
**Секція 4.
ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА, ОБСЛУГОВУВАННЯ
ТА РЕМОНТУ ЕНЕРГОСИСТЕМ, ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
ТА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

УДК 681.6

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕБІЙНОЇ РОБОТИ FDM 3D ПРИНТЕРІВ
В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОГО ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО
ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ**

Воропай Олексій Валерійович, докт. техн. наук, зав. каф. ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: voropay.alexey@gmail.com, ORCID 0000-0003-3396-8803

Єгоров Павло Анатолійович, канд. техн. наук, доцент каф. ДМ та ТММ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: phd.egpavel@gmail.com, ORCID 0000-0001-6616-9966

Карпенко Володимир Олександрович, докт. техн. наук, професор каф. ДМ та
ТММ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: karpenko4dm@gmail.com, ORCID 0000-0001-7376-7585

Технології швидкого прототипування стали невід'ємною частиною сучасності. 3D друк використовується не тільки для отримання перших прототипів нових виробів, а й для дрібносерійного виготовлення затребуваних деталей. У складних умовах сучасності, коли серед іншого спостерігається нестабільне централізоване енергопостачання, особливо актуальною є проблема забезпечення безперебійної роботи 3D принтерів. Часті відключення енергопостачання призводять до неможливості друку габаритних прототипів: в одних 3D FDM принтерах при знеструмленні крокових двигунів відбувається самовільне опускання ще гарячого екструдера на прототип і спотворення його геометрії, в інших, хоч і можливе продовження друку після відновлення енергопостачання, все одно спостерігаються певні дефекти друку [1], які є неприпустимими для деяких прототипів, зокрема зубчастих коліс [2]. З іншого боку підвищення напруги в мережі може призвести до пошкодження електротехнічних складових принтера.

Існують стандартні технічні рішення у вигляді блоків безперебійного живлення та портативних акумуляторних електростанцій [3]. Однак, аналізуючи внутрішню конструкцію найбільш розповсюджених непромислових принтерів, знаходимо, що такі пристрої включають до свого складу блок живлення, що перетворює мережеву змінну напругу 230В (220В) в постійну напругу, в більшості випадків рівну 24В. Відповідно приводні двигуни, нагрівачі столу та екструдера, а також плати керування FDM 3D принтерів живляться від джерел з постійною напругою.

В поточному дослідженні оцінюється можливість використання альтернативних джерел живлення FDM 3D принтерів, зокрема з виключенням етапу отримання змінної напруги 230В, з метою забезпечення незалежності їх роботи від наявності та якості централізованого енергопостачання, а також ефективність деяких систем перетворення накопиченої енергії.

Таким чином в контексті поставленої проблеми розглядаються питання:

- оцінки енергоспоживання окремими виконавчими органами;
- вибору альтернативних джерел живлення;
- оцінки ефективності перетворення енергії.

Для досліджень обрано FDM 3D принтер Alfawise U20, в якому робочий стіл при друці рухається вздовж осі Y, а екструдер – вздовж осей X та Z. В принтері замінено комплектний екструдер (hotend) mk8 на екструдер TZ-E3 V2 з плоским керамічним нагрівальним елементом. Прошивка принтера Marlin 2.1.2.6. Виміри електричних величин здійснені ватметром з власним джерелом живлення (рис. 1). При вимірюваннях вихідна напруга комплекту блоку живлення відкоригована до значення 24В.

Оцінку потужності окремих виконавчих органів здійснено при установці ватметра між конкретним споживачем та джерелом живлення. Результати вимірів зведено до табл. 1.

Таблиця 1 – Результати виміру потужності

Виконавчий орган та умови	Потужність, Вт
Всі компоненти, керуюча програма не виконується	1,4
Нагрівач екструдера	32
Нагрівач робочого столу	223
Всі компоненти, окрім нагрівачів, при переміщенні екструдера вздовж осі X з подачею 50 мм/с	4,7
Всі компоненти, окрім нагрівачів, при переміщенні столу вздовж осі Y з подачею 50 мм/с	9,7
Всі компоненти, окрім нагрівачів, при переміщенні екструдера вздовж осі Z з подачею 10 мм/с	12,5
Всі компоненти, окрім нагрівачів, при одночасному переміщенні столу та екструдера з подачею 50 мм/с	9,7

В результаті вимірів потужності отримано, що найбільш потужним елементом є нагрівач робочого столу. Варто при цьому відзначити, що потужність нагрівачів екструдера та робочого столу не є постійними: на початку процесу нагріву спостерігається максимальна потужність, після досягнення заданої температури подальша підтримка температури здійснюється в режимі ШІМ.

Значення, наведені в табл. 1, є значеннями саме максимальної потужності. Відповідно оцінку енергоспоживання лише за величиною потужності проводити не коректно.

Оцінка енергоспоживання нагрівачем робочого столу здійснена в умовах друку тестового зразка в формі куба зі стороною 20 мм (рис. 2), модель якого можна завантажити за посиланням [4].

Матеріал – PETG,

діаметр отвору сопла – 0,4 мм.

Параметри друку:

товщина шару – 0,1 мм,

швидкість укладання нитки – 80 мм/с,

температура сопла – 240 °С,

товщина стінки – 1,6 мм (4 лінії),

товщина нижньої та верхньої оболонок – 0,8 мм (8 шарів),

заповнення з ліній зі щільністю – 30%.

Додаткове обдування моделі при друці вимкнене.

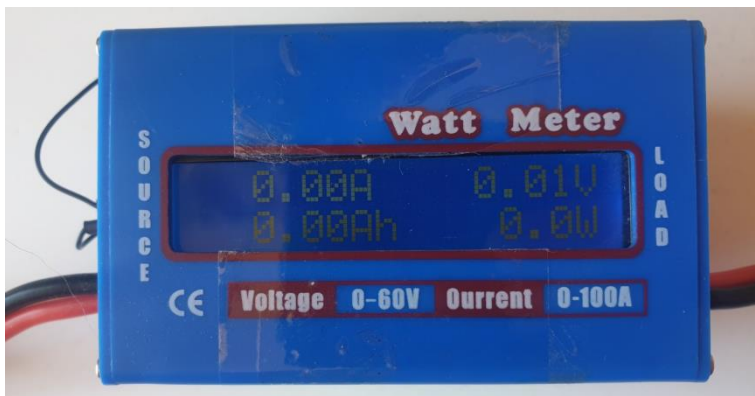


Рисунок 1 – Ватметр

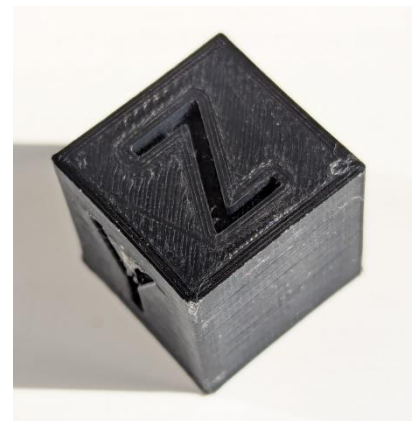


Рисунок 2 – Надрукований тестовий зразок

Розглянуто три випадки: друк з нагрівом робочого столу до 70°C і підтримка сталої температури увесь час друку; друк з нагрівом робочого столу до 70°C і вимкнення нагріву після друку першого шару; друк без нагріву. Для виміру витраченої енергії було використано ватметр (рис.1). При цьому схема живлення була наступною: акумулятор LiFePO₄ (12В за схемою 4S) → **ватметр** → інвертор 12В DC-230В AC (чиста синусоїда) → комплектний блок живлення принтера → електротехнічні системи принтера. Результати вимірів зведено до табл.2.

Таблиця 2 – Результати виміру енергоспоживання

№	Нагрів столу	Час друку, хв	Споживання за час друку, Вт·год	Максимальна потужність, Вт
1	70 °С, весь час друку	84	183,4	305,8
2	70 °С, при друці лише першого шару	84	98,6	298,1
3	Без нагріву	74	64,2	81,2

За результатами дослідження отримано, що нагрів робочого столу є найбільш енерговитратним. Крім того на нагрів робочого столу до 70°C додатково було витрачено 10 хв. Безпосередньо нагрів столу необхідний для кращої адгезії перших шарів майбутнього прототипу до робочого столу, однак з використанням спеціальних адгезивів та текстурованих поверхонь проблема поганої адгезії матеріалу в багатьох випадках може бути усунута. Таким чином на годину друку при описаних умовах без нагріву робочого столу витрачається 52 Вт·г. Така кількість енергії може бути забезпечена зокрема малопотужною сонячною електростанцією.

Типовими для малопотужних сонячних електростанцій є системи з акумуляторними батареями з номінальною напругою 12 та 24В. Обидва види систем можуть бути використані для живлення 3D принтерів з використанням DC-AC інверторних перетворювачів. Однак подвійне перетворення (DC-AC за допомогою інвертора та AC-DC за допомогою комплектного блоку живлення) може негативно відобразитись на загальному ККД. Авторами дослідження пропонується для живлення розповсюджених непромислових FDM 3D принтерів від акумуляторних батарей використовувати DC-DC перетворювачі. Для 12В систем і 24В принтерів це можуть бути підвищуючі перетворювачі. Для 24В систем, що у випадку з'єднання акумуляторних комірок LiFePO_4 за схемою 8S забезпечують напругу 22,4В-29,2В, і 24В принтерів необхідне використання спеціальних boost-buck перетворювачів.

Порівняння ефективності перетворення накопиченої в акумуляторі енергії з використанням різних схем живлення здійснено при друці тестового зразка (рис. 2) за описаних раніше умов. Вимір спожитої з акумуляторної батареї електроенергії здійснено ватметром (рис. 1). У всіх випадках вхідна напруга живлення принтера була скоригована до значення 24В. Результати вимірювань зведено до табл.3.

Розглянуто такі 12В та 24В схеми живлення:

Схема живлення 1: акумулятор LiFePO_4 (12В за схемою 4S) → інвертор 12В DC-230В AC (чиста синусоїда) → комплектний блок живлення → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 2: акумулятор LiFePO_4 (12В за схемою 4S) → блок безперебійного живлення APC BK500I (модифікована синусоїда) → комплектний блок живлення → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 3: акумулятор LiFePO_4 (12В за схемою 4S) → DC-DC підвищуючий перетворювач (ШИМ-контролер TL494с, транзистор NCE8580, діод STPS20S100CT) → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 4: акумулятор LiFePO_4 (12В за схемою 4S) → синхронний boost-buck DC-DC перетворювач (ШИМ-контролер LTC3780EG, транзистори AOD4184A, діоди ss54) → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 5: акумулятор LiFePO_4 (24В за схемою 8S) → синхронний boost-buck DC-DC перетворювач (ШИМ-контролер LTC3780EG, транзистори AOD4184A, діоди ss54) → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 6: акумулятор LiFePO₄ (24В за схемою 8S) → блок безперебійного живлення APC SUA750I (чиста синусоїда) → комплектний блок живлення → електротехнічні системи принтера.

Схема живлення 7: акумулятор LiFePO₄ (24В за схемою 8S) → інвертор 24В DC-230В AC (чиста синусоїда) → комплектний блок живлення → електротехнічні системи принтера.

Таблиця 3 – Спожита електроенергія при друці тестового зразка та потужність при використанні різних схем живлення

Схема живлення	Споживання за час друку, Вт·год	Максимальна потужність, Вт	Потужність в простій, Вт
1	64,2	81,2	20,7
2	66,8	119,1	23,8
3	38	44,8	2,1
4	36,6	46,7	2,1
5	35,1	43	1,3
6	89,9	245,2	44
7	66,6	70,2	20,6

Висновки

За результатами дослідження можна зробити висновок, що використання DC-DC перетворювачів при живленні принтерів від акумуляторних батарей (схеми живлення 3-5) є найефективнішим. Використання інверторних DC-AC перетворювачів та повторне перетворення енергії комплектним блоком живлення суттєво знижує ефективність використання накопиченої енергії.

Таким чином, для забезпечення безперебійної роботи FDM 3D принтерів в умовах нестабільного централізованого енергопостачання пропонується комплексне рішення, що полягає у зниженні енерговитрат шляхом вимкнення нагріву столу при друці та використанні автономних систем живлення на основі акумуляторів та DC-DC перетворювачів. Накопичення енергії в акумуляторі при цьому може бути забезпечене малопотужною системою на основі сонячних панелей.

Література

1. Voropay A. et al. Optimization of machine parts models for 3D printing. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 511–520. DOI: <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1187111>.
2. Voropay A. et al. Restoring the Functionality of Gears Using Rapid Prototyping. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. Vol. 1315. P. 173–183. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-85751-5_13.
3. Portable Power Stations : [Електронний ресурс]. URL: <https://eu.ecoflow.com/pages/portable-power-stations> (дата звернення: 04.03.2026).
4. Customizer Pin Tool : [Електронний ресурс]. URL: <https://www.thingiverse.com/thing:1278865> (дата звернення: 04.03.2026).