

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 681.2-5; 676.84.05

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).1.37-44](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).1.37-44)

Н. М. Кандяк, доц., канд. техн. наук, **А. Б. Коломієць**, доц., канд. техн. наук,
О. О. Котовський, асп.

Українська академія друкарства, м. Львів, Україна

e-mail: kandyak.nazar@gmail.com, kolanbor@gmail.com, os.kotovskiy@gmail.com

Засоби керування кроковим двигуном та вимірювання зусиль під час дослідження процесу згинання аркушевого матеріалу

Для дослідження явищ під час утворення об'ємної форми тари методом одночасного згинання клапанів розгортки з гофрованого картону створено стенд. Привод інструментам, що надається від крокового двигуна, може бути як рівномірним, так і за певними законами руху. Розглянуто електронні пристрої керування двигуном та вимірювальним модулем, а також спеціалізоване програмне забезпечення. Створено програму керування швидкістю вала двигуна під час робочого і зворотного ходу. **програмування, стенд, кроковий двигун, драйвер, керування, закон руху, вимірювання**

Постановка проблеми. Натепер гостро стоїть питання оперативного створення паковань і тари з можливістю швидкої доставки за місцем призначення. Крім того, висувається вимоги до матеріалу паковань і тари – їхня низька вартість та доступність в країні. Одним з матеріалів, що якнайкраще задовольняють цим вимогам є картон. Пакувальні матеріали на основі картону мають природній характер відтворення, наділені високими санітарно – гігієнічними властивостями та придатні для застосування сучасних технологій [1].

Для виготовлення транспортної тари застосовують багат шаровий матеріал – профільно-орієнтований (гофрований) картон. Наприклад, тришаровий гофрокартон складається з двох зовнішніх шарів плаского аркушевого картону та гофрованого шару між ними. Завдяки цьому він має високу міцність на стиск, стійкий до впливу ударних і вібраційних навантажень, вологи і жиру, може бути комбінованим з іншими матеріалами, його можна штабелювати [2].

Гофрокартон, що винайдений у XIX ст., широко застосовується у різних галузях, постійно виникають нові та вдосконалюються існуючі методи його використання. Одним з таких є процес утворення об'ємної форми або тари методом одночасного згинання клапанів розгортки з гофрованого картону. Для цього попередньо висічену розгортку з гофрованого картону встановлюють над «тунелем» з напрямними та інструментами, за допомогою пуансонів проштовхують у цей «тунель» [3]. В результаті згинання клапанів гофрованого картону утворюється пакування або тара зазвичай призматичної форми, готове до наповнення продукцією. Обладнання, що реалізує даний метод формування тари, має високий попит, воно високопродуктивне, має невеликі габарити і може бути встановлено як у приміщеннях, так і на складах.

Аналіз останніх досліджень. Явища у матеріалі і інструментах, що виникають під час одночасного згинання декількох площин (клапанів) такого складного матеріалу як гофрований картон, не були ґрунтовно досліджені до останнього часу. Конкурентна боротьба заважає фірмам-виробникам обладнання з Європи і США оприлюднювати

матеріали із визначення силових характеристик процесу утворення об'ємної форми (структури) картонних паковань і тари. Відповідно, це ускладнює раціональний вибір конструкційних елементів та двигуна пристрою приводу інструментів (пуансонів).

Відомі поодинокі дослідження у цій царині, в основному у навчальних і наукових закладах скандинавських країн. Проведення всебічних ґрунтовних досліджень процесу допоможе виявити особливості, межі застосування матеріалів, раціональні форми інструментів, геометричні та кінематичні параметри привода.

Тому програма досліджень процесу згинання складного аркушевого матеріалу передбачає виявлення впливу головних факторів на якість отриманого згину та силові процеси під час утворення об'ємної структури. А саме: швидкість переміщення та закон руху (ЗПР) рухомих інструментів; відстань між рухомими і нерухомими інструментами у напрямку руху та їхніми боковими площинками; форми крайок згаданих інструментів; вплив напрямку волокон або гофри матеріалу, її кута до напрямку руху.

Постановка завдання. Для всебічного дослідження процесу згинання аркушевого матеріалу необхідно вивчити залежність енергосилових параметрів процесу від характеристик руху інструментів, привод яких здійснює кроковий двигун через ряд передач. Одним з головних аспектів виконання цього завдання є програмування руху валу крокового двигуна під час робочого і зворотного руху пуансонів з можливістю швидкої зміни закону руху, надання різних співвідношень і законів руху робочому та зворотному руху пуансонів.

Виклад основного матеріалу. У [2] вказано, що при важливості використання систем керування технологічними операціями механічна складова обладнання відіграє ключову роль. Тому попередньо було запропоновано та виконані аналітичні дослідження пристрою на основі механічного приводу з комбінованим кулачково-важільним механізмом.

Для перевірки відповідності отриманих математичних моделей і доповнення їх параметрами, що уточнюють результати обчислень з врахуванням матеріалу розгортки та умов її згинання, створено та удосконалений дослідний стенд [4], який імітує рух інструментів (формувальної колодки, пуансонів) від суто механічної системи. Фактично було досліджено працездатність прототипу пристрою на основі сервоприводу з програмною функцією «електронний кулачок».

Вимірювальний комплекс створеного дослідного стенда складається з тензометричної скоби, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) та операційного підсилювача з програмованим коефіцієнтом підсилення (PGA — Programmable Gain Amplifier). Мікроконтролер зчитує та обробляє дані з АЦП, задає параметри роботи PGA із подальшою відправкою їх по цифровому інтерфейсу на зовнішній пристрій (персональний комп'ютер, планшет, смартфон, індикатор), де відображується процес роботи цифрового тензометричного датчика. Для відображення результатів в MS Excel створений макрос на мові VBA (Visual Basic for Applications) для кожної конкретної стадії дослідження згідно рекомендацій [5]. Попередньо створені програмні заготовки, які згодом редагувались для конкретного дослідження.

Загалом засоби керування двигуном привода та вимірювання зусиль об'єднані у окремий вузол, що складається з наступних елементів/модулів з врахуванням:

- драйверу крокового двигуна TB6560 (струм живлення 3А);
- мікроконтролеру Arduino Uno, що керує стендом;
- контролеру Arduino Nano з портом USB;
- аналого-цифровий перетворювач HX711;
- оптопара, через яку контролер задає початок роботи АЦП.

Тензометрична скоба перетворює величину деформації в електричний сигнал [6]. Обрано модель і характеристики тензометричної скоби (тензодатчика для ваг) YZC131 (рис. 1, а), призначену для вимірювання мас до 1кг. Технічні характеристики цього тензометричного датчика: імпеданс 1000 ± 50 Ом; рекомендована напруга 5-10 В; розміри 80 12,7 12,7 мм; матеріал – алюміній; комплексна похибка 0,2% FS.

Перед проведенням кожної серії досліджень проводились тарування тензометричної скоби. Дані тарування записувались у програму мікроконтролера. Тарування проводилось наступним чином: один кінець датчика фіксувався нерухомо, а на інший кінець прикладалась відома сила тяжіння шляхом навантажень тягарців, а результати вимірювань заносились у таблицю.

Згідно схеми на рис. 1, б тензометрична скоба 1 приєднана до відповідних контактів АЦП 2 типу НХ711. Дані з АЦП 2 передаються мікроконтролером 3 згідно із протоколом передачі даних I2C (Inter-Integrated Circuit). До мікроконтролера 3 підключені, відповідно, контакти живлення GND і 5V та сигнальні контакти DT та SCK. Останні приєднані до контактів D5 та D4 мікроконтролера 3.

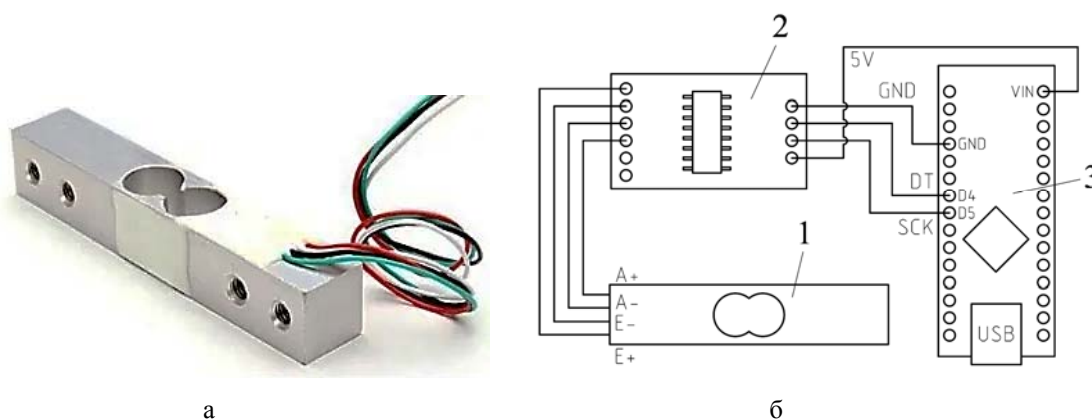


Рисунок 1 – Тензометричний датчик YZC131 (а) та вимірювальний модуль на основі АЦП НХ711 (б)
Джерело: [6]

На рис. 2 показано світліну створеного вузла, що містить модулі керування двигуном та зчитування даних з тензометричної скоби, встановлених на задній стінці дослідного стенду.

Для програмування плати Arduino застосовувалось середовище Arduino IDE, як це розглянуто у [7, 8]. Середовище програмування Arduino складається з панелі меню, панелі інструментів, редактора скетчу, консолі та вікна повідомлень. Для завантаження програм і зв'язку середовище програмування підключається до апаратної частини Arduino.

Програми для Arduino пишуться на мові C++, доповненій простими і зрозумілими функціями для управління введенням/виведенням на контактах [9, 10].

Алгоритм програми для керування кроковим двигуном привода дослідного стенда представлений на рис. 3.

На початку здійснюється звернення до кінцевого датчика, щоб перевірити початкове положення каретки з інструментами (крок 1). У випадку необхідності корекції початкового положення S_0 каретки включається двигун (крок 2). Двигун здійснює кроковий поворот валу (крок 3) до миті, доки не буде отримане підтвердження (крок 4) від кінцевого датчика про досягнення кареткою необхідного початкового положення S_0 . Далі програма контролює положення кнопки включення (крок 5). У випадку її активації відбувається зчитування положень ручки вибору

режимів руху (крок б) пульта керування стендом та табличних значень обраного ЗПР (рис. 4, б).

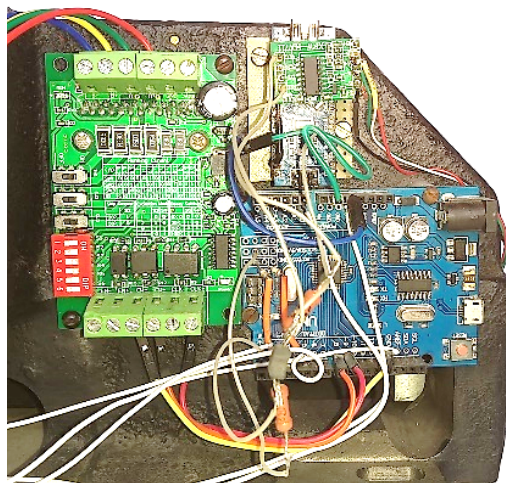


Рисунок 2 – Вузол з модулями керування двигуном та зчитування даних з тензOMETричної скоби, змонтований на дослідному стенді

Джерело: розроблено авторами

Двигун починає покроково відпрацьовувати три стадії прямого руху (крок 7) до миті, поки не буде виконано умову кроку 8 збігу поточного положення s_{np} каретки з пуансонами з крайнім положенням S_{max} їхнього переміщення у «тунель» між матрицями. Двигун зупиняється та починає відпрацьовувати кроки 9 і 10 трьох стадій руху у зворотному напрямку (реверсу), який здійснює покроково до досягнення умови кроку 10.

У кроці 11 здійснюється вимкнення двигуна від живлення для запобігання його перегріву. Привод переводиться у режим очікування і може бути активований повторним натиснення кнопки включення пульта керування стендом. Це дозволяє змінити умови руху каретки або повторити експеримент із попереднім набором параметрів.

Фрагменти програмного коду представлений далі на рис. 4. Програма керування кроковим двигуном дозволяє:

- запустити і вимкнути кроковий двигун;
- перевірити початкове положення S_0 каретки з інструментами;
- встановити каретку з інструментами у положення початку руху;
- зчитати дані для подальшого руху згідно обраного режиму ЗПР з блоку табличних значень (рис. 4, б), величини робочого і зворотного ходів каретки з інструментами;
- керувати стадіями розгону, стабільного руху і гальмування для прямого руху каретки з інструментами;
- керувати стадіями розгону, стабільного руху і гальмування для зворотного руху каретки з інструментами;
- перейти у режим очікування дій користувача.

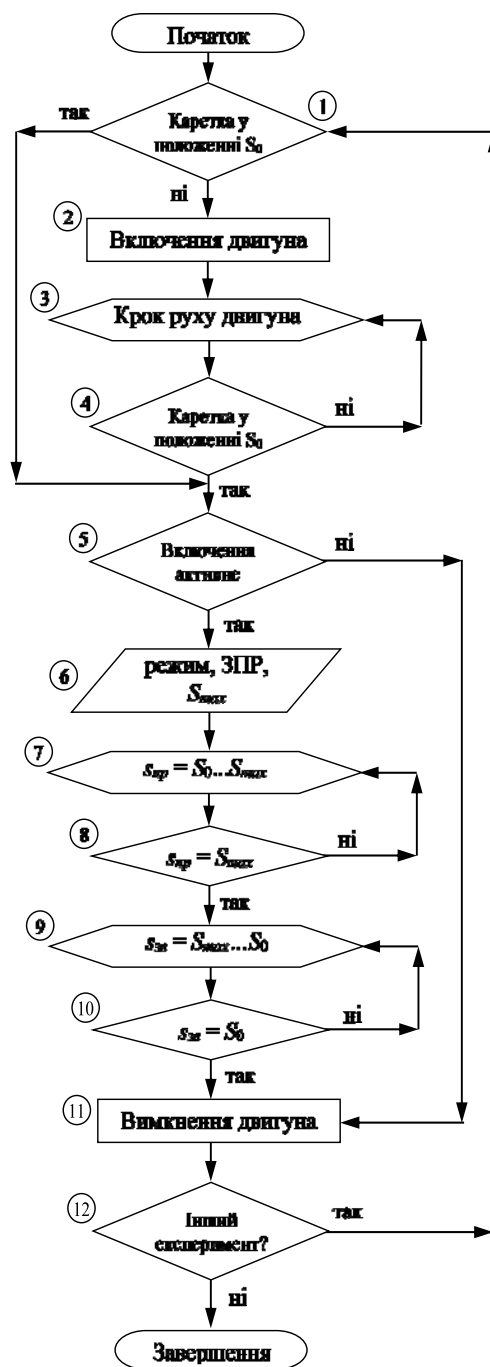


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритму роботи програми керування кроковим двигуном привода дослідного стенда

Джерело: розроблено авторами

Розроблені вузол керування кроковим двигуном і вимірювання силових параметрів та програма, дозволили виконати декілька серій розширених експериментів [4]. Досліджено як рівномірний рух інструментів (пуансонів), так і рух за законами синусоїда (С0), косинусоїда (К0) та Шуна. Максимальна швидкість переміщення каретки з інструментами програмно задавалась від 40 до 120 мм/с (з можливістю збільшення до 150 мм/с). Максимальний повний робочий хід пуансонів був від 10 до 30 мм із можливістю зміни початкового положення відносно площини заготовки. Отримані параметри дозволили визначити раціональні режими одночасного згинання

Список літератури

1. Шредер В.Л., Йованович К.С. Картон. Тара и упаковка. К. : ИАЦ «Упаковка», 1999. 192 с.
2. Регей І.І. Споживче картонне пакування. Матеріали, проектування, обладнання для виготовлення. Львів: УАД, 2011. 142 с.
3. Kolomiets A.B., Kotovskii O.O. Research of the cardboard tray and case volumetric forming process . *Theoretical foundations of modern science and practice*. Abstracts of XI International Scientific and Practical Conference. Melbourne, Australia. 2020. Pp.55-58. URL: <http://isg-konf.com> (дата звернення: 11.03.2023)
4. Kolomiets A.B., Kandiak N.M., Kotovskii O.O. Experimental stand for research of forming process of a printed carton packaging . *Поліграфічні, мультимедійні та веб-технології*: тези допов. IV Міжнародної науково-технічної конференції, 14-17 травня 2019р., м. Харків. Харків: «Друкарня Мадрид», 2019. Т1. С. 26-27.
5. Берндт Г., Каинка Б. Измерение, управление и регулирование с помощью макросов VBA в Word и Excel. К.: МК-Пресс; СПб: Корона-Век, 2008. 256 с.
6. Андреев А. Г., Львов Г. І., Щепкін О. В. Тензометрія: підручник. Харків : НТУ «ХПІ», 2017. 232 с.
7. Candelas, F. A., García, G. J., Puente, S., Pomares, J., Jara, C. A., Pérez, J., Mira, D., & Torres, F. (2015). Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29), 105-110.
8. Blum J. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry, John Wiley & Sons, 2, 512 (2019). doi: 1119405378, 9781119405375.
9. An Arduino Investigation of Simple Harmonic Motion – The Physics Teacher 52, 157 (2014); <https://doi.org/10.1119/1.4865518>.
10. Maik Schmidt. Arduino: A Quick-Start Guide. *Pragmatic Bookshelf*, 2, 324 (2015). doi: 168050522X, 9781680505221.

References

1. Shreder, V.L. & Yovanovych, K.S. (1999). *Karton. Tara y upakovka* [Cardboard. Container and packaging]. Kyiv : YATs «Upakovka» [in Ukrainian].
2. Rehei, I.I. (2011). *Spozhyvche kartonne pakovannia. Materialy, proektuvannia, obladnannia dlia vyhotovlennia* [Consumer cardboard packaging. Materials, design, manufacturing equipment]. Lviv: UAD [in Ukrainian].
3. Kolomiets, A.B. & Kotovskii, O.O. (2020). Research of the cardboard tray and case volumetric forming process. *Theoretical foundations of modern science and practice*: Abstracts of XI International Scientific and Practical Conference. Melbourne, Australia. (Pp.55-58). Retrieved from <http://isg-konf.com> [in English].
4. Kolomiets, A.B., Kandiak, N.M. & Kotovskii, O.O. (2019). Experimental stand for research of forming process of a printed carton packaging. *Printing, multimedia and web technologies*: IV Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsia (14-17 travnia 2019r., m. Kharkiv) – IV International Scientific and Technical Conference (Pp. 26-27). *Vol.1*. Kharkiv: «Drukarnia Madryd» [in English].
5. Berndt, H. & Kaynka, B. (2008). *Izmerenye, upravlenie y rehulyrovanie s pomoshchiiu makrosov VBA v Word i Excel* [Measure, control and regulate with VBA macros in Word and Excel.]. Kiev: MK-Press; SPb: Korona-Vek [in Russian].
6. Andrieiev, A. H., Lvov, H. I. & Shchepkin, O. V. (2017). *Tenzometriia* [Tensometry]. Kharkiv : NTU «KhPI» [in Ukrainian].
7. Candelas, F. A., García, G. J., Puente, S., Pomares, J., Jara, C. A., Pérez, J., Mira, D., & Torres, F. (2015). Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics. *IFAC-PapersOnLine*, 48(29), 105-110 [in English].
8. Blum J. Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry, John Wiley & Sons, 2, 512 (2019). doi: 1119405378, 9781119405375 [in English].
9. Calin Galeriu, Scott Edwards & Geoffrey Esper (2014). An Arduino Investigation of Simple Harmonic Motion . *The Physics Teacher*, 52, 157. <https://doi.org/10.1119/1.4865518> [in English].
10. Maik Schmidt. (2015). Arduino: A Quick-Start Guide. *Pragmatic Bookshelf*, 2, 324. doi: 168050522X, 9781680505221 [in English].

Nazar Kandiak, Assoc. Prof., PhD, Andrii Kolomiets, Assoc. Prof., PhD, Ostap Kotovskii, post-graduate
Ukrainian Academy of Printing, L'viv, Ukraine

Means of Controlling a Stepper Motor and Measuring Forces During the Study of the Folding Process of Sheet Material

The improvement of the equipment for the forming of the volumetric shape of packages and containers requires a detailed study of the phenomena in the folding process of sheet material with a complex structure (corrugated cardboard). A stand has been created to study process parameters, successful research on which should be provided by programmed control of tool movement and synchronous transfer of measured data to a computer for further processing.

Moving tools (punches) are driven by a stepper motor. The movement of the stepper motor shaft is programmed to obtain both a uniform movement and movement according to a certain law, which can be different for the working and reverse moves. Forces are measured by a strain gauge clamp, the signal from which is also transmitted to external devices for visualization and processing. The basis of the motor control and measurement unit is the Arduino Uno microcontroller, which, together with the Arduino Nano controller and the analog-to-digital converter, significantly expands the functionality of the stand. The diagram and operation of the created control and measurement unit is described. A special program has been created to study the geometric, kinematic and power parameters of the process, the possibility of quickly changing the law of motion, providing various ratios and laws of motion to the working and reverse motion of punches. The laws of motion for the motor shaft are presented in it in the form of matrices of values, which are accessed before starting the measurement from the stand control panel. The parameters of the process of simultaneous folding of corrugated cardboard, which were investigated using a stand, are described.

The developed measurement technique and means of controlling the movement of the stepper motor of the tool drive allowed to estimate the maximum effort, the nature of the change during the work cycle, to compare different types of material and folding modes. The result of determining the optimal parameters of the process of operational packaging & container formation is the creation of recommendations necessary for the design of modern energy-saving equipment.

programming, stand, stepper motor, driver, control, law of motion, measurement

Одержано (Received) 23.03.2023

Прорецензовано (Reviewed) 29.03.2023

Прийнято до друку (Approved) 03.04.2023