

П. Д. АНДРІЄНКО, В. В. ВАСИЛЕВСЬКИЙ, І. Ю. ВІТЦІВСЬКИЙ

ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ В УЧБОВИЙ ПРОЦЕС СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ FDM 3D ДРУКУ

Однією з найбільш поширених технологій адитивного виробництва є моделювання методом пошарового наплавлення Fused Deposition Modeling. В якості матеріалів для друку використовуються як стандартні матеріали, так і матеріали з покращеними характеристиками та композитні матеріали. Серед сфер застосування FDM друку основними є швидке прототипування а також дрібносерійне та серійне виробництво. Робота присвячена впровадженню технології FDM 3D друку в учбовий процес підготовки здобувачів освіти за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка". Здійснено дослідження особливостей технології адитивного виробництва деталей електротехнічних пристроїв методом FDM друку. Виконаний друк деталей чотирьох типорозмірів із використанням пластиків акрилонітріл-бутадієн-стирол ABS+ та полілактид PLA, а саме каркасів трансформаторів струму у кількості 110 штук та корпусів датчиків у кількості 100 штук. Для друку використовувався FDM 3D принтер з кінематичною схемою XZ Head Y Bed з відкритою робочою камерою. Наведений аналіз дефектів готових виробів, основними дефектами є відхилення реальних розмірів та геометричної форми готових виробів. Розглянуті шляхи запобігання виникненню цих дефектів, а саме корекція розмірів моделі на етапі підготовки моделі до друку, мінімізація щільності заповнення моделі, використання країв в моделях, встановлення оптимальної температури робочої платформи та одночасний друк декількох виробів. Результати дослідження особливостей технології виробництва деталей електротехнічних пристроїв шляхом FDM друку дозволили розробити комплекс лабораторних робіт, присвячених вивченню основ сучасних технологій адитивного виробництва для здобувачів освіти спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D друк, термопластик, деталь, точність, моделювання.

П. Д. АНДРИЕНКО, В. В. ВАСИЛЕВСКИЙ, И. Ю. ВИТЦИВСКИЙ

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ FDM 3D ПЕЧАТИ

Одной из наиболее распространенных технологий аддитивного производства является моделирование методом послойного наплавления Fused Deposition Modeling. В качестве материалов для печати используются стандартные материалы, материалы с улучшенными характеристиками и композитные материалы. Среди сфер применения FDM печати основными являются быстрое прототипирование а также мелкосерийное и серийное производство. Работа посвящена внедрению технологии FDM 3D печати в учебный процесс подготовки студентов специальности 141 "Электроэнергетика, электротехника и электромеханика". Проведено исследование особенностей технологии аддитивного производства деталей электротехнических устройств методом FDM печати. Выполнена печать деталей четырех типоразмеров с использованием пластика ABS + и PLA, а именно каркасов трансформаторов тока в количестве 110 штук и корпусов датчиков в количестве 100 штук. Для печати использовался FDM 3D принтер построенный на кинематической схеме XZ Head Y Bed с открытой рабочей камерой. Проведен анализ дефектов готовых изделий, который показал, что основными дефектами являются отклонения реальных размеров и геометрической формы готовых изделий. Рассмотрены пути предотвращения возникновения этих дефектов, а именно коррекция размеров модели на этапе подготовки модели к печати, минимизация плотности заполнения модели, использование краев в моделях, установление оптимальной температуры рабочей платформы и одновременная печать нескольких изделий. Результаты исследования особенностей технологии производства деталей электротехнических устройств путем FDM печати позволили разработать комплекс лабораторных работ, посвященных изучению основ современных технологий аддитивного производства для студентов специальности 141 "Электроэнергетика, электротехника и электромеханика".

Ключевые слова: адитивное производство, 3D печать, термопластик, деталь, точность, моделирование.

P. D. ANDRIENKO, V. V. VASILEVSKIJ, I. Y. VITTSIVSKY

EXPERIENCE OF IMPLEMENTATION IN EDUCATIONAL PROCESS MODERN TECHNOLOGIES OF FDM 3D PRINTING

Fused Deposition Modeling is an additive manufacturing technology where a temperature-controlled head extrudes a thermoplastic material onto a build platform in a predetermined path. Standard, advanced thermoplastics and composites are used for printing. Among the areas of application for FDM printing, the main ones are rapid prototyping, as well as small-scale and batch production. The purpose of the work is the implementation of FDM 3D printing technology in the educational process of students in specialty 141 "Electroenergy, electrotechnics and electromechanics". The features of the technology of additive manufacturing of electrical apparatuses parts by the method of FDM printing have been investigated. Parts of four standard sizes were printed using ABS + and PLA plastics, namely, current transformer carcasses in the amount of 110 pieces and sensor bodies in the amount of 100 pieces. For printing, an FDM 3D printer was used built on the XZ Head Y Bed kinematic scheme with an open working chamber. The analysis of defects in finished products was carried out, which showed that the main defects are deviations of the actual dimensions and geometric shape of the finished products. Ways to prevent the occurrence of these defects are considered, namely, correcting the size of the model at the stage of preparing the model for printing, minimizing the filling density of the model, using brims in models, setting the optimal temperature of the working platform and simultaneously printing several products. The results of the study of features of the technology of additive manufacturing of electrical apparatuses parts by the method of FDM printing made it possible to develop a set of laboratory works for students of the specialty 141 "Electroenergy, electrotechnics and electromechanics".

Key words: additive manufacturing, 3D printing, thermoplastic, detail, precision, modeling.

Вступ. Адитивне виробництво (Additive Manufacturing) або 3D друк – це процес створення фізичного об'єкту на основі комп'ютерної моделі [1]. В залежності від технології для друку можуть використовуватись термопласти, фотополімерні матеріали, металеві сплави, папір і т. д [2].

Однією з найбільш поширених технологій адитивного виробництва є 3D друк методом пошарового наплавлення або Fused Deposition Modeling (FDM). Сутність методу полягає в пошаровому формуванні об'єкту шляхом екструзії розплавленого термопласту на робочий стіл 3D принтера [3].

© П.Д. Андрієнко, В.В. Василевський, І.Ю. Вітцівський, 2021

Широке розповсюдження FDM друку обумовлене відносною доступністю та різноманіттям термопластів і 3D принтерів (як побутових, так і промислових). До недоліків технології відноситься порівняно низька швидкість "виращування" виробів, а також обмеження, що накладаються властивостями пластиків. В той же час використання технології FDM друку дозволяє знизити вартість та трудомісткість при одиничному та дрібносерійному виробництві у порівнянні із традиційними методами отримання деталей з пластмас.

Серед сфер застосування FDM друку можна виділити швидке прототипування, дрібносерійне та серійне виробництво, в тому числі деталей електротехнічних пристроїв, які мають складну геометричну форму. Тому актуальною є задача впровадження технології FDM 3D друку в учбовий процес підготовки здобувачів освіти за спеціальністю 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Аналіз основних досягнень. Існує ряд робіт, в яких розглядаються особливості технології FDM друку з точки зору виробництва деталей та вузлів електротехнічних пристроїв. Так, мікроструктура та електричні властивості стандартних пластиків ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол) та PLA (полілактид) при FDM друці досліджено в роботі [4]. Автори дійшли висновку, що шорсткість поверхні та наявність внутрішніх порожнин в готовому виробі можуть призвести до виникнення часткових розрядів. Проте в цілому діелектричні властивості розглянутих пластиків є задовільними, тому вони можуть бути використані в конструкціях електричних та електронних апаратів низької напруги. Крім того, відмічено, що ABS пластик має вищу механічну міцність у порівнянні з PLA.

Дослідження механічної міцності найбільш розповсюджених пластиків для FDM друку наведені в ряді робіт [5, 6]. Результати проведених авторами досліджень підтверджують достатньо високий рівень механічних властивостей таких пластиків, як ABS та PLA.

Ряд виробників пропонує композитні матеріали для використання при FDM друці. В роботі [7] наведені результати FEM моделювання вентильного двигуна, статор та ротор якого виконані з матеріалу під назвою The Magnetic PLA. В роботі зазначено, що отримана конструкція має невисоку точність геометричних розмірів, потребує постобробки а під час експлуатації – додаткового охолодження.

Створення ємнісних та резистивних датчиків за допомогою FDM друку розглянуто в роботі [8]. Для досліджень використовувалось два типи матеріалів: термопластичний поліуретан TPU та PLAcb, наведені результати виробництва резистивного датчика температури та ємнісного датчика сили.

Приклад сумісного застосування технологій FDM та Paste Extrusion System для виробництва суперконденсатору (іоністора) наведений в [9]. Корпус пристрою виконаний за допомогою FDM друку із використанням термопласту PLA.

Мета роботи полягає в розробці комплексу лабораторних робіт, присвячених вивченню основ сучасних технологій адитивного виробництва деталей та

вузлів електротехнічних пристроїв для здобувачів освіти спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати дослідження особливостей технологічного процесу FDM 3D друку із застосуванням стандартних матеріалів.

3D принтер та матеріали. При виконанні роботи використовувався FDM 3D принтер, кінематична схема якого заснована на декартовій системі координат *XZ Head Y Bed*. Така схема передбачає рух стола принтера за віссю *Y*, а екструдера (механізму, який здійснює подачу та плавлення матеріалу) за осями *X* та *Z*. Особливістю конструкції принтерів з кінематичною схемою *XZ Head Y Bed* є застосування відкритої робочої камери. Це в свою чергу ускладнює використання термопластів, яким властива усадка в процесі друку, тому необхідним є забезпечення якісної адгезії між деталлю та робочою поверхнею.

Типовий процес адитивного виробництва включає в себе наступні основні етапи:

- 1) Підготовка комп'ютерної CAD моделі фізичного об'єкту.
- 2) Генерація STL (STereoLithography) файлу та завантаження готового STL файлу до програмного забезпечення 3D принтера.
- 3) Коригування масштабу моделі, її позиціонування та орієнтація для подальшої побудови.
- 4) Налаштування параметрів друку та генерація g-коду.
- 5) Друк об'єкту.
- 6) Видалення готового об'єкту з робочої платформи.
- 7) Фінішна обробка та експлуатація готового об'єкту.

Виконання розглянутого процесу необхідно здійснювати із урахуванням властивостей термопласту, який використовується для друку. При виробництві електротехнічних пристроїв вимоги, що пред'являються до термопластів аналогічні вимогам до електротехнічних пластмас, а саме: забезпечення електроізоляційних та механічних властивостей готового виробу; висока стійкість до корозії; висока хімічна стійкість та низька гігроскопічність.

Широко використовуються для FDM друку ABS пластики та композиційні полімерні матеріали на їх основі (ABS+, ABS Flex, ABS PRO та інш.). Електрична міцність ABS пластику складає 12–15 МВ/м, діелектрична проникність ϵ' при 106 Гц дорівнює 2,4–2,5 Ф/м, значення $\tan\delta = 0,008–0,02$ (в порівнянні, електрична міцність полістиролу ПС 20–23 МВ/м, $\epsilon' = 2,4–2,8$ Ф/м, $\tan\delta = 0,0002–0,0009$), температура розм'якшення 90–105 °С.

Водопоглинення становить 1% за 24 години при температурі 23°C. До переваг ABS відноситься висока механічна міцність та легкість обробки надрукованих деталей, вологостійкість та інш. Одним з основних недоліків ABS є наявність термічної усадки в процесі друку, що впливає на точність геометричної форми та розмірів отриманих деталей.

Інший популярний матеріал для друку – термопласт PLA має низьку температуру розм'якшення 50 °С, водопоглинання становить 0,7 % за 24 години при 23 °С. Це в купі з низькою механічною міцністю обмежує можливість застосування PLA для друку деталей електротехнічних пристроїв, проте є можливим його застосування для вирішення задач швидкого прототипування окремих деталей та вузлів.

Крім термопластів, розглянутих вище, вітчизняні та зарубіжні виробники пропонують пластики, які відрізняються покращеними властивостями. Так ПЕТ (поліетилентерефталат) пластик має електричну міцність 140–180 МВ/м, температуру розм'якшення 245–248 °С та водопоглинання 0,3 %. Високі механічні властивості досягаються шляхом кристалізації виробів з ПЕТ після друку. Крім того, друк із застосуванням ПЕТ передбачає достатньо високу температуру екструдера 3D принтера в діапазоні 260–270 °С.

В роботі використовувались пластики ABS+ та PLA. Марка термопласту ABS+ являється модифікацією ABS з покращеною адгезією та зменшеною термічною усадкою, завдяки чому пластик може використовуватись для друку виробів відносно великих розмірів та для використання з принтерами, які мають відкриту робочу камеру.

Результати дослідження. В якості об'єкту дослідження обраний процес друку наступних деталей:

Деталь 1 – каркас повітряного трансформатора (перший типорозмір) у кількості 85 шт.

Деталь 2 – каркас повітряного трансформатора (другий типорозмір) у кількості 25 шт.

Деталь 3 – корпус датчика (перший типорозмір) у кількості 50 шт.

Деталь 4 – корпус датчика (другий типорозмір) у кількості 50 шт.

Параметри, що використовувались для друку наведені в табл. 1.

На рис. 1 наведені комп'ютерні CAD моделі деталей 1–4, на рис. 2 – зразки деталей, отриманих в результаті друку пластиком ABS+. Деталі 1–4 мають відхилення лінійних розмірів та діаметрів отворів, значення яких наведені в табл. 2.

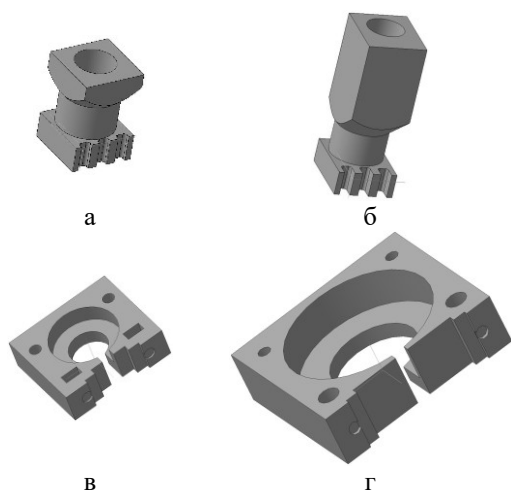


Рис. 1. CAD моделі деталей для друку

Серед основних причин виникнення відхилень реальних розмірів від їх номінальних значень при FDM друці можна виділити термічну усадку матеріалу в результаті нерівномірного охолодження (стосується ABS пластику) та відхилення реальних розмірів на величину, що дорівнює діаметру сопла екструдера 3D принтера (в даному випадку використовувалось сопло діаметром 0,4 мм).

Для підвищення точності реальних розмірів готових виробів здійснюється коригування розмірів на етапі підготовки комп'ютерної CAD моделі фізичного об'єкту. Значення скоригованих розмірів отримується з наступних виразів:

$$\begin{aligned} a_{nk} &= a_n + d_{ex} + k_a, \\ b_{nk} &= b_n + d_{ex} + k_b. \end{aligned} \quad (1)$$

де a_n, b_n – значення лінійних та діаметральних розмірів моделі до корекції, мм;

a_{nk}, b_{nk} – значення лінійних та діаметральних розмірів моделі після корекції, мм;

d_{ex} – діаметр сопла екструдера, мм;

k_a, k_b – складові, що враховують усадку матеріалу для лінійних та діаметральних розмірів, мм. Виходячи з практичного досвіду, значення k_a, k_b повинно лежати в діапазоні 0,1...0,2 мм.

Таблиця 1 – Параметри, що використовувались для друку

| Параметр | Значення параметру | |
|---|--------------------|--------------------|
| | ABS + | PLA |
| Діаметр філаменту, мм | 1,75 | 1,75 |
| Температура робочої поверхні, °С | 90 | 70 |
| Температура екструдера, °С | 225 | 210 |
| Швидкість друку периметрів моделі, мм/с | 45 | 45 |
| Швидкість друку заповнення, мм/с | 50 | 50 |
| Щільність заповнення, % | 20 | 20 |
| Висота шарів, крім першого, мм | 0,1 | 0,1 |
| Висота першого шару, мм | 0,2 | 0,2 |
| Режим охолодження | Природне | Автоматичний режим |

Коригування CAD моделей дозволяє отримати розміри, значення яких лежать в межах необхідних допусків, визначених конструкторською документацією.

В результаті нерівномірного охолодження моделі в процесі друку ABS+ пластиком відбувається викривлення нижніх шарів деталей 3 та 4 (загинання країв). Усунення даного дефекту можливе на етапі налаштування параметрів друку наступними способами:

1) Зменшення щільності заповнення деталі. Високе значення щільності заповнення збільшує викривлення геометричної форми деталі внаслідок термічної усадки. Як показав досвід, значення параметру *fill density*, що лежить в діапазоні 10–25 % дозволяє отримувати задовільні за механічною міцністю деталі та підвищує точність їх геометричної форми.

2) Застосування країв (*brim*), що дає можливість покращити адгезію та зменшити ймовірність деформації нижніх шарів друкованої деталі. Край – плоска область навколо основи моделі, висота якої дорівнює висоті одного шару. Значення параметру *ширина краю (brim width)* обирається виходячи з геометрії моделі. Так, для деталей 1 та 2 значення цього параметру обрано рівним 3 мм, тоді як для деталей 3 та 4 значення *brim width* дорівнює 8 мм.

Таблиця 2 – Отримані відхилення розмірів

| Деталь | Відхилення лінійних розмірів, мм | Відхилення діаметрів отворів, мм |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|
| Деталь 1 | 0 | -0,5 ... -0,6 |
| Деталь 2 | 0 | -0,5 ... -0,6 |
| Деталь 3 | -0,2 | -0,5 ... -0,6 |
| Деталь 4 | -0,6 | -0,5 ... -0,6 |

3) Встановлення оптимальної температури робочої платформи принтера, завдяки чому підвищується адгезія перших шарів друкованої деталі. Зазвичай, діапазон температур робочої платформи вказується виробником конкретного матеріалу. Так, для термопласту ABS виробництва Monofilament рекомендовано встановлювати значення температури підігріву робочої платформи у межах 105–120 °С. Для пластику ABS+, який характеризується порівняно низькою усадкою, рекомендовані температури робочої поверхні лежать в діапазоні 80–90 °С.

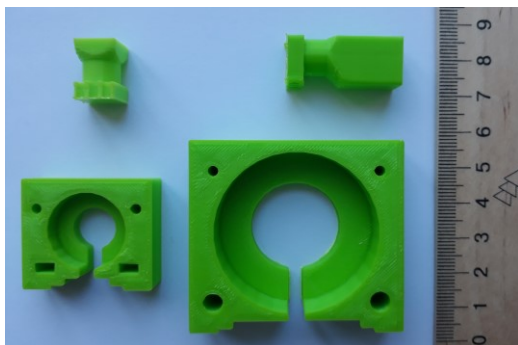


Рис. 2. Зразки деталей 1-4, виконані з ABS+

При виробництві об'єктів невеликих розмірів, таких як каркаси трансформатора 1 та 2, доцільним є одночасний друк декількох деталей. Завдяки цьому під час друку досягається більш рівномірне та якісне охолодження вже готових шарів моделі, що в свою чергу дає можливість зменшити величину деформацій геометричної форми готових виробів.

Приклад розташування деталі 1 на друкованій платі наведений на рис. 3.

Базуючись на отриманому досвіді розроблений комплекс лабораторних робіт, які включають в себе створення комп'ютерних CAD моделей розглянутих деталей, підготовку моделей до друку та вибір оптимальних параметрів друку з точки зору відповідності характеристик отриманих виробів поставленому завданню.

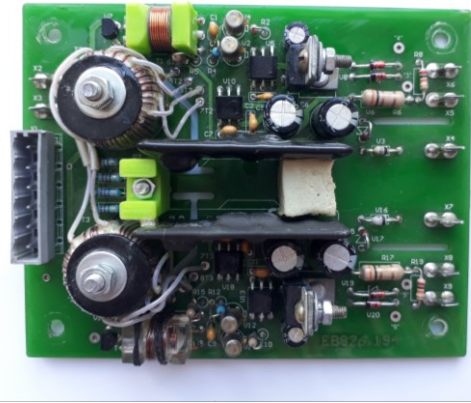


Рис. 3. Приклад розташування виготовлених деталей на друкованій платі

Результатом виконання лабораторних робіт здобувачами освіти є вивчення основ сучасних технологій адитивного виробництва, специфіки одиничного та дрібносерійного виробництва деталей за допомогою FDM 3D друку, дослідження оптимальних технологічних режимів FDM 3D друку та впливу властивостей термопластів на характеристики готових виробів.

Висновки.

1. Наведений досвід дрібносерійного FDM друку деталей електротехнічних пристроїв, а саме двох типорозмірів каркасів повітряних трансформаторів та двох типорозмірів корпусів датчиків. Для друку використовувались пластики ABS+ та PLA.

2. Виконаний аналіз дефектів, отриманих в результаті друку, таких як відхилення розмірів та геометричних форм готових виробів. Зазначених дефектів можна повністю або частково запобігти при підготовці CAD моделі об'єкту до друку та налаштуванням відповідних параметрів друку.

3. Результати дослідження особливостей технології виробництва деталей електротехнічних пристроїв шляхом FDM друку дозволили розробити комплекс лабораторних робіт, присвячених вивченню основ сучасних технологій адитивного виробництва для здобувачів освіти спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Список літератури

- Gibson, Ian & Rosen, David & Stucker, Brent Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. Springer New York, 2015. – 498 p. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3
- Андрощук Г.О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (II частина) / Г.О. Андрощук // Наука, технології, інновації. — 2017. — № 2 (2). — С. 29-36.
- М. М. Hoque, М. М. Н. Jony, М. М. Hasan and М. Н. Kabir, "Design and Implementation of an FDM Based 3D Printer," 2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Materials and Electronic Engineering (IC4ME2), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/IC4ME247184.2019.9036538
- X. Li et al., "Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642096
- J. Yang, Z. Zhao and S. Park, "Evaluation of directional mechanical properties of 3D printed polymer parts," 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2015, pp. 1952-1954, doi: 10.1109/ICCAS.2015.7364685

6. F. Decuir, K. Phelan and B. C. Hollins, "Mechanical Strength of 3-D Printed Filaments," 2016 32nd Southern Biomedical Engineering Conference (SBEC), 2016, pp. 47-48, doi: 10.1109/SBEC.2016.101.
7. H. Stakhiv, O. Solomchak, P. Lasek and M. Stepien, "FEM Simulation and Analysis of a Concept 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2021, pp. 656-660, doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432529
8. X. Aeby, R. v. Dommelen and D. Briand, "Fully FDM 3D Printed Flexible Capacitive and Resistive Transducers," 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), 2019, pp. 2440-2443, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808268
9. A. Tanwilaisiri, R. Zhang, Y. Xu, D. Harrison and J. Fyson, "A manufacturing process for an energy storage device using 3D printing," 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2016, pp. 888-891, doi: 10.1109/ICIT.2016.7474869
4. X. Li et al., "Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642096
5. J. Yang, Z. Zhao and S. Park, "Evaluation of directional mechanical properties of 3D printed polymer parts," 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2015, pp. 1952-1954, doi: 10.1109/ICCAS.2015.7364685.
6. F. Decuir, K. Phelan and B. C. Hollins, "Mechanical Strength of 3-D Printed Filaments," 2016 32nd Southern Biomedical Engineering Conference (SBEC), 2016, pp. 47-48, doi: 10.1109/SBEC.2016.101
7. H. Stakhiv, O. Solomchak, P. Lasek and M. Stepien, "FEM Simulation and Analysis of a Concept 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2021, pp. 656-660, doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432529
8. X. Aeby, R. v. Dommelen and D. Briand, "Fully FDM 3D Printed Flexible Capacitive and Resistive Transducers," 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), 2019, pp. 2440-2443, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808268
9. A. Tanwilaisiri, R. Zhang, Y. Xu, D. Harrison and J. Fyson, "A manufacturing process for an energy storage device using 3D printing," 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2016, pp. 888-891, doi: 10.1109/ICIT.2016.7474869

References (transliterated)

1. Gibson, Ian & Rosen, David & Stucker, Brent Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. Springer New York, 2015. – 498 p. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3
2. Androshchuk H.O. Adytyvni tekhnolohii: perspektyvy i problemy 3D-druku (II chastyna) [Additive technology: prospects and challenges of 3D-print (Second part)] *Nauka, tekhnolohii, innovatsii* – Science, technology, innovation, 2017, No. 2 (2), pp. 29-36.
3. M. M. Hoque, M. M. H. Jony, M. M. Hasan and M. H. Kabir, "Design and Implementation of an FDM Based 3D Printer," 2019 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Ma-

- terials and Electronic Engineering (IC4ME2), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/IC4ME247184.2019.9036538
4. X. Li et al., "Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642096
5. J. Yang, Z. Zhao and S. Park, "Evaluation of directional mechanical properties of 3D printed polymer parts," 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2015, pp. 1952-1954, doi: 10.1109/ICCAS.2015.7364685.
6. F. Decuir, K. Phelan and B. C. Hollins, "Mechanical Strength of 3-D Printed Filaments," 2016 32nd Southern Biomedical Engineering Conference (SBEC), 2016, pp. 47-48, doi: 10.1109/SBEC.2016.101
7. H. Stakhiv, O. Solomchak, P. Lasek and M. Stepien, "FEM Simulation and Analysis of a Concept 3D Printed Electric Motor with Permanent Magnets," 2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2021, pp. 656-660, doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432529
8. X. Aeby, R. v. Dommelen and D. Briand, "Fully FDM 3D Printed Flexible Capacitive and Resistive Transducers," 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), 2019, pp. 2440-2443, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808268
9. A. Tanwilaisiri, R. Zhang, Y. Xu, D. Harrison and J. Fyson, "A manufacturing process for an energy storage device using 3D printing," 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2016, pp. 888-891, doi: 10.1109/ICIT.2016.7474869

Поступила (received) 11.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Андрієнко Петро Дмитрович (Андрюенко Петр Дмитриевич, Andrienko Petr Dmitrievich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет "Запорізька політехніка", тел. +38 (050) 484-16-71, e-mail: andrpd@ukr.net.

Василевський Володимир Валентинович (Василевский Владимир Валентинович, Vasilevskij Vladimir Valentinovich) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет "Запорізька політехніка", тел. +38 (050) 889-30-73, e-mail: lisses@ukr.net.

Вітцівський Іван Юрійович (Витцивский Иван Юрьевич, Vitsivskiy Ivan Yuriiovych) – студент кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет "Запорізька політехніка", тел. +38 (096) 005-18-47, e-mail: ivan.0960051847@gmail.com.