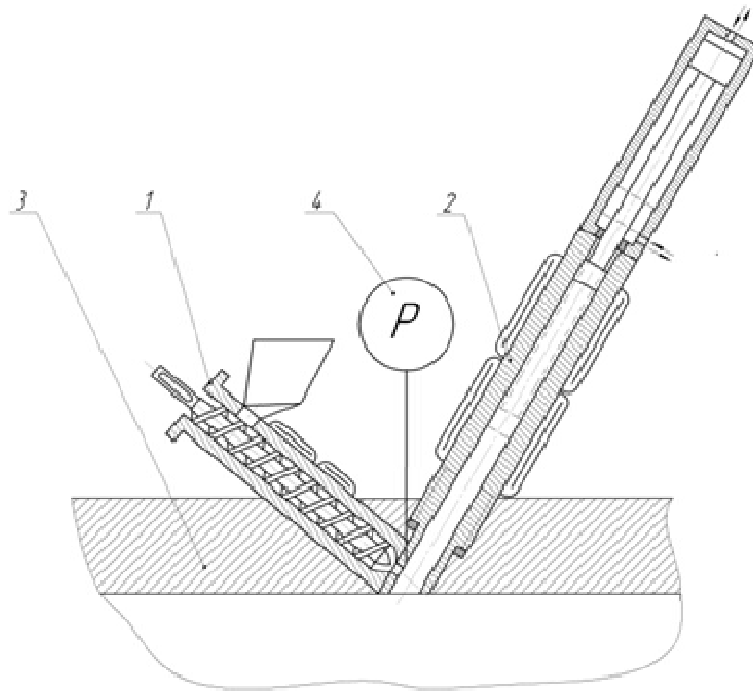


Рис. 1 – Схема інжекційного пристрою

Моделювання процесу введення інтелектуальних датчиків у потік полімерного матеріалу здійснювалось на основі положень методу скінченних елементів. Розв’язувалась стаціонарна задача у ізотермічному наближенні, за основу взята узагальнена модель неньютонівського потоку [5], що базується на вирішенні рівнянь нерозривності і руху нестисливої рідини.

Рідина нестислива (густина $\rho = \text{const}$), тому рівняння нерозривності запишеться у вигляді:

$$-\rho \operatorname{div}(v) = 0.$$

Рівняння руху:

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla P + \nabla \{\tau\},$$

де P – тиск, $\{\tau\}$ – дівіатор тензора напружень.

Стан розплаву полімерного матеріалу вважається таким, що підпорядковується степеневому закону в’язкості.

При апроксимації поліномом 5-го порядку експериментально отриманої залежності глибини занурення h полімеру з ІД в основний канал екструдера від його швидкості руху v отримано рівняння:

$$h = 0,005 v^5 - 0,0865 v^4 + 0,5596 v^3 - 1,7028 v^2 + 2,6025 v + 0,3266$$

Погрішність при апроксимації складає 1%.

Моделювання було проведено за таких умов: середня швидкість полімеру в основному каналі – 0,02 м/с, діаметр поперечного перерізу основного каналу циліндричної форми – 5 мм.

Результати експериментальних досліджень підтвердили можливість введення ІД на задану глибину в полімер основного каналу.

Конструкція експериментальної установки відповідала зображеній на рис. 1. Розплав поліетилену низької густини екструдувался через філь’єру діаметром 5 мм з лінійною швидкістю 10 мм/с. Через інжекційний пристрій впорскувалась суміш такого ж поліетилену з барвником (для контрасту) і інтелектуальними датчиками. У якості інтелектуальних датчиків були використані частинки п’езокераміки розміром 0,2-0,5 мм. Після виходу з філь’єри полімерний пруток охолоджувався та різався на зразки, що представлені на рис. 2.

Введення ІД відбувалось при швидкостях руху штоку 0,1-0,3 м/с. При швидкості руху 0,3 м/с введений в основний канал полімер заповнює його без повного заглиблення в полімер,

що рухається в цьому каналі (рис. 2, а). Його поверхня сформована з полімерів основного та полімеру з пластикатора. При швидкості введення 1м/с повздовж прутка є такі ділянки заглиблення полімеру з ІД в полімер основного каналу, що границя введеного полімеру знаходиться в середині прутка. В перерізі прутка відсутні спільні точки його поверхні і поверхні введеного полімеру з датчиками. В цьому випадку ІД знаходиться у середині прутка на відстані приблизно 1мм від його поверхні. Розташування полімеру з ІД у перерізі прутка кінцевого виробу отримано з характерним шлейфом (рис. 2, б). На думку авторів, це обумовлено реологічними властивостями полімеру, реакція на зміну тиску, в якому розтягнута в часі. Для отримання виробу з ІД екструзійним способом на його зовнішній поверхні не повинно бути наявних ділянок полімеру з датчиками, тому що для контролю його НДС передбачається розташування датчиків в заданих просторових координатах виробу.

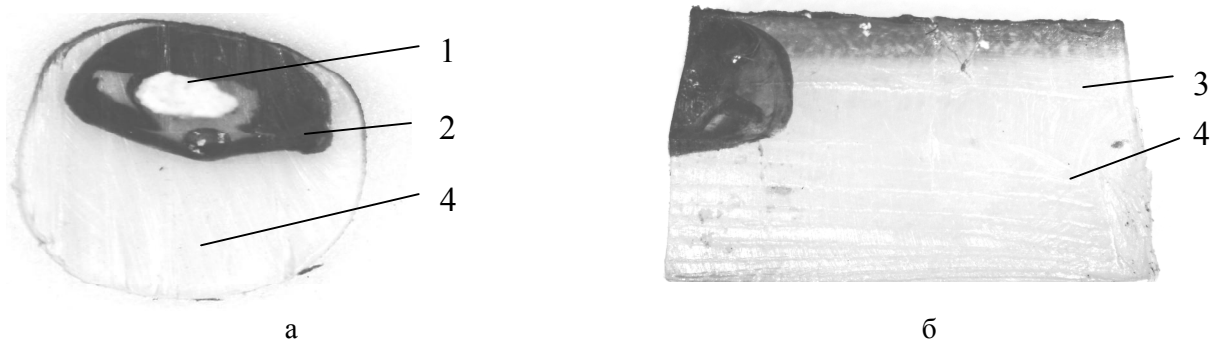


Рис. 2 – Перерізи зразків за швидкості інжекції 0,3 м/с: а – поперечний, б – подовжній; 1 – частинка п'єзокераміки; 2 – суміш полімеру з барвником; 3 – шлейф; 4 – пруток основного полімеру

Розробка системи автоматизації. Аналіз характеру змішування полімерів дозволяє визначити алгоритм роботи системи автоматизації та її структуру. Функціональна схема системи автоматизації представлена на рис. 3.

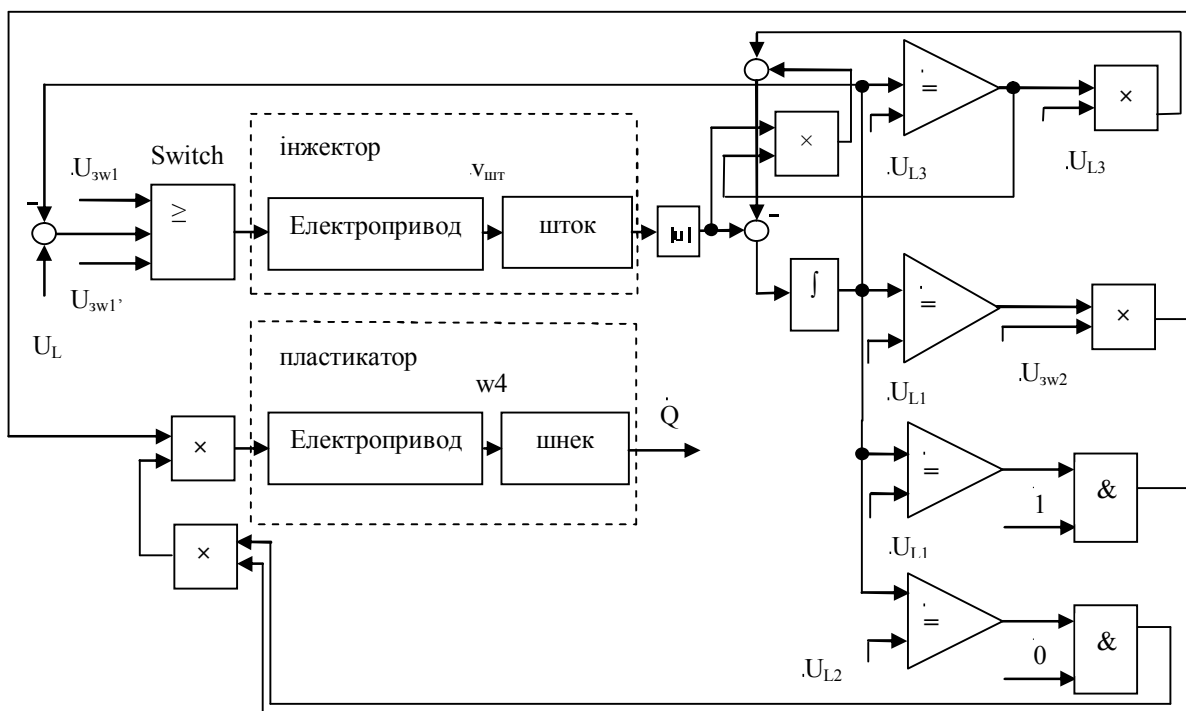


Рис. 3 – Функціональна схема системи

Сигнали U_{3w1} та $U_{3w1'}$ задають швидкість обертання і напрямок руху двигуна ЕП інжектора та відповідну лінійну швидкість $v_{шт}$ штоку. U_{3w2} – сигнал завдання швидкості руху двигуна шнека. Величини U_L , U_{L1} , U_{L2} і U_{L3} відповідають значенням сигналів, що визначають довжину ділянок L , $L1$, $L2$ та $L3$ на його шляху від початку руху у межах циклу в періоди часу 5,1 с, 0,5 с, 4,7 с та 6,2 с. Швидкість обертання шнека $w4$ визначає продуктивність Q пластикатора. ІІ та пластикатор мають індивідуальні електроприводи (ЕП). В процесі роботи установки рух електродвигуна приводу пластикатора тільки в режимах прямого пуску та вільного вибігу при циклічному формуванні порції полімеру недопустимий. Обидва ЕП є керованими. Необхідність використання керованих ЕП є вимогою технологічного процесу. Це обумовлено тим, що для пластикатора з моменту пуску установки в роботу до переходу його в нормальний режим швидкість руху шнека повинна бути регульованою в залежності від температури полімеру. Заданий рівень температури полімера у пластикаторі підтримується за допомогою нагрівальних елементів. У разі необхідності швидкого регулювання температури полімера використовується система охолодження кожуха пластикатора. Для руху штоку необхідність керованості швидкістю його електродвигуна визначена не тільки тривалістю фази наповнення циліндру при формуванні порції полімеру з ІД, а також глибиною транспортування цієї порції в задані просторові координати полімеру основного каналу екструдера, що формує виріб.

Введення ІД за допомогою ІІ з заданою циклічністю можна забезпечити за рахунок реалізації розробленого алгоритму роботи системи. Основною складовою в алгоритмі роботи системи є умова відпрацювання узгодженого руху: штока інжектора та шнека пластикатора. Момент початку руху штока при введенні ІД на задану глибину повинен співпадати з моментом початку гальмування руху шнека пластикатора. Рух штока при цьому триває до моменту заняття їм кінцевого свого положення – у місці розташування вихідного отвору інжектора у корпусі екструдера. Крок подачі ІД визначається як часом наповнення циліндру штока, так і часом тривалості паузи між циклами роботи ІІ.

Реалізація розробленого алгоритму роботи системи передбачає формування порції полімеру з ІД таким чином, щоб при її введенні в канал з основним полімером була забезпечена швидкість руху порції з урахуванням залежності $h = f(v)$. Поздовжній вміст порції повинен мати на початку та у кінці фази її формування ділянки з полімером, що засмоктується з каналу основного полімеру в циліндр переміщенням штока. Розміри цих ділянок розраховуються з урахуванням конструктивних параметрів циліндра інжектора при зміні швидкості порції полімеру з ІД на початку та у кінці фази її інжекції в канал головного екструдера та з урахуванням додаткового об'єму полімеру з основного каналу. Цей додатковий об'єм полімеру визначається заданою швидкістю переміщення штока та координатами розташування ІД у виробі.

Результати моделювання системи автоматизації з векторно-керованими асинхронними електроприводами пластикатора та інжектора зі стандартним налаштуванням координат [6, 7] представлені на рисунках 4-7.

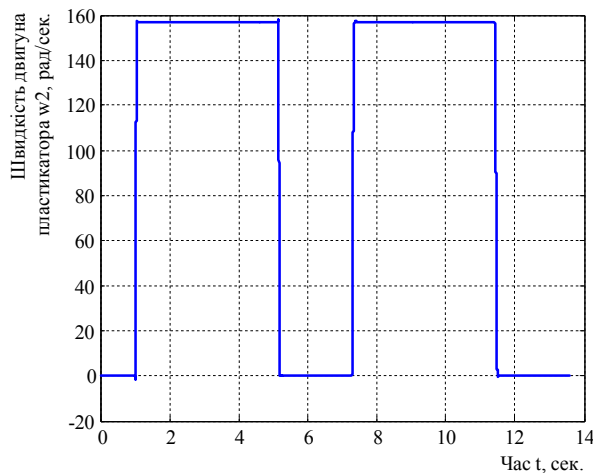


Рис. 4 – Швидкість двигуна пластикатора $w2$

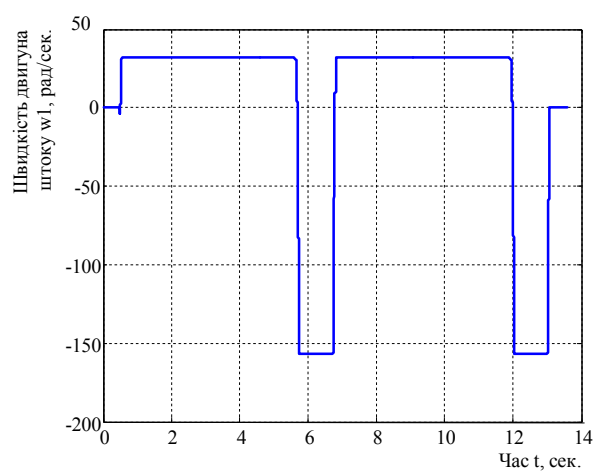


Рис. 5 – Швидкість двигуна штока $w1$

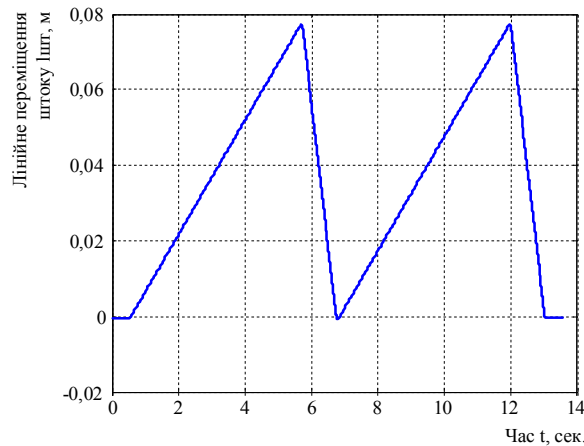


Рис. 6 – Лінійне переміщення штока Ішт

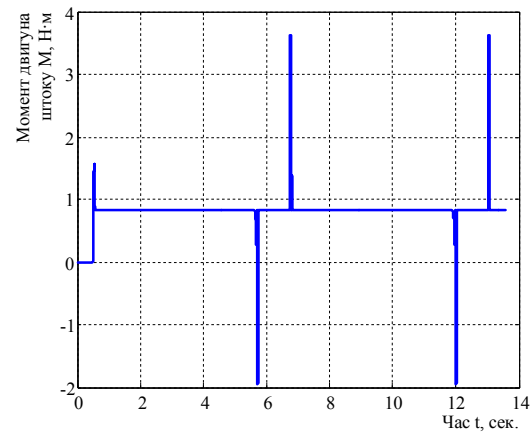


Рис. 7 – Момент двигуна штока

При реалізації електроприводами пластикатора та інжектора режимів їх руху відповідно до розробленого алгоритму роботи системи автоматизації погрішність відпрацювання переміщення датчиків на задану глибину залежить від точності визначення та формування об'єму порції полімеру з ІД.

Висновки

1. Обґрунтовано актуальність розробки пристрою для введення ІД в задані просторові координати полімеру каналу екструдера в процесі виготовлення виробів з ПКМ.
2. Обрано конструкцію модифікованого інжекційного пристрою.
3. За результатами експериментальних досліджень визначено швидкість інжекції для забезпечення необхідної глибини транспортування ІД та уточнено алгоритм узгодженої роботи векторно-керованих асинхронних електроприводів елементів пристрою системи автоматизації. Математичне моделювання системи підтвердило можливість її використання, що дозволить отримати вироби з ПКМ і контролювати їх напружено-деформований стан та інші параметри.

Список використаних джерел:

1. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г.А. Молодцов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2000. – 352 с.
2. Методи та пристрої для виготовлення виробів з інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів / В.І. Сівецький [та ін.] // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2016. – № 4. – С. 95-101.
3. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material / I. Ivitskiy [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, № 5 (85). – Pp. 4-9.
4. Wallace G.G. Conductive Electroactive Polymers: Intelligent Polymer Systems / G.G. Wallace, P.R. Teasdale, G.M. Spinks. – 3d ed. – Northwest : CRC Press, 2008. – 263 p.
5. Dynamics of Polymeric Liquids / R.B. Bird [et al.]. – New York : Wiley-Interscience, 1987. – 672 p.
6. Leonhard W. Control of Electrical Drives / W. Leonhard. – 2nd ed. – Berlin : Springer, 1996. – 420 p.
7. Schröder D. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / D. Schröder. – Berlin : Springer, 2015. – 1879 p.

References:

1. Molodtsov H.A. *Formostabilnye i intellektualnye konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov* [Form-stable and intelligent constructions of composite materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 352 p. (Rus.)
2. Sivetskiy V.I., Sokolskiy O.L., Ivitskiy I.I. *Metody ta prystroi dlia vyhotovlennia vyrobiv z intelektualnykh polimernykh kompozytsiinykh materialiv* [Methods and devices for inputting of smart polymer composite], *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Mekhaniko-tekhnologichni systemy ta*

- kompleksy – Bulletin of the NTU «Kharkiv polytechnic institute»: Mechanical-technological systems and complexes*, 2016, no. 4, pp. 95-101. (Ukr.)
3. Ivitskiy I., Sivetskiy V., Bazhenov V., Ivitska D. Modeling the electrostatic control over depth of the introduction of intelligent sensors into a polymer composite material. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 1, no. 5 (85), pp. 4-9. (Eng.)
 4. Wallace G.G. Teasdale P.R., Spinks G.M. *Conductive Electroactive Polymers: Intelligent Polymer Systems*, 3d ed. Northwest, CRC Press Publ., 2008, 263 p. (Eng.)
 5. Bird R.B., Curtiss C.F., Armstrong R.C., Hassager O. *Dynamics of Polymeric Liquids*, New York, Wiley-Interscience Publ., 1987. 672 p. (Eng.)
 6. Leonhard W. *Control of Electrical Drives*, 2nd edition. Berlin, Springer Publ., 1996. 420 p. (Eng.)
 7. Schröder D. *Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen*. Berlin, Springer Publ., 2015. 1879 p. (Germ.)

Рецензент: А.І. Жученко

д-р техн. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського

Стаття надійшла 29.04.2017