

Poznań, 14.09.2020

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski
Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
tel.: +48 61 6653570
e-mail: michal.wieczorowski@put.poznan.pl

Ocena rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Joanny Woźniak

Doskonalenie sterowania rozproszonymi systemami wytwarzania przyrostowego

Podstawa recenzji

Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza numer RM-530-14-03/19/2020 z dnia 26 czerwca 2020 roku.

1. Wprowadzenie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest związana z doskonaleniem sterowania rozproszonymi systemami wytwarzania przyrostowego. Światowe tendencje w rozwoju technologii pokazują stale zwiększające się zastosowanie narzędzi programowych i informatycznych w procesach wytwarzania. Jest to łączone nie tylko z potrzebą przyspieszania procesów produkcji i zapewnienia odpowiedniej jakości wyrobów, ale również z poprawą pracy systemów logistycznych wspomagających produkcję. Można zaobserwować rosnący trend aplikacji przemysłowych tzw. Rapid Technologii (modelowanie 3D-CAD, druk 3D, skanowanie 3D, obróbka CNC) wykorzystujących możliwości szybkiego przetwarzania danych w środowisku programowym opartym o sieci komputerowe i narzędzia internetowe. Wytwarzanie przyrostowe w ostatnim okresie przeszło z fazy prototypowej do przemysłu jako pełnowartościowa technologia produkcyjna. Coraz więcej światowych koncernów wprowadza do linii technologicznych

drukarki 3D. Powstają także specjalistyczne firmy, które zajmują się wytwarzaniem wyrobów z zastosowaniem druku 3D dla różnych gałęzi przemysłu. Umieszczenie technologii przyrostowych w grupie systemów wspomaganych komputerowo pozwala na zastosowanie zdalnych procedur zarządzania produkcją dla rozproszonych środków wytwarzania. Zauważalne są na rynku aplikacje pozwalające na zamówienie wydruku 3D w firmach, które oferują tego usługi w sposób zdalny. Procedury takie mogą być jednak trudne do wprowadzenia ze względów prawnych związanych z kontrolą jakości wyrobu i ewentualnych reklamacji występujących w przypadku wykonania produktów nie spełniających wymagań projektanta. Biorąc powyższe pod uwagę, podjęta przez Doktorantkę tematyka jest aktualna, a sama praca doskonale wpisuje się w całość prac od szeregu lat prowadzonych w Politechnice Rzeszowskiej na temat szybkiego prototypowania i inżynierii produkcji. W odniesieniu przedstawionych zagadnień oraz po uwzględnieniu doświadczeń naukowych i badań ankietowych Autorki, podjęcie tematu rozprawy należy uznać za uzasadnione i trafne zarówno pod względem naukowym, jak i utylnym.

2. Omówienie rozprawy

Przedstawiona do recenzji dysertacja złożona jest z 7 rozdziałów, streszczenia w języku polskim oraz angielskim i wraz z załącznikiem liczy 129 stron. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów tworzy układ spójny i logiczny. Zawartość merytoryczna jest bogato ilustrowana, co stanowi wartość samą w sobie i pomaga w interpretacji toku rozumowania Autorki.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp do pracy i przedstawia informacje wprowadzające czytelnika w zagadnienia związane z dysertacją związane m.in. technologiami przyrostowymi inżynierią produkcji, kontrolą jakości oraz ideą Przemysłu 4.0.

W rozdziale drugim Autorka przeprowadziła szeroką analizę stanu zagadnienia aplikacji druku 3D do wytwarzania elementów maszyn w odniesieniu do miejsca metod Rapid Prototyping w procesie produkcyjnym wspomagany komputerowo i wykorzystującym sieci teleinformatyczne. Analizę rozpoczęła od opisanie głównych etapów rozwoju przemysłu z uwzględnieniem rozwiązań technicznych i organizacyjnych usprawniających procesy produkcyjne m.in. Lean Manufacturing, systemy MRP – Materials Requirements Planning, systemy CRM – Customer Relationship Management oraz Industry 4.0. Przedstawiona jest tu również charakterystyka metod szybkiego prototypowania oraz wpływ i miejsce druku 3D w nowoczesnych systemach produkcyjnych. Doktorantka odnosi się w przeprowadzonej analizie do źródeł książkowych, raportów, witryn internetowych i norm międzynarodowych. Istotnym elementem tego rozdziału jest próba identyfikacji i klasyfikacji technologii przyrostowych w zarządzaniu

łańcuchem dostaw dla różnych wariantów struktury produkcyjnej. Autorka wyróżnia tu trzy warianty struktury czyli: wariant pierwszy, przedstawiający druk 3D jako samodzielne stanowisko wytwórcze, wariant drugi włączający pośrednio druk 3D do strategii Przemysłu 4.0 oraz wariant trzeci, w którym druk 3D stanowi istotny i integralny element tej strategii.

Rozdział trzeci jest wynikiem przedstawionej w poprzednim rozdziale analizy i przedstawia sformułowane tezy cele i zakres realizowanych prac.

Począwszy od rozdziału czwartego rozpoczyna się część doświadczalna pracy, której podstawą jest sporządzony autorski algorytm procesu realizacji zadań produkcyjnych i dystrybucyjnych w rozproszonym systemie wykorzystującym technologie przyrostowe. Przedstawiono tu model badawczy, jako autorski projekt uchwytu lusterka samochodowego, który został wykonany z zastosowaniem wybranych urządzeń przyrostowych różnymi technikami. Opiszano skrótowo procesy wytwarzania modeli z zastosowaniem wykorzystaniem urządzeń wytwórczych oraz proces kontroli jakości oparty o procedury zawarte w normach opisujących procesy przyrostowe. Procedury te obejmują m.in. ocenę wizualną prototypu pomiary z zastosowaniem przyrządów warsztatowych oraz skanowania trójwymiarowego. Istotnym procesem kontroli jest opracowana przez Autorkę platforma do prowadzenia dokumentacji poszczególnych etapów kontroli jakości w trybie on-line, którą nazwała SMART CLOUD QUALITIES (AM-SCQ) i która ma stanowić istotny element w doskonaleniu sterowania rozproszonymi systemami wytwarzania przyrostowego, co jest zgodne z tytułem pracy. Rozdział ten zakończono opisem identyfikacji zagrożeń, które mogą się pojawiać podczas procesu produkcyjnego opartego o druk 3D wraz z przedstawieniem działań naprawczych możliwych do wykonania na każdym z etapów wytwarzania.

Rozdział piąty przedstawia analizę rynkową branży druku 3D w odniesieniu do wdrażania elementów struktury Industry 4.0 w procesach produkcyjnych. Autorka opracowała autorską ankietę, na podstawie której przeprowadziła badania na grupie 80 przedsiębiorstw i instytucji badawczych mających w swej ofercie usługi szybkiego prototypowania. Wyniki badań przedstawione są w postaci czytelnych wykresów, które w oryginalny sposób przedstawiają stan wdrożenia technologii przyrostowych oraz wspomaganych komputerowo procesów produkcyjnych na określonej próbie przedsiębiorstw w skali kraju. Jest to ciekawy materiał do analiz stopnia zaawansowania polskiego przemysłu w procesie wdrażania inteligentnych narzędzi przeznaczonych do doskonalenia procesów produkcyjnych. Doktorantka szeroko prezentuje wyniki badań, widoczne jest również jej zaangażowanie w sam proces badania ankietowego, który z punktu widzenia współczynników zwrotu ankiet od przedsiębiorstw nie jest prosty w realizacji.

W rozdziale szóstym znajduje się szerokie omówienie przeprowadzonych badań sformułowane w postaci podsumowania badań ankietowych oraz sformułowanych na podstawie analizy wyników testów technologicznych, wniosków dotyczących doskonalenia sterowania rozproszonymi systemami druku 3D z wykorzystaniem systemów zdalnych.

Rozdział siódmy to literatura, obejmująca 170 pozycji w tym 155 publikacji do których należą publikacje zwarte, artykuły w czasopismach i materiały konferencyjne, 6 norm i 9 stron internetowych. Publikacje te stanowią szeroki i aktualny przegląd związany z tematyką pracy, Są wśród nich także współautorskie opracowania Autorki rozprawy.

Praca zawiera również załącznik w postaci karty kontroli wyrobu oparta na opracowanej przez Autorkę zdalnej platformie SMART CLOUD QUALITIES – AM-SCQ, przeznaczonej do kontroli wyrobów wytwarzanych technikami addytywnymi.

Na końcu pracy znajduje się streszczenie w języku polskim i angielskim, natomiast na początku zamieszczono spis ważniejszych akronimów.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny praca doktorska jest interesująca i zawiera wiele cennych informacji z punktu widzenia analizy nowoczesnych procesów produkcyjnych i miejsce wytwarzania przyrostowego w strukturze Przemysłu 4.0. Zagadnienia przedstawione przez Doktorantkę pozwalają pozytywnie ocenić jej wiedzę i doświadczenie, poparte wynikami pomiarów i analiz a także przeprowadzeniem i analizą badań ankietowych, które umożliwiły na identyfikację wybranych problemów polskiego przemysłu na drodze do wdrażania technologii przyrostowych, druku 3D i systemów zarządzania produkcją wspomaganych komputerowo. Analizując założenia rozprawy doktorskiej stwierdzam, że postawiona przez Doktorantkę teza pracy została udowodniona, chociaż dowód ten jest rozproszony w treści pracy. W mojej ocenie osiągnięto również główny cel pracy, który została przedstawiony w postaci graficznej na początku rozdziału czwartego i może stanowić metodykę realizacji procesów druku 3D w konfiguracji rozproszonej uwzględniającej również kontrolę jakości opartą o zdalną platformę sieciową. Jest to istotne osiągnięcie doktorantki zarówno pod względem naukowym i badawczym ale również użytkowym. Z punktu widzenia obecnej światowej sytuacji epidemiologicznej przedstawiona metodyka doskonalenia procesów rozproszonych zarządzanych zdalnie, opracowana przez Autorkę platforma może stanowić istotne narzędzie możliwe do aplikacji nie tylko w warunkach badawczych ale praktyce przemysłowej.

Doktorantka poddała analizie kolejne etapy druku 3D wykorzystując do tego własny projekt uchwytu lusterka samochodowego, przeznaczony do wytwarzania z zastosowaniem technologii przyrostowych. Dotychczasowe opracowania ujmują generalnie zastosowanie technik addytywnych do produkcji prototypów i wyrobów, jednak zastosowanie narzędzi zdalnego zarządzania rozproszonymi systemami druku 3D z wykorzystaniem struktur opartych na Industry 4.0 nie jest obecnie szeroko przebadane. Biorąc to pod uwagę opracowany w rozprawie algorytm doskonalenia procesów wytwarzania wykorzystujący zdalną platformą kontroli jakości stanowi ważne osiągnięcie Autorki. Zawarta w rozdziale czwartym analiza wybranych procesów przyrostowych oraz ich poszczególnych etapów pozwala zdefiniować istotne z punktu widzenia jakości wyrobu miejsca w procesie technologicznych wyrobów wytwarzanych przyrostowo. Doktorantka przedstawia wyniki pomiarów wymiarów geometrycznych przedmiotowego uchwytu, które są istotne z punktu widzenia zastosowanych technologii, jednak głównym celem tej części pracy jest zdefiniowanie miejsca określonych metod oceny jakości wyrobu w procesie analizy i doskonalenia sterowania jakością w systemach rozproszonych wykorzystujących druk 3D.

Analizując treść rozprawy można początkowo odnieść wrażenie, że dotyczy dwóch odrębnych aspektów związanych z technologią i inżynierią mechaniczną oraz zarządzaniem i logistyką. Po zapoznaniu się szczegółowo z pracą wszystkie jej elementy uzupełniają się wzajemnie układając się spójną całość. Część badawcza oparta o analizę wydruku 3D uchwytu lusterka wpisuje się w dyscyplinę całościowo inżynieria mechaniczna, natomiast część oparta o badania ankietowe wpisuje się w dyscyplinę inżynieria mechaniczna w obszarze zarządzania produkcją. Elementem spajającym jest natomiast procedura zarządzania procesem realizacji zadań produkcyjnych i dystrybucyjnych.

Ciekawy materiał poznawczy stanowi badanie ankietowe dotyczące wdrożenia koncepcji Industry 4.0 dla technologii przyrostowych w skali Polski. Jak wynika z lokalizacji badanych podmiotów, udział respondentów z poszczególnych województw nie jest równomierny. Najwięcej podmiotów przebadano w województwie podkarpackim i wynika to prawdopodobnie z tego, że Doktorantka miała najlepszy dostęp do respondentów zlokalizowanych najbliżej jej miejsca pracy. Oprócz zagadnień teoretycznych Autorka podjęła próbę transferu wyników badań do praktyki produkcyjnej, opracowując platformę do kontroli jakości AM-SCQ wyrobów kształtowanych przyrostowo. Wszystkie wymienione powyżej aspekty niewątpliwie potwierdzają możliwości i umiejętności Doktorantki do prowadzenia badań naukowych i formułowania właściwych wniosków z nich płynących. Poniżej przedstawiam bardziej szczegółowe uwagi, przy czym pragnę zaznaczyć, że część z nich to moje komentarze.

Zapoznając się z treścią manuskryptu nasunęły mi się pewne uwagi w stosunku do treści, które mogą być dla Doktorantki punktem wyjścia do ciągłego doskonalenia warsztatu naukowego i edytorskiego, a także do dyskusji z Recenzentem. Wśród takich uwag są następujące:

- 1) Czy - biorąc pod uwagę rozkład otrzymanych ankiet - należy wnioskować, że badania realizowane zdalnie ankietą internetową czy poprzez e-mail miały mniejszą skuteczność niż realizowane w wywiadzie bezpośrednim?
- 2) Podrozdział 2.2.3. Od określenia Customer Relationship Management skrótem jest CRM (a nie CMR), co warto stosować konsekwentnie. Skrót ten powinien się także znaleźć wśród wykazu skrótów.
- 3) Na stronie 17 Autorka pisze, że: Proces transformacji cyfrowej produktów polega na rozszerzeniu istniejącego portfolio..., co jest tezą bardzo dyskusyjną.
- 4) Rys. 4.7 – w opisie podano: Skorzystanie z oprogramowania dającego możliwość naprawy plików, wydaje mi się, że ten opis nie jest trafny.
- 5) Rys. 4.17 – w opisie podano: Przykład odklejania się wydruku 3D od platformy roboczej. Natomiast na rysunku tego miejsca odklejania dokładnie nie widać.
- 6) Rysunki 4.22 - 4.26 przedstawiają odchyłki wymiarowe, a nie odchyłki dokładności. W odniesieniu do terminu „dokładność”, dobrze mieć świadomość, że jest ona jedynie pojęciem jakościowym, a nie ilościowym (słownik VIM).
- 7) Rys. 4.29 – w opisie podano: Przykładowa karta ... - Kontrola za pomocą narzędzi – nie podano natomiast za pomocą jakich narzędzi. Rozmiar tego rysunku mógłby być nieco większy, co poprawiłoby czytelność.
- 8) Strona 82. Dlaczego Doktorantka posłużyła się akurat testem ANOVA Kruskala-Wallisa? Czy analizowano również inne testy mogące mieć potencjalnie zastosowanie w takiej sytuacji?
- 9) Strona 108. Autorka podaje, że Implementacja Przemysłu 4.0 może doprowadzić do ewaluacji na rynku pracy. Nie bardzo rozumiem, tutaj ni można nawet zastosować określenia ewolucja, zmiany będą raczej rewolucyjne.

Oceniając stronę edytorską należy podkreślić, że praca napisana została w ogólności poprawnym językiem polskim. Rysunki w większości wykonane są z dbałością i starannością.

Wśród uwag edytorskich warto zwrócić uwagę na następujące:

- 1) W pracy występują tzw. teksty wiszące, czyli teksty znajdujące się np. pomiędzy tytułem rozdziału głównego a tytułem podrozdziału (np. na początku rozdziału 4 i podrozdziału 4.4). Zasady edytorskie stanowią, że przy numeracji cyfrowej wielorzędowej np. po tytule

rozdziału 4 powinien od razu następować tytuł podrozdziału 4.1. a tuż np. po tytule podrozdziału powinien być tytuł podrozdziału kolejnego rzędu itd. Między nimi nie powinno być żadnych tekstów (zwanych wiszącymi). Teksty te to z reguły ogólne wprowadzenia do rozdziałów, omówienia czy streszczenia. Jeżeli tekst wiszący jest cennym i niezbędnym wprowadzeniem do tematu – powinien mieć numer i tytuł, natomiast jeśli zawiera ogólniki lub omówienie dalszej części rozdziału – powinien zostać usunięty przez Autorkę.

- 2) Strona 16, rysunek 2.4 jest trochę nieczytelny. Jego powiększenie spowodowałoby dużo lepszą czytelność tekstów na rysunku.
- 3) Strona 22, rysunek 2.6 czcionka na rysunku jest trochę nieczytelna.
- 4) Strona 29 - dlaczego Doktorantka posługuje się normami ASTM, skoro ISO opublikowało już sporo norm z serii 52000.
- 5) Strona 44 i 45, rysunek 4.1. W algorytmie powinno się znaleźć potwierdzenie przyjęcia zamówienia przez Dostawcę.
- 6) Do elementów policzalnych stosujemy "liczba", a nie "ilość" (strona 53, 92).
- 7) W odniesieniu do kosztów lepiej pisać o dużych i małych, a nie wysokich i niskich.

Uwagi stylistyczne i literowe:

Strona 6. Jest *Lena manufacturing* powinno być *Lean manufacturing*

Strona 12. Jest *Przykład transformacja* powinno być *Przykład transformacji*

Strona 12. Jest *nie możliwe jest* powinno być *niemożliwe jest*

Strona 18, Jest *CYBER-PHISICAL* powinno być *Cyber-Physical*

Strona 41. Jest *Na podstawi analizy* powinno być *Na podstawie analizy*

Strona 71. Jest *Po wypełnieni požądanych* powinno być *Po wypełnieniu požądanych*

Strona 83, Jest *pre- processingiem* powinno być *pre-processingiem*

Strona 83, rysunek 5.21. Jest *post- processingu* powinno być *post-processingu*

Strona 96. Jest *deklaruje stosowania* powinno być *deklaruje stosowanie*

Przedstawione powyżej uwagi w niczym nie umniejszają wartości opiniowanej rozprawy, a część z nich ma charakter zagadnień i tematów do dyskusji.

4. Wnioski

Zaprezentowana rozprawa doktorska jest dziełem zawierającym bardzo ciekawe informacje na temat doskonalenia sterowania rozproszonymi systemami wytwarzania przyrostowego. Jej Autorka zmierzyła się z obszernym tematem podchodząc do niego w sposób nowa-

torski łącząc zagadnienia technologiczne z badaniami ankietowymi i analizą logistyczną. Biorąc pod uwagę nowoczesne trendy w przemyśle opartym na strukturze Industry 4.0, wykorzystanie narzędzi sieciowych, zagadnienia w niej opisane trafnie wpisują się również w obecną sytuację związaną z epidemią i systemem pracy zdalnej i produkcji rozproszonej wykorzystywanym w takim okresie. Praca napisana jest w sposób jasny i przejrzysty bogato ilustrowana graficznie.

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy doktorskiej stwierdzam, że tematyka pracy jest żywa i aktualna, została wybrana w sposób trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Dysertacja w wielu elementach wnosi treści nowe. Cel pracy został osiągnięty w zakresie przyjętym przez Autorkę. Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktorantki w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jej dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne.

5. Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Joanny Woźniak pt. *Doskonalenie sterowania rozproszonymi systemami wytwarzania przyrostowego*, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski



Politechnika Poznańska