

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-28-34>

УДК 681.5:69.001.5

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛА ЕКСТРУДЕРА МОБІЛЬНОЇ РОБОТОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ 3D-ДРУКУ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ СТРУКТУР

Грицюк В.Ю., Невлюдов І.Ш., Цимбал О.М.

IMPROVING THE EXTRUDER UNIT DESIGN OF A MOBILE ROBOTIC PLATFORM FOR LARGE-SCALE STRUCTURES 3D PRINTING

Gritsyuk V. Yu., Nevliudov I. Sh., Tsymbal O. M.

Аддитивне виробництво має величезний потенціал у будівельній галузі, а також при виробництві та ремонті дорожніх покриттів. Робототехнічний 3D-друк великомасштабних структур дозволяє архітекторам і будівельникам значно розширити межі проектування конструкцій та підвищити ефективність їх будівництва. Мобільні платформи для 3D-друку дозволяють вирішити проблему обмеженого робочого простору. З метою підвищення ефективності та економічності мобільної робототехнічної платформи для технології 3D-друку великомасштабних структур пропонується вдосконалити конструкцію вузла екструдера. Це досягається шляхом об'єднання електродвигуна, шнекового екструдера та нагрівача в одному корпусі. Такий підхід дає економію маси та розмірів, а також суттєве підвищення коефіцієнту корисної дії та надійності системи за рахунок функціональної інтеграції та повного використання дисипативної складової енергії. Пропонований перетворювач для мобільної робототехнічної платформи використовує зовнішній ротор-шнєк, який одночасно виконує функції ротора асинхронного двигуна, нагрівального елемента, виконавчого механізму і захисного корпусу. Метою роботи є оцінка ефективності використання шнекового перетворювача у складі мобільної робототехнічної платформи для аддитивного виробництва. Для досягнення мети проведено кінцево-елементний розрахунок і аналіз просторового розподілу вихрових струмів на ділянці порожнистого феромагнітного ротора. За допомогою програмно-обчислювального комплексу Comsol Multiphysics отримано картини розподілу z-складової густини вихрових струмів, а також розподілу густини дисипованої потужності, що враховує всі види втрат в роторі. Характер розподілу густини дисипованої потужності в роторі істотно змінюється зі збільшенням частоти поля, що впливає на якість теплової дії на матеріал. Результати просторового розподілу вихрових струмів ротора дозволяють удосконалити конструкцію перетворювача, забезпечити задані значення температури та градієнта, які, своєю чергою, визначають механічні властивості матеріалу на виході пристрою.

Ключові слова: адитивне виробництво, мобільна робототехнічна платформа, чисельний розрахунок, будівництво, вузол екструдера, вихрові струми.

Вступ. Адитивне виробництво являє собою новий клас технологій, які забезпечують унікальні переваги при створенні конструкцій складної форми, що мають великий попит в багатьох сферах застосування [1-3]. Крім свободи дизайну, адитивне виробництво має величезний потенціал у будівельній галузі [4-6], а також при виробництві та ремонті дорожніх покриттів [7, 8]. Одна з проблем 3D-друку полягає в тому, що типові настільні принтери є стаціонарними та мають обмежений робочий простір. Мобільні робототехнічні платформи для 3D-друку все частіше впроваджуються в сфері архітектури та будівництва, дозволяючи вирішити цю проблему. Крім того, робототехнічний 3D-друк великомасштабних структур дозволяє архітекторам і будівельникам значно розширити межі проектування конструкцій та підвищити ефективність їх будівництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [4] співробітники Массачусетського технологічного інституту представили великомасштабну цифрову будівельну платформу (DCP) для зондування, аналізу та цифрового виробництва на місці. Цей дослідницький проект складається із системи з 5-осьовою гідравлічною мобільною стрілою Altес, прикріпленою до 6-осьової роботизованої руки KUKA. Подібно до біологічної моделі людського плеча і руки, ця система використовує велику стрілу для загального позиціонування і маленьку роботизовану руку для точного позиціонування та корекції коливань. Платформа базується на вантажному автомобілі, що має вантажопідйомність 1500 фунтів та ма-

ніпуляційну здатність 20 фунтів. Розробники повідомляють про потенційні переваги проекту, включаючи виготовлення нестандартних архітектурних форм, інтеграцію даних зондування на місці в режимі реального часу, підвищення ефективності будівництва, підвищену роздільну здатність, зниження кількості похибок та підвищення безпеки. Платформ DCP розроблена як платформа для проектування та будівництва, що дозволяє визначати, проектувати та створювати високоінтегровані архітектурні конструкції. Розширені можливості автоматизації синхронізованих виробничих послідовностей створюють можливість розробки переплетеного набору взаємозв'язків між структурними, архітектурними та екологічними системами, що, своєю чергою, забезпечує справжню інтеграцію споруди. Це досягається за рахунок універсальності DCP та здатності створювати петлі зворотного зв'язку між процесами зондування у реальному часі. В майбутньому платформа буде оснащена механічними і сенсорними системами. Друга версія DCP використовує як платформу гусеничний електромобіль і застосовується для екструзії піни при заливанні стін, що аналогічно методу блокового будівництва.

У дослідженні [5] автори розробили систему мобільного друку, що складається з двох роботизованих маніпуляторів на мобільній базі (рис. 1), яка друкує цементні об'єкти досить великого розміру. Як правило, будівельні матеріали, ширина яких більша, ніж відстань до опори системи будівельного 3D-друку, не можуть бути надруковані. Це пов'язано з тим, що розміри друківаної конструкції обмежені одним з трьох факторів: досяжністю маніпулятора робота, обмеженням об'ємом або каркасом, що дозволяє голівці рухатися вздовж певної осі. Але розробники дозволили системі рухатися у будь-якому напрямку, поки вона знаходиться на плоскій поверхні, встановивши промисловий робот-маніпулятор на колісну базу. Потім, за допомогою шлангу фланцеве сопло маніпулятора платформи з'єднується з насосом. Рухи робота-маніпулятора та мобільної платформи ретельно плануються для досягнення скоординованих зусиль. Він використовує управління рухом зі зворотним зв'язком і високоточну локалізацію робота, щоб перекопатися, що сопло укладає бетон у потрібному темпі та у потрібному місці. Розміщуючи камеру на задній частині мобільної бази, її «система локалізації» краще працює на більшій площі поверхні.

Дослідники стверджують, що їхня система друку під час руху може збільшити розмір конструкцій, які може виготовити один робот. Щоб довести це, вони використовували мобільну платформу для 3D-друку цільної бетонної конструкції розміром 210 см × 45 см × 10 см, що безумовно більше, ніж 87-сантиметрова досяжність робота-маніпулятора. Ця система може значно підвищити ефективність 3D-друку будівельних конструкцій. Але ця робота ще не завершена, оскільки система має деякі обмеження, особливо щодо нерівномірності робочих зон.



Рис. 1. Система мобільного друку з використанням роботизованих маніпуляторів на мобільній базі

Дослідники Інституту передової архітектури Каталонії представили ідею мобільного 3D-друку, де застосовуються три окремі системи для друку архітектурних конструкцій з використанням цементу [6]. Minibuilders – це, по суті, процес екструзії багаточастикового матеріалу (рис. 2). Ця технологія вже добре зарекомендувала себе як у 3D-друку загалом (відома як моделювання наплавлення або FDM), так і в її варіантах у масштабі конструкції. Minibuilders відрізняється від інших процесів дуже інноваційним і зовсім іншим підходом до фактичного друку конструкції. У той час, як в інших технологіях використовуються портали або роботи-маніпулятори, які переміщують сопло навколо друківаної поверхні, в Minibuilders використовується група невеликих роботів, які працюють разом і навіть піднімаються на поверхню конструкції під час її друку.



Рис. 2. Застосування окремих систем для 3D-друку конструкцій з використанням цементу

Технологія адитивного виробництва Pylos є процесом екструзії шаруватих матеріалів. Це процес моделювання методом наплавлення (FDM) у масштабі конструкції, досить відомий процес настільних принтерів, де матеріал у рідкій формі видавлюється через маленьке сопло у вигляді безперервного потоку чи нитки. Потім матеріал твердне на друківаній поверхні і стає готовий до друку наступного шару. У його настільному аналогу використовується розплавлений пластик, який плавиться при проходженні через гаряче сопло, а потім твердне при охолодженні після нанесення на поверхню.

Процес масштабування в будівництві абсолютно протилежний. Тут матеріал на основі цементу, зазвичай розчин або паста змішується безпосередньо перед подачею в машину. Ще рідкий матеріал видавлюється через просту насадку, яка лише допомагає формувати та спрямовувати матеріал. Коли матеріал досягає поверхні друку, він починає тверднути сам по собі в результаті реакції з повітрям, яка відома як затвердіння. Цей процес має значний рівень чутливості, тому що затвердіння не повинно бути повністю завершено до того, як буде надруковано наступний шар, щоб забезпечити хороше зчеплення між шарами, але воно також має бути достатнім, щоб витримати вагу наступного шару (або шарів). Цьому процесу притаманно те, що екструзійне сопло встановлене на декількох різних роботах, які менші за розміром і переміщуються навколо або поверх вже надрукованих частин конструкції. Інші типи будівельних 3D-принтерів намагаються збільшити свій розмір, щоб мати можливість друкувати конструкції в архітектурних масштабах. Цей підхід має велику перевагу, дозволяючи принтеру бути меншим, ніж об'єкт, який він друкує, уникаючи проблеми обмеження розміру. Процедура друку (рис. 3) починається з перетворення файлу конструкції 3D-моделі на шлях і параметри конкретного робота-принтера в процесі друку. Це робиться за допомогою спеціального програмного забезпечення, яке генерує серію кривих для кожного робота, якими він рухається при створенні різних частин об'єкта. Ці криві, що створюються одна над одною, є фактичними шарами об'єкту. Товщина цих шарів залежить від різних факторів, включаючи швидкість екструзії та тип використовуваного матеріалу, оскільки всі матеріали поведуться по-різному під вагою нанесених зверху шарів.

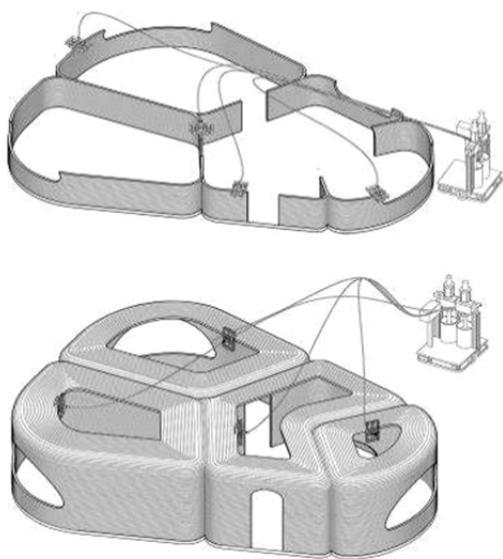


Рис. 3. Процедура друку з використанням роботів Minibuilders

Роботи Minibuilders створюють шари товщиною приблизно 6 мм, що можна регулювати за допомогою швидкості руху принтерів. Програмне забезпечення перетворює ці вигнуті шляхи в сигнали управління пристроєм, які передаються на зовнішній контролер (ПК або інший пристрій). Контролер управляє рухом і соплом для кожного робота і укладає шари відповідно до вигнутих траєкторій. Друк усієї конструкції розділений на три секції, в кожній з яких працює спеціальний робот. Всі три типи роботів підключені до більшого головного блоку, який керує ними та постачає матеріал. Як тільки останню частину або шар надруковано, процес завершується.

Відповідно до концепції «саморемontованих міст» [7, 8], парк автономних транспортних засобів і дронів скануватиме дороги у пошуках тріщин, і усуватиме їх до того, як з'являться вибоїни. Виявивши тріщину на дорозі, робот із 3D-принтером зможе помістити асфальт у тріщину, щоб її відремонтувати, і все це протягом хвилини. Такий підхід може застосовуватися вночі, щоб уникнути перекриття доріг, які можуть порушити рух транспорту. Апарат в цілому заснований на настільному RepRap-принтері Mendel 90, але оснащений спеціальним екструдером та соплом із високотемпературного фотополімеру. Друк виконується бітумною крихтою з частинками міліметрового розміру, що засипається у бункер, нагрівається і продавлюється через сопло за допомогою шнека. Вузол екструдера має внутрішню нагрівальну втулку. Гранули розм'якшуються, коли вони проходять через шнек, за рахунок підвищення температури через дію нагрівальних резисторів, що призводить до витікання рідкого бітуму із сопла, як показано на рис. 4, а. Крокові двигуни, температура, градієнт та швидкість обертання шнека контролюються простою електронікою, підключеною до ПК (рис. 4, б). Покращені механічні властивості є функцією температури, що, можливо, пов'язано з мікροструктурними змінами в асфальті. Це призводить до утворення волокон, які перекривають тріщини, що підвищує ударну в'язкість.

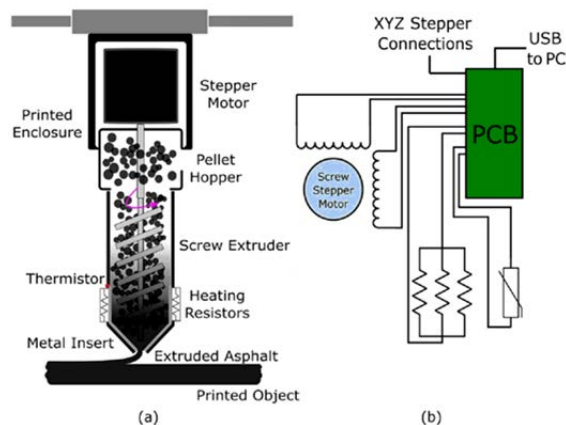


Рис. 4. Конструкція системи: а – конструкція екструдера; б – управляюча електроніка

У ході експериментів автори [7] встановили, що температура від 125 °С до 135 °С є оптимальною для створення безперервної екструзії асфальту з постійною шириною лінії. За їхніми прогнозами парк автономних транспортних засобів забезпечить функціонування нової економічної моделі, що лежить в основі міської інфраструктури, яка принесе користь суспільству. А покращені та налаштовувані властивості 3D-друкованого асфальту у поєднанні з гнучкістю та ефективністю платформи забезпечать передовий підхід до обслуговування об'єктів міської інфраструктури.

Окрім доріг, це дозволить змінити спосіб ремонту важкодоступних конструкцій, таких як плоских дахів будівель та інших споруд. Перевага цього методу полягає не тільки у можливості скоротити витрати (інші методи ремонту часто вимагають зведення будівельних риштувань та закриття або відключення інфраструктури для отримання доступу), але й у тому, що ремонт можна розпочати раніше, до того, як відбудеться масштабне зношування.

Ефективність технології 3D-друку великомасштабних структур можна підвищити за рахунок об'єднання електродвигуна, шнекового екструдера і нагрівача в одному корпусі. Це дозволить зменшити масу та розміри, а також значно підвищити ККД та надійність системи за рахунок функціональної інтеграції та повного використання дисипативної складової енергії. Потреба в сторонніх джерелах тепла зменшується або взагалі зникає, а поверхня електромеханічного перетворювача повністю занурена у речовину здатна передавати їй максимальну кількість теплової та механічної енергії.

Працездатність ідеї об'єднання електродвигуна та робочого органу була продемонстрована багатьма дослідниками, у тому числі авторами статті [9], які показали переваги енергоефективного промислового міксера для виробництва бетону. Міксер створений на базі синхронного двигуна з масивним феромагнітним ротором та постійними магнітами. Лопаті, що призначені для перемішування розташовуються одразу на валу виключаючи наявність додаткової механічної передачі.

Пристрої такої конструкції виконують обертальний і лінійний рух одночасно, а також мають модульну структуру (рис. 5), яка може включати будь-яку кількість модулів із загальною трифазною обмоткою [10-13].

Як правило, вони використовуються для перемішування та свердління [14], однак, їхнє потенційне застосування варіюється від верстатів до робототехніки та різних пристроїв, що використовуються для складання, захоплення, переміщення, упаковки, струшування [11, 15].

Щоб наочно порівняти із звичайним електродвигуном, що використовується в промислових міксерах, був обраний асинхронний двигун з еквівалентною механічною потужністю, номінальними обертами та крутним моментом.

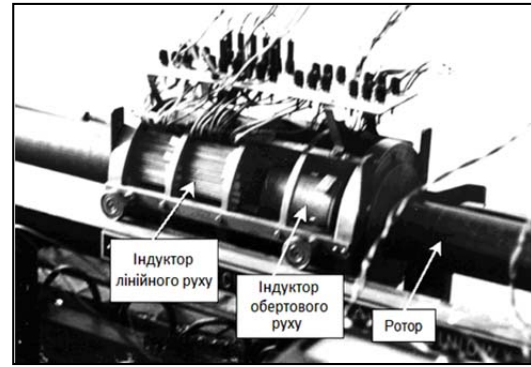


Рис. 5. Двостаторний обертально-лінійний електромеханічний перетворювач

Кількість споживаної двигунами енергії залежала від трьох чинників: робочого часу (t), навантаження (P) і ККД (η). Співвідношення між ними розраховувалося наступним чином:

$$W = (t \cdot P) / \eta.$$

Коефіцієнт корисної дії електродвигуна з масивним ротором (рис. 6) при повному завантаженні становив 94%, а для асинхронного двигуна наближався до 87%.

Порівняльний аналіз результатів ґрунтується на публікації, що була представлена на конференції з промислового та комерційного використання енергії [16]. Варто наголосити, що вказаний порівняльний аналіз електродвигунів не враховує теплові втрати в масивному роторі та статорі, які доцільно використовувати для розігріву та зменшення в'язкості робочого матеріалу [17, 18].

Слід відзначити значні наукові здобутки зарубіжних авторів в сфері дослідження електромагнітних і теплових процесів у таких перетворювачах. Значна кількість публікацій серед яких [19-21], присвячені дослідженню фізичних полів в активній зоні електромеханічних перетворювачів із феромагнітним ротором за допомогою чисельних методів.

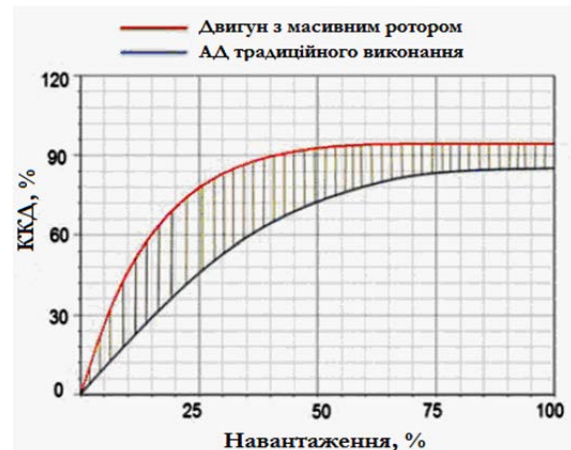


Рис. 6. Значення ККД для двигуна з масивним ротором і асинхронного двигуна традиційного виконання

Таким чином, для підвищення ефективності, економічності та універсальності пристроїв, які забезпечують операції транспортування, перемішування, пресування та нагрівання, важливе значення має їх використання як ланок технологічного ланцюга. Як альтернатива вищезазначеним підходам пропонується мобільна робототехнічна платформа, оснащена шнековим електромеханічним перетворювачем (екструдером). Пропонований перетворювач використовує зовнішній ротор-шнек, який одночасно виконує функції ротора асинхронного двигуна, нагрівального елемента, виконавчого механізму та захисного корпусу [22]. Отже, з урахуванням «корисних» втрат електромагнітної системи, ККД електромеханічного перетворювача збільшується до 98-99 %.

У шнековому перетворювачі використовується принцип саморегулювання при перетворенні енергії, згідно з яким розподіл на корисні потоки теплової та механічної енергії здійснюється відповідно до величини поточного ковзання, яка залежить від співвідношення електромагнітних моментів двигунового та гальмівного модулів. При під'єднанні обмотки статора двигунового модуля до джерела живлення, створюється магнітне поле, яке обертається. Це поле діє на прилеглу зону зовнішнього феромагнітного ротора, в якій за законом електромагнітної індукції наводяться вихрові струми (ВС). У результаті цього формується електромагнітний момент. Основним режимом роботи вважається протилежний напрямок обертання полів, при якому гальмівний модуль працює при ковзанні $s_2 > 1$, тобто в режимі електромагнітного гальмування.

Мета статті. Для оцінки ефективності використання електромеханічного перетворювача у складі мобільної робототехнічної платформи для промислового 3D-друку необхідно виконати аналіз розподілу вихрових струмів у феромагнітному роторі як основних джерел тепловиділень. Це буде слугувати важливою інформацією для прогнозування оптимальних значень температури, градієнта та швидкості обертання. У свою чергу, ці значення будуть визначати механічні властивості матеріалу на виході пристрою.

В роботі своє втілення отримала тривимірна модифікація кінцево-елементної моделі, що реалізована в рамках програмно-обчислювального комплексу Comsol Multiphysics. Цей комплекс відноситься до найбільш апробованих і доступних програмних продуктів, що реалізують метод кінцевих елементів. Розрахунок тривимірного розподілу ВС виконано на ділянці ротора для двигунового модуля експериментального зразка шнекового перетворювача. Тривимірною геометрією моделі складається з наступних розрахункових ділянок: порожнистого зовнішнього ротора, зубчастого магнітопроводу статора, повітряного зазору та обмотки статора. Кутова частота обертання ротора визначається як частота джерел поля відповідно до роторної системи координат. Питома електрична провідність матеріалу ротора приймала-

ся відповідно довідкових даних з урахуванням усередненої температури при робочому ковзанні двигунового модуля $s = 0,88$. Нелінійність магнітних властивостей масивного ротора та сердечника статора враховується завданням відповідних кривих намагнічування. Джерела поля задаються сторонньою густиною струму на ділянках пазів статора згідно трифазної схеми з'єднання обмотки.

Результати досліджень. Результат розв'язання польової задачі у вигляді тривимірного розподілу ВС показано на рис. 7. Одиночний поперечний зріз порожнистого ротора наведено для величини ковзання $s = 0,88$ ($n_2 = 90$ об./хв.). Зріз виконаний у «крайовій» зоні порожнистого циліндра, а зафарбуванням різного кольору та інтенсивності визначається величина z-складової густини ВС. На цьому ж рисунку показано лінію, вздовж якої виконано зріз стінки ротора, представлений на рис. 8.

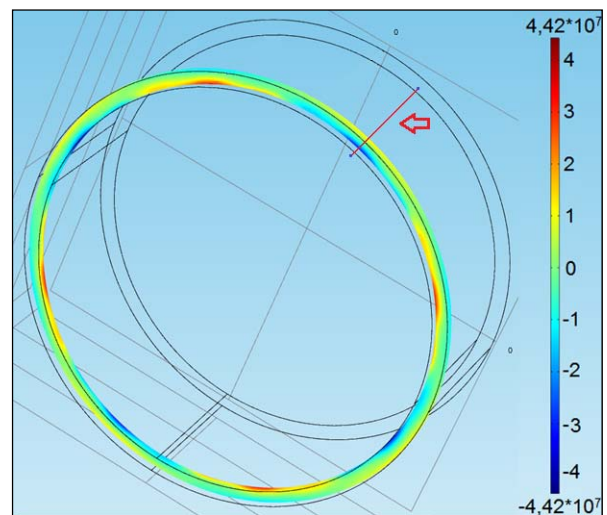


Рис. 7. Розподіл z-компоненти густини ВС у поперечному перерізі зовнішнього порожнистого ротора при $s = 0,88$ (A/m^2)

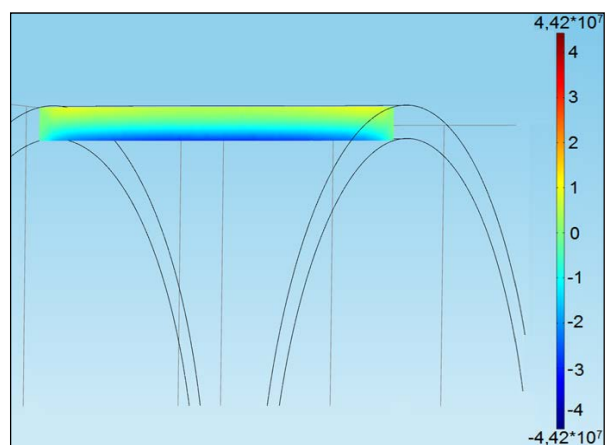


Рис. 8. Розподіл z-компоненти густини ВС у стінці зовнішнього порожнистого ротора при $s = 0,88$ (A/m^2)

Найбільше значення нормальної компоненти густини ВС трохи перевищує максимальну величину ($4,42 \text{ A}/\text{mm}^2$) z-компоненти для $s = 0,88$. Основ-

ним джерелом теплової потужності є шар внутрішньої поверхні ротора (4-5 мм), обернений у бік дже-рела електромагнітного поля.

Картину розподілу густини дисипованої потужності, що враховує усі види втрат у роторі представлено на рис. 9. Переважно, густина дисипованої потужності на зовнішній поверхні ротора знаходиться у межах $(10,5-20) \cdot 10^6$ Вт/м³.

Значний перепад густини дисипованої потужності між внутрішньою та зовнішньою поверхнями ротору в робочих умовах не є критичним. Теплова енергія ротора активно передається навколишньому матеріалу, а температурний градієнт у напрямку товщини стінки циліндра залишатиметься невеликим [18].

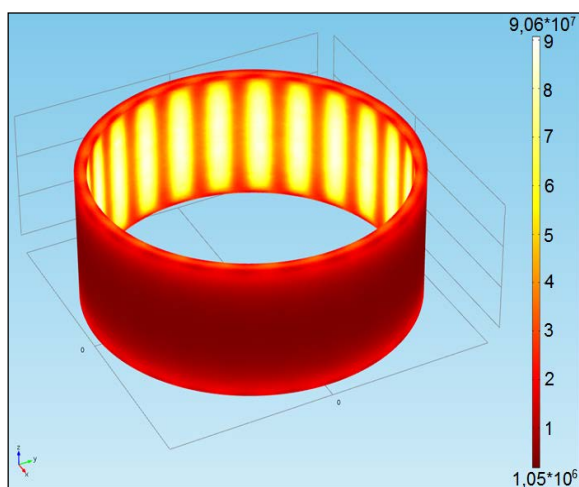


Рис. 9. Розподіл густини потужності у зовнішньому порожнистому роторі при $s = 0,88$ (Вт/м³)

Зазначимо, що характер розподілу густини дисипованої потужності в роторі істотно змінюється зі збільшенням частоти поля, що впливає на якість теплової дії на матеріал. Це зумовлено зміною конфігурації контурів протікання ВС, ймовірно, через зменшення глибини проникнення електромагнітного поля, а також впливу крайового ефекту.

Висновки. Підвищення ефективності та економичності мобільної робототехнічної платформи для технології 3D-друку великомасштабних структур досягається шляхом об'єднання електродвигуна, шнекового екструдера та нагрівача в одному корпусі. Такий підхід дає економію маси та розмірів, а також суттєве підвищення ККД та надійності системи за рахунок функціональної інтеграції та повного використання дисипативної складової енергії. Оцінка рівнів густини дисипованої потужності на поверхні ротора дозволяє говорити про перспективи запропонованого підходу з удосконалення конструкції вузла екструдера мобільної робототехнічної платформи для 3D-друку великомасштабних структур.

References

1. Yuk H., Lu B., Qu K., Xu J., Zhao X., Lin S., Luo J. 3D printing of conducting polymers. / H. Yuk, B. Lu, K. Qu, J. Xu, X. Zhao, S. Lin, J. Luo // *Natural Communication*. – 2020. Vol. 11, article number 1604.
2. Jankovics D. Customization of automotive structural components using additive manufacturing and topology optimization. / D. Jankovics // *IFAC-PapersOnLine*. – 2019. Vol. 52(10). – P. 212-217.
3. Wohlers T.T., Campbell I., Diegel O., Huff R., & Kowen J. Wohlers report 2020: 3D printing and additive manufacturing state of the industry. / T.T. Wohlers, I. Campbell, O. Diegel, R. Huff, & J. Kowen // Fort Collins: Wohlers Associates. – 2021.
4. Keating S., Spielberg N.A., Klein J., Oxman N. A compound arm approach. *Robotic Fabrication in Architecture*. / S. Keating, N.A. Spielberg, J. Klein // Oxman N. Dordrecht: Springer. – 2014. P. 99-110.
5. Efe Tiryaki M., Zhang X., Pham Q.C. Printing-while-moving: A new paradigm for large-scale robotic 3D Printing. / M. Efe Tiryaki, X. Zhang, Q.C. Pham // *IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*. – 2018. Vol. 4. P. 2286-2291.
6. Hall N. IAAC Minibuilders small robots with big ambitions. *3D Print Ind, WA*. [Elektronic resurs] / IAAC. 2016. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/iaac-minibuilders-small-robots-big-ambitions-83257/>.
7. Jackson R.J., Wojcik A., Miodownik M. 3D printing of asphalt and its effect on mechanical properties / R.J. Jackson, A. Wojcik, M. Miodownik // *Materials & Design*. – 2018. Vol. 160. P. 468-474.
8. Johansson A. 3D printing robot may be the solution to potholes, PSFK. [Elektronic resurs] / A. Johansson URL: <https://www.psfk.com/print-post?format=pdf&id=322046>.
9. Dobzhanskyi O., Amiri E., Gouws R. Comparison analysis of electric motors with two degrees of mechanical freedom: PM synchronous motor vs induction motor. / O. Dobzhanskyi, E. Amiri, R. Gouws. // *II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*. – 2016. P. 14-17.
10. Alwash J.H., Qaseer L.J. Three-dimension finite element analysis of a helical motion induction motor. / J.H. Alwash, L.J. Qaseer // *ACES*. – 2010. Vol. 25, No 8. P. 703-712.
11. Bolognesi P. A novel rotary-linear permanent magnets synchronous machine using common active parts. / P. Bolognesi // *15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. – 2010. P. 1179-1183.
12. Bentia I., Szabo L. Rotary-linear machines / I. Bentia, L. Szabo // *A survey. Journal of Computer Science and Control Systems*. – 2010. Vol. 3. P. 11-14.
13. Zhao J., Liu X., Xin Z., Han Y. Research on the energy-saving technology of concrete mixer trucks. / J. Zhao, X. Liu, Z. Xin, Y. Han // *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Xi'an. – 2009. P. 3551-3554.
14. Szczygieł M., Kluszczyński K. Rotary-linear induction motor based on the standard 3-phase squirrel cage induction motor – constructional and technological features. / M. Szczygieł, K. Kluszczyński // *Czasopismo Techniczne. Elektrotechnika*. – 2016. Vol. 1. 395-406.
15. Bolognesi P., Bruno O., Landi A., Sani L., Taponecco L. Electromagnetic actuators featuring multiple degrees of freedom: A survey. / P. Bolognesi, O. Bruno, A. Landi, L. Sani, L. Taponecco. // *16th International Conference on Electrical Machines*. – 2004. P. 1-6.

16. Dobzhanskyi O., Gouws R. 3-D Finite element method analysis of twin-armature permanent magnet motor with two degrees of mechanical freedom. / O. Dobzhanskyi, R. Gouws. // Springer Electrical Engineering. – 2017. Vol. 99, No. 3. P. 997–1004.
17. Zablodskiy M., Zhiltsov A., Kondratenko I., Gritsyuk V. Conception of efficiency of heat electromechanical complex as hybrid system. / M. Zablodskiy, A. Zhiltsov, I. Kondratenko, V. Gritsyuk // Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – 2017 P. 399–404.
18. Zablodskiy N., Pliugin V., Gritsyuk V. Submersible electromechanical transformers for energy efficient technologies of oil extraction. / N. Zablodskiy, V. Pliugin, V. Gritsyuk // Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. – 2014. Vol. 9. P. 223–227.
19. Gieras J.F. Performance calculation for a high-speed solid-rotor induction motor / J.F. Gieras // IEEE transactions on industrial electronics. – 2012. – Т. 59. – № 6. – P. 2689–2700.
20. Aho T. Experimental and finite element analysis of solid rotor end effects / T. Aho, J. Nerg, J. Pyrhonen // Industrial Electronics. – 2007. P. 1242–1247.
21. Papini L. Analytical-numerical modelling of solid rotor induction machine / L. Papini, C. Gerada // Electrimacs. – 2014. P. 121–126.
22. Zablodskii N.N., Plyugin V.E., Gritsyuk V.Y., Grin G.M. Polyfunctional electromechanical energy transformers for technological purposes / N.N. Zablodskii, V.E. Plyugin, V.Y. Gritsyuk, G.M. Grin // Russian Electrical Engineering. – 2016. Vol. 87. P. 140–144.

Gritsyuk V.Yu., Nevliudov I.Sh., Tsymbal O.M. Improving the extruder unit design of a mobile robotic platform for large-scale structures 3D printing.

Additive manufacturing has huge potential in the construction industry, as well as in the production and repair of road surfaces. Robotic 3D printing of large-scale structures allows architects and builders to significantly expand the boundaries of structural design and increase the efficiency of their construction. Mobile 3D printing platforms solve the problem of limited workspace. To improve the efficiency and cost-effectiveness of a mobile robotic platform for 3D printing technology of large-scale structures, it is proposed to improve the design of the extruder assembly. This is achieved by com-

binning the electric motor, auger extruder and heater in one housing. This approach provides savings in weight and size, as well as a significant increase in the efficiency and reliability of the system due to functional integration and full use of the dissipative component of energy. The proposed converter for a mobile robotic platform uses an external auger rotor, which simultaneously performs the functions of an asynchronous motor rotor, a heating element, an actuator and a protective housing. The goal of the work is to evaluate the efficiency of auger converter using as part of a mobile robotic platform for additive manufacturing. To achieve the goal, a finite element calculation and analysis of the spatial distribution of eddy currents in the area of a hollow ferromagnetic rotor was performed. The distribution patterns of the eddy current density z-component, as well as the distribution of the dissipated power density, taking into account all types of losses in the rotor, are obtained using the Comsol Multiphysics software and computing system. The distribution nature of the dissipated power density in the rotor changes significantly with an increase in the field frequency, which affects the quality of the thermal effect on the material. The results of the spatial distribution of the eddy currents of the rotor will improve the design of the converter, provide the specified values of temperature and gradient, which in turn determine the mechanical properties of the material at the output of the device.

Keywords: *additive manufacturing, mobile robotic platform, numerical calculation, construction, extruder unit, eddy currents.*

Грицюк В.Ю. – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки, volodymyr.hrytsiuk@nure.ua

Невлюдов І.Ш. – д.т.н., завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки, igor.nevliudov@nure.ua

Цимбал О.М. – д.т.н., професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки Харківського національного університету радіоелектроніки, oleksandr.tsymbal@nure.ua

Стаття подана 15.10.2022.