

Zastosowanie druku 3D przy produkcji maszyn elektrycznych z wykorzystaniem metody FDM

Krystian Mitka

1. Wstęp

Technologia druku 3D została po raz pierwszy skomercjalizowana w latach 80. XX wieku, jednak największy jej rozwój przypada na ostatnie kilkanaście lat, na co duży wpływ miały wygaśnięcie ważności istotnych patentów oraz upowszechnienie oprogramowania CAD do projektowania modeli 3D. Technologia druku 3D wykorzystywana jest w wielu branżach, w tym również w przemyśle elektrotechnicznym. Przykłady wdrożeń tej technologii ukazują jej ogromny potencjał. Dzięki możliwości drukowania przy pomocy różnych materiałów oraz technik możliwe jest wytwarzanie prototypów elementów maszyn, oprzyrządowania produkcyjnego czy też gotowych części. Maszyny elektryczne składają się z elementów ruchomych, produkowanych z materiałów o różnych własnościach, wymagających dokładnych lub średnio dokładnych klas tolerancji wykonania. Z tego powodu wytwarzanie użytkowych maszyn elektrycznych przy pomocy technologii druku 3D jest operacją złożoną. Często wymagane jest jednoczesne drukowanie wielomateriałowe czy też stosowanie przerw w druku w celu umieszczenia innych współpracujących części maszyny, takich jak łożyska, magnesy czy gwintowane wkładki. Dotychczas tylko kilka rodzajów maszyn elektrycznych wydrukowano za pomocą drukarek 3D. Bardzo często, ze względu na prostą budowę, podejmowane są próby wydruku w technologii Selective Laser Melting (SLM) silników reluktancyjnych [1].

Przy pomocy produkcji z użyciem proszków metali możliwe jest wytwarzanie praktycznie wszystkich części, z których składają się maszyny elektryczne. Na rys. 1 zaprezentowane zostały przykłady zastosowania produkcji addytywnej w budowie maszyn elektrycznych.

Celem tej pracy jest przybliżenie wykorzystania druku 3D w zastosowaniu produkcji maszyn elektrycznych przy pomocy prostej drukarki klasy konsumenckiej w technologii FDM.

2. Rodzaje druku 3D oraz stosowane materiały

Poniżej przedstawiono przegląd metod przyrostowych. Kolejność umieszczenia ustalona według daty opatentowania metody [6]:

- **SLA** (*Stereolithography*) – najstarsza metoda szybkiego prototypowania, polegająca na miejscowej polimeryzacji żywic światłem UV. Materiały używane w tej metodzie to termoutwardzalne ciekłe żywice fotopolimerowe.
- **LOM** (*Laminated Object Manufacturing*) – polega na wycinaniu i sklejanu po kolei warstw ze specjalnego papieru termozgrzewalnego lub folii. Alternatywna nazwa SDL (*Selective Deposition Lamination*). Stosowane materiały to folia papierowa, ceramiczna, metalowa, z tworzywa sztucznego.

Streszczenie: W ostatnich latach technologia produkcji addytywnej (*additive manufacturing*), zwana powszechnie drukiem 3D, przechodzi dynamiczny rozwój, a zainteresowanie przemysłu tą technologią rośnie – nie tylko jako metodą szybkiego prototypowania (*rapid prototyping*), lecz także jako sposobem wykonywania gotowych obiektów. W niniejszym artykule omówiono rodzaje druku 3D, w szczególności metodę Fused Deposition Modelling (FDM), a także przedstawiono zastosowanie technologii druku 3D w kontekście produkcji maszyn elektrycznych.

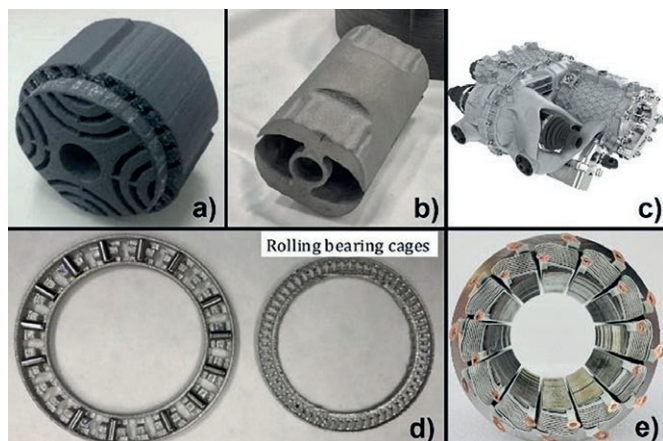
Słowa kluczowe: druk 3D, produkcja addytywna, maszyny elektryczne

APPLICATION OF 3D PRINTING IN THE PRODUCTION OF ELECTRIC MACHINES USING THE FDM METHOD

Abstract: 3D printing technology have been developing rapidly in the last years. The industry is interested in both the production of prototypes and final parts using additive manufacturing. The paper presents 3D printing technologies and materials from which it is possible to print using this technology. In this article are presented the use of 3D printing in the production of electrical machines.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, electrical machines

- **SLS** (*Selective Laser Sintering*) – selektywne spiekanie laserowe proszków. Alternatywna nazwa DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*). Najczęściej stosowane są proszki poliamidowe.
- **SLM** (*Selective Laser Melting*) – selektywne stapianie laserowe proszków. Używane mogą być wszelkie proszki metali takich, jak stal nierdzewna, stal narzędziowa, stopy aluminium, miedzi, tytanu, chromu, kobaltu, mosiądzu.
- **EBM** (*Electron Beam Melting*) – stapianie proszków z wykorzystaniem wiązki elektronów. Dzięki pracy w próżni istnieje możliwość pracy z materiałami wysoce reaktywnymi z tlenem, jak na przykład z proszkami tytanu.
- **FDM** (*Fused Deposition Modeling*) – modelowanie ciekłym tworzywem termoplastycznym, które jest wytłaczane przez ekstruder w postaci cienkiej nitki rozwijanej ze spuli, nazywanej filamentem. Filament podawany jest do dyszy mechanizmem zbudowanym z napędzanych, elastycznych lub ryflowanych rolek. Alternatywna nazwa FFF (*Fused*



Rys. 1. Elementy maszyn elektrycznych wyprodukowane na drukarkach 3D: a) wydrukowane pakiety rdzeni stojana i wirnika synchronicznej maszyny reluktancyjnej [2]; b) wirnik z powierzchniami przygotowanymi do osadzenia magnesów trwałych wydrukowany metodą SLM [3]; c) prototyp do produkcji małoseryjnej: obudowa napędu elektrycznego z drukarki 3D firmy Porsche [4]; d) przykłady koszyków łożysk tocznych wykonanych przy użyciu produkcji addytywnej [2]; e) stojan z cewkami skupionymi wydrukowanymi przy pomocy metody DMLS [5]

Filament Fabrication). Używane materiały to tworzywa termoplastyczne (ABS, PLA, PC, PET, TPU, TPE, PEEK). Drukarki FDM wyposażone są najczęściej w podgrzewany stół roboczy, który zapobiega odkształceniom oraz oderwaniu się wydruku. W przypadku niektórych materiałów konieczne jest zastosowanie podgrzewanej komory, aby wyrównać temperaturę w całej objętości wydruku.

- **JM (Jet Modeling)** – modelowanie strumieniowe. Płynny materiał, w postaci kropli, wystrzelony jest z dyszy, a następnie utwardzany. W metodzie tej zastosowanie mają fotopolimery oraz termoplastyczny wosk.
- **3DP (Three-Dimensional Printing)** – granulki proszku są łączone przez nanoszone warstwowo lepiszcze (klej). Alternatywna nazwa TDP. Materiałami stosowanymi do drukowania przestrzennego mogą być proszki metali, ceramiczne oraz kompozytowe.
- **DLP (Digital Light Processor)** – utwardzanie żywic światłem UV rzucanym z cyfrowych przetworników takich jak stosowanych w projektorach cyfrowych. Używane są termoutwardzalne ciekłe żywice fotopolimerowe.
- **LENS (Laser Engineering Net Shaping)** – wytwarzanie elementów z materiałów sproszkowanych poprzez ich miejscowe nanoszenie i spiekanie laserem. Metoda ta pozwala na wytwarzanie elementów z mieszaniny proszkowej (zależnej od ilości podajników). Można uzyskiwać dzięki temu kompozyty, gradienty ciągle lub dyskretne czy stopy umacniane dyspersyjnie.

3. Praktyczne wykonanie wydruku 3D przykładowych części oraz oprzyrządowania produkcyjnego maszyn elektrycznych

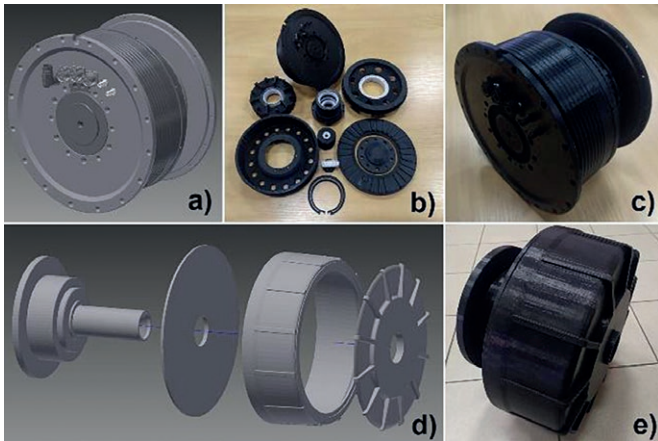
Nadrzędnym celem prezentowanej pracy jest przedstawienie przykładowych wydruków powiązanych z tematyką produkcji

maszyn elektrycznych. Przedstawione wydruki powstały w technologii FDM na drukarce VIVEDINO T-Rex 3.0. Wszystkie elementy powstały z materiału PLA oraz FIBER-FLEX. Wydruki zostały podzielone według przedstawienia w literaturze podziału technik przyrostowych „rapid”. Najczęściej pojawiającą się nazwą w kontekście technologii produkcji addytywnej jest Rapid Prototyping (RP). Wynika to z faktu, że początkowo druk 3D nie był wykorzystywany do produkcji gotowych elementów z powodu zbyt niskiej dokładności. Obecnie techniki te można wykorzystać w szerszym zakresie i ich podział ze względu na zastosowania wygląda następująco [6]:

- **Rapid Prototyping (RP)** – wykorzystywany do wytwarzania prototypów w celu sprawdzenia możliwości montażu i demontażu, wykonania testów funkcjonalnych, kształtu czy działania mechanizmów.
- **Rapid Manufacturing (RM)** – produkcja jednostkowa i małoseryjna, szybkie wytwarzanie części zamiennych w razie awarii, szczególnie przydatne przy przerwaniu łańcucha dostaw części oryginalnych, wytwarzanie elementów niestandardowych.
- **Rapid Tooling (RT)** – wytwarzanie oprzyrządowania produkcyjnego i montażowego, a także nietypowych narzędzi.
- **Rapid Modeling** – elementy, w których najważniejsze jest przedstawienie odpowiedniego wyglądu zewnętrznego. Wykorzystywany w marketingu, produkcji makiet, pomocy dydaktycznych, w działaniach artystycznych i projektowych.

3.1. Wydruki z zastosowaniem techniki Rapid Prototyping

W przypadku użycia techniki RP konieczne jest odpowiednie dobranie jakości wydruku w zależności od przyjętych kryteriów przeznaczenia wytwarzanych prototypów. Najczęściej wystarczająca jest zgrubna lub średnio dokładna jakość wydruku, chyba że model będzie służył np. do sprawdzenia możliwości montażu elementów o dokładnych klasach tolerancji. Przy produkcji addytywnej prototypów wytrzymałość otrzymanych wydruków jest mało istotna (wyjątkiem są prototypy przeznaczone do badań wytrzymałości), więc należy zastosować wypełnienie o niskim poziomie zagęszczenia. Niezbędne jest także przeanalizowanie modelu 3D wytwarzanego metodą przyrostową prototypu, szczególnie jeżeli gotowe części wykonywane będą metodami konwencjonalnymi. Model 3D powinno się poprawić, aby umożliwić lub ułatwić drukowanie elementu. Należy jednak zrobić to w taki sposób, aby model nadal zachował swoją pierwotną funkcjonalność. Prototypy ukazane na rysunku 2 stworzone zostały do różnych przeznaczeń. Prototyp elektrycznego zespołu napędowego do pojazdów użytkowych (rys. 2 a, 2 b, 2 c) powstał z myślą o sprawdzeniu możliwości i łatwości montażu oraz zbadaniu działania mechanizmów. Model został wydrukowany z dobrą jakością, jednak zastosowano skalę 1:2 w celu zmniejszenia zużycia filamentu. Prototyp silnika w piaskie koła do napędu dostawczego samochodu hybrydowego (rys. 2 d, 2 e) został wytworzony w celu sprawdzenia możliwości montażu w pojeździe. Istotne było więc wykonanie modelu w skali 1:1 z dobrym odwzwierciedleniem zewnętrznej struktury silnika. W celu zmniejszenia zużycia



Rys. 2. Prototypy wykonane w technologii FDM: a) model CAD prototypu elektrycznego zespołu napędowego do pojazdów użytkowych, [7]; b) wydrukowane części zespołu napędowego; c) montaż wydrukowanych części w prototypowy zespół napędowy; d) model CAD prototypu silnika w piaście koła do napędu dostawczego samochodu hybrydowego o masie do 3,5 t; e) wydrukowany prototyp silnika

materiału model został przekształcony w konstrukcję skorupową, a także podzielony na kilka części, co miało za zadanie wyeliminować konieczność stosowania podpór. Montaż tak wydrukowanych części nastąpił poprzez sklejenie ich ze sobą.

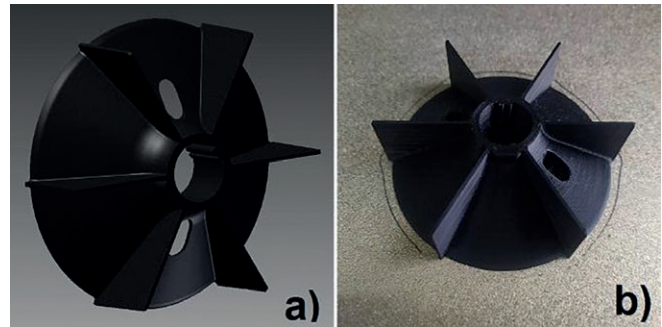
3.2. Wydruki z zastosowaniem techniki Rapid Manufacturing

Jako że części wyprodukowane przy użyciu tej techniki powinny być zamiennikami nie ustępującymi jakością i wytrzymałością elementom wytworzonym sposobami konwencjonalnymi, w przypadku RM należy zazwyczaj drukować elementy z dokładną lub bardzo dokładną jakością. Gęstość wypełnienia ustawiona powinna być w granicach 50–100%, aby uzyskać wydruki o odpowiedniej wytrzymałości. W przypadku drukowania gotowych części już na etapie projektowania należy zwrócić uwagę na technologiczność wyrobu, aby uniknąć niepotrzebnych podpór oraz osiągnąć wymaganą wytrzymałość.

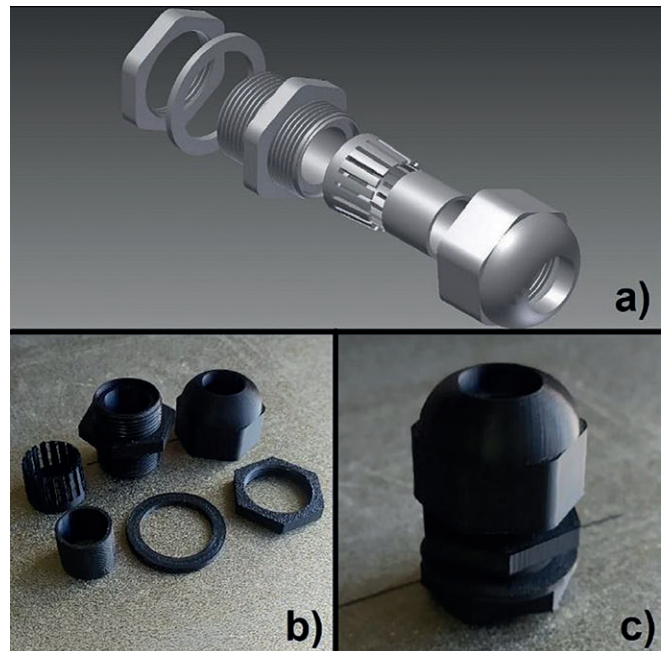
Niewątpliwie metody drukowania przy pomocy proszków metali w zastosowaniach przy produkcji gotowych części maszyn elektrycznych mają większy potencjał wykorzystania niż FDM, jednak możliwe jest wytworzenie niektórych części, spełniając przy tym odpowiednie kryteria jakości i wytrzymałości. Takimi elementami są wszelkie części, które są aktualnie produkowane z tworzyw sztucznych (przewietrzniki, dławnice, przepusty, zasłepki) oraz części nieobciążone lub obciążone małymi siłami podczas pracy maszyny (wsporniki, skrzynki zaciskowe, osłony, uchwyty).

Rysunki 3–5 przedstawiają przykładowe wydrukowane elementy, które mogą być stosowane jako gotowe części maszyn elektrycznych.

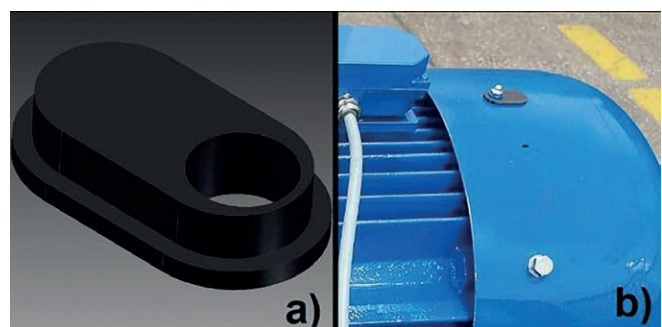
Dzięki zastosowaniu materiałów elastycznych, takich jak TPU, TPE czy FiberFlex, możliwe jest drukowanie elementów wymagających szczelności, takich jak dławnice (rys. 4) czy przepusty (rys. 5).



Rys. 3. Wentylator maszyny elektrycznej osadzany na końcowym czopie wału: a) model CAD; b) wydrukowany element



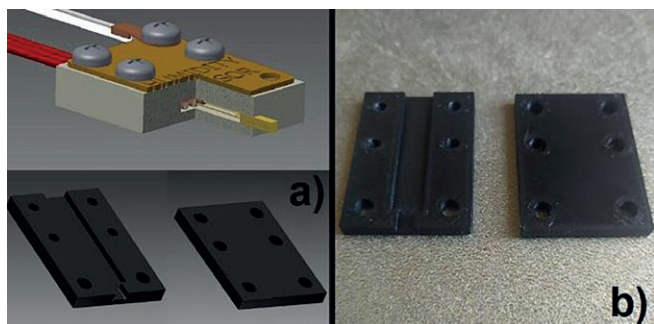
Rys. 4. Dławnica M25x1,5: a) model CAD w widoku rozstrzelonym; b) wydrukowane części składowe dławnicy; c) złożona dławnica



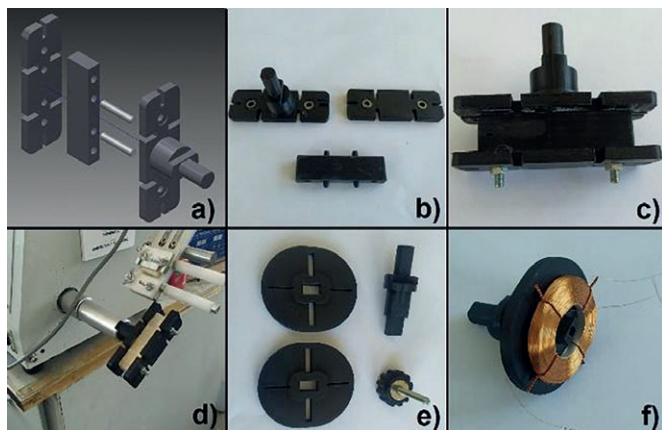
Rys. 5. Zaprojektowany nietypowy przepust smarowniczy: a) model CAD; b) miejsce montażu gotowej części

3.3. Wydruki z zastosowaniem techniki Rapid Tooling

Wytwarzanie oprzyrządowania i narzędzi jest procesem czasochłonnym i drogim, szczególnie gdy przyrządy są używane przy produkcji jednostkowej lub małoseryjnej. Współczesne realia rynkowe wymagają szybszego opracowywania produktów



Rys. 6. Płytki montażowe czujnika wilgotności: a) model CAD; b) wydrukowane części

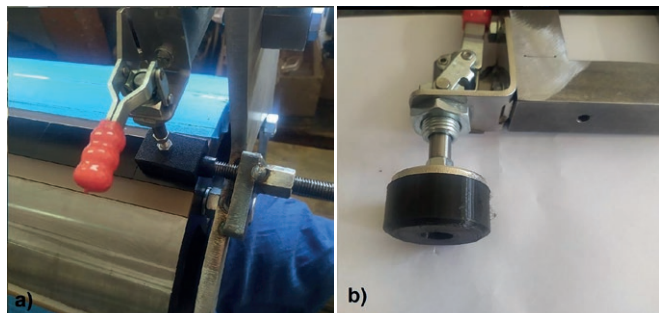


Rys. 7. Szablony do nawijania cewek: a) model CAD; b) wydrukowane części szablónu; c) złożony szablon; d) montaż szablónu na nawijarce CNC; e) wydrukowane części szablónu; f) nawinięta cewka

i skrócenia czasu wprowadzania ich na rynek. Wymagają również wyższej jakości, większej wydajności i redukcji kosztów oraz zdolności do spełnienia celów środowiskowych i recyklingowych. Przemysł szybko zaczął wykorzystywać techniki RP w celu szybszego i efektywniejszego wytwarzania oprzyrządowania. Początkowo RT wykorzystywał metody szybkiego prototypowania do tworzenia form używanych do kształtowania plastycznego czy formowania wtryskowego. Współcześnie coraz częściej wykonuje się oprzyrządowanie bezpośrednio na maszynach wykorzystujących technologię przyrostową [8]. Przykłady zastosowania druku FDM do wytwarzania oprzyrządowania ukazano na rysunkach 6 i 7.

3.4. Wydruki z zastosowaniem techniki Rapid Modeling

W przypadku wytwarzania przy użyciu tej techniki kluczową kwestią jest zapewnienie jak najlepszej jakości wydruku, gdyż najważniejszy jest aspekt wizualny wykonywanych przedmiotów. Dla maszyn elektrycznych celowość zastosowania tej techniki jest raczej niska i ogranicza się do działalności konferencyjno-targowej, na przykład do produkcji makiet i modeli marketingowych. Wydrukowany przykład ukazuje możliwość wytwarzania emblematów z logiem producenta i został wykonany z materiałów o trzech różnych kolorach, przy użyciu techniki przerw w drukowaniu w celu wymiany filamentu.



Rys. 8. Prototyp przyrządu do klejenia magnesów: a) nakładki na dociskacz od góry oraz na śrubę dociskającą z boku; b) nakładka na dociskacz z góry



Rys. 9. Wydrukowany przy użyciu trzech różnokolorowych filamentów emblemat z logiem instytutu

4. Podsumowanie i wnioski

Specyfika budowy maszyn elektrycznych sprawia, że wytwarzanie całych maszyn z wykorzystaniem technologii produkcji addytywnej jest zadaniem trudnym technologicznie lub nieopłacalnym. Elementy wymagające wysokiej klasy dokładności, jak na przykład wał czy łożyska, nawet jeśli byłyby wykonane przy pomocy druku 3D, wymagałyby kolejnych operacji obróbki wykańczającej. Z kolei takie zespoły maszyn elektrycznych, jak stojan czy wirnik, są elementami składającymi się z różnych materiałów, o różnych właściwościach, co skutkuje potrzebą opracowywania nowych sposobów drukowania wielomateriałowego. Na tę chwilę druk 3D z powodzeniem może być zastosowany w przypadku elementów odlewanych maszyn elektrycznych, w szczególności kadłubów. W pracy tej przedstawiono możliwości druku 3D przy użyciu materiałów innych niż proszki metali. Najpopularniejsza obecnie metoda FDM może wykorzystywać wiele różnych materiałów termoplastycznych, przy pomocy których można wydrukować elementy maszyn, takie jak dławnice, przepusty, wentylatory, osłony, uchwyty, skrzynki zaciskowe, różnego rodzaju prototypy oraz oprzyrządowanie produkcyjne. Technologie produkcji addytywnej wykazują więc duży potencjał i mogą być szczególnie przydatne podczas produkcji jednostkowej i małoseryjnej.


Literatura

- [1] MIKOŚ J.: *Przegląd technologii druku 3D jako produkcji dodatkowej (przyrostowa) do wykonywania prototypów małych maszyn elektrycznych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2(126)/2021.
- [2] WROBEL R., MECROW B.: *Additive Manufacturing in Construction of Electrical Machines – A Review*. 2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 2019.
- [3] GARIBALDI G.: *Laser additive manufacturing of soft magnetic cores for rotating machinery: materials development and part design*. PhD thesis, University of Nottingham, UK, 2018.
- [4] Prototype for small-series production: electric drive housing from a 3D printer, „<https://newsroom.porsche.com/en/2020/innovation/porsche-prototype-small-production-electric-drive-housing-3d-printer-23235.html>” – 08.2022.
- [5] SZABÓ L., FODOR D.: *The Key Role of 3D Printing Technologies in the Further Development of Electrical Machines*. „Machines” 2022, 10, 330.
- [6] BUDZIK G., SIEMIŃSKI P.: *Techniki przyrostowe. Druk 3D. Drukarki 3D*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.
- [7] BĘDKOWSKI B., CYGANIK Ł., DUKALSKI P., JAREK T.: *Założenia projektu elektrycznego zespołu napędowego do pojazdów użytkowych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2(126)/2021.
- [8] HUZAIM N.H.M., RAHIM S.Z.A., MUSA L., ABDELLAH A.E.-H., ABDULLAH M.M.A.B., RENNIE A., RAHMAN R., GARUS S., BŁOCH K., SANDU A.V. ET AL.: *Potential of Rapid Tooling in Rapid Heat Cycle Molding: A Review*. „Materials” 2022, 15, 3725.

Informacje dodatkowe

Praca powstała w ramach realizacji projektu „Innowacyjny elektryczny zespół napędowy do pojazdów użytkowych”, współfinansowanego ze środków NCBiR w ramach programu LIDER XI, zgodnie z umową nr LIDER/15/0060/L11/19/NCBR/2020.

Oryginalnie artykuł ukazał się w „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe 2022”

 mgr inż. Krystian Mitka, krystian.mitka@git.lukasiewicz.gov.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny –
Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych

artykuł recenzowany