RDJMe. 512.9.2023

Prof. dr hab. inż. Józef Gawlik
Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny
Katedra Inżynierii i Automatyzacji Produkcji

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Barbary Balon nt.: **„Harmonogramowanie procesów produkcyjnych z zastosowaniem współdzielonego rejestru zasobów zorganizowanego w oparciu o założenia Technologii Blockchain"**

Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Kalinowski, prof. PŚ.
Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Iwona Paprocka, prof. PŚ

Podstawa opracowania: pismo z dnia 28.09.2023 r. Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, prof. dr. hab. inż. Ewy Majchrzak

1. Zakres i charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 157 stron, a w tym: spis treści (2 str.), załącznik 1 (7 str.), streszczenie w j. polskim (1 str.), streszczenie w j. angielskim (1 str.), literatura (17 str.), spis rysunków (3 str.), spis tabel (1 str.). Zasadnicza część rozprawy zawiera 10 rozdziałów (125 str.).

We wstępie - Rozdział 1 (s.3 - s.8) Autorka rozprawy nakreśla główne problemy dotyczące trudności w harmonogramowaniu produkcji przy uwzględnieniu istniejących ograniczeń oraz konieczności (celowości) sporządzenia możliwie optymalnego planu (np. dla kryterium wykorzystania dostępnych zasobów, czy kryterium kosztów dla rozpatrywanego wariantu produkcji). Zwraca uwagę na szereg istotnych, związanych z tym problemem zagadnień, a mianowicie że:

- *„funkcjonowanie przedsiębiorstw w modelu współczesnej produkcji oznacza wdrożenie rozwiązań zarządczych w przestrzeń wirtualną, w której obieg większości danych odbywa się*
  w sposób scentralizowany przy zastosowaniu infrastruktury informatycznej, instytucji pośredniczącej wymianie danych i nietrudnych do złamania zabezpieczeniach cyfrowych;
- *zarządcze przebiegają w sposób zdalny, a większość działań jest digitalizowana i umieszczana w tzw. chmurach danych;*
- *rozwiązania takie mają jednak liczne wady, głównie ze względu na postęp technologiczny, łatwość w nielegalnym przejmowaniu danych oraz konieczność dostosowania się do galopującej cyfryzacji sterowania zarządczego;*
- *konieczne jest poszukiwanie rozwiązań, które pozwolą na niskokosztową i spersonalizowaną produkcję;*
- *firmy, aby zwiększyć wydajność i móc się rozwijać, nierzadko korzystają (a wręcz muszą korzystać) z zasobów partnerów biznesowych;*
- *zastosowanie wymienionych rozwiązań czyni firmy globalnymi ze względu na możliwość zarządzania z dowolnego miejsca na świecie, niezależnie od fizycznej lokalizacji przedsiębiorstwa, bowiem wystarczy połączenie z Internetem i urządzenie do odczytu lub wprowadzania danych;*
- *jednak działania w środowisku cyfrowym niosą ze sobą ryzyko cyberataków*;
- *możliwości* bezpiecznego przechowywania i efektywnej analizy danych jest Technologia *Blockchain, dzięki połączeniu archiwizacji, cyberbezpieczeństwa, uwierzytelniania dostępu tylko dla uprawnionych użytkowników oraz bezpiecznego i wolnego od zniekształceń przetwarzania danych;*

Biuro Dziekana
wpłynęło dnia 20.11.2023
RDJMe/296/511/2023
nr ..... zał. .....

- *zastosowanie metody harmonogramowania procesów produkcyjnych w oparciu o założenia Technologii Blockchain może wspomóc zarządzających planowaniem zadań w przedsiębiorstwie".*

W świetle przedstawionych uwarunkowań podjęty temat rozprawy doktorskiej uznaję za w pełni uzasadniony, gdyż jest on aktualny oraz ważny z poznawczego oraz utylitarnego punktu widzenia. Należy podkreślić, że menedżerowie oczekują na oferty skutecznych i kompleksowych metod pozyskiwania gotowych rozwiązań, które gwarantują automatyzację działań w zakresie harmonogramowania produkcji oraz zapewnienia bezpieczeństwa danych operacyjnych.

W rozdziale 2 - Analiza stanu wiedzy w obszarze inteligentnej produkcji, harmonogramowania procesów produkcyjnych i współdzielonych rejestrów danych (s.9 - s.22) pani mgr inż. Barbara Balon, bazując na analizie obszernej bibliografii wykazała, że:

- *„globalizacja wpływa na zasięg przedsiębiorstwa, niezależnie od sytuacji ekonomicznej, politycznej czy społecznej kraju, w którym działa firma;*
- *implementacja nowoczesnych technologii w procesy produkcyjne usprawnia wielozadaniowość przedsiębiorstw, a narzędzia Business Intelligence i systemy zarządzania przedsiębiorstwem integrują udostępnianie danych wewnętrznych z systemami wspomagającymi tę działalność;*
- *duża Ilość informacji związanych z procesami produkcyjnymi, które należy bezpiecznie przechowywać i przetwarzać oraz wielowątkowość zastosowań sprawia trudność zarządzania nimi z poziomu jednego, zintegrowanego narzędzia informatycznego;*
- *trzon współczesnego przemysłu stanowią systemy produkcyjne, które spełniają indywidualne oczekiwania i potrzeby klientów;*
- *rozproszone platformy cyfrowe są szansą na usprawnienie licznych problemów związanych z bezpieczeństwem danych;*
- *rozproszone sterowanie firmą oparte o nowe zasady, przyczynia się do wzrostu wydajności procesów produkcyjnych poprzez możliwość szybkiej modyfikacji operacji wytwórczych, udoskonalenia procesów i poprawy wskaźników efektywności".*

Następnie Autorka rozprawy przedstawiła główne czynniki cyfrowej transformacji, które warunkują konieczność synchronizacji współczesnego przemysłu z platformami cyfrowymi. Zaliczyła do nich:

- *„zaangażowanie klientów w proces wytwarzania;*
- *motywowanie pracowników i wspieranie ich działań;*
- *optymalizację realizowanych procesów;*
- *pracę w przestrzeni wirtualnej;*
- *chmurę danych sieć i fizycznych obiektów - Internet rzeczy (Internet of Things)".*

Blockchain będący łańcuchem bloków informacji, usprawnia obsługę zdecentralizowanych systemów mających możliwości wzajemnego uzupełniania się i integracji globalnych technologii produkcyjnych. System produkcyjny musi być reagować skutecznie na dynamicznie zmieniające się wymagania rynku w zakresie jakości, kosztów, niezawodności, elastyczności i popytu. W tym kontekście występuje koincydencja inteligentnego zarządzania produkcją i Technologii Blockchain. Doktorantka w kilku punktach przedstawiła korzyści wynikające z inteligentnego podejścia do zarządzania produkcją.

Główne trudności w integracji wynikają ze zróżnicowania baz danych pod względem odmiennych standardów i ochrony informacji w systemach technologicznych. Integracja technologii informacyjno-komunikacyjnych (ICT) umożliwia rozpowszechnianie informacji dotyczącej współdzielenia zasobów. Rozwój tej tendencji Autorka rozprawy ujęła w pięciu

fazach
z podaniem reprezentatywnych dla nich systemów (programów) komputerowych. Dotyczą one udostępniania:

1. *„zasobów wewnątrz linii produkcyjnych z uwzględnieniem komputerowego wspomagania wytwarzania;*
2. *zasobów wewnątrz jednego przedsiębiorstwa;*
3. *zasobów w ramach łańcuchów dostaw;*
4. *zasobów w obrębie całego sektora wytwórczego;*
5. *zasobów w całym społeczeństwie".*

W podsumowaniu stwierdziła, że: *„współdzielony rejestr danych ułatwia zarządzanie produkcją. Zasoby produkcyjne pozyskane z asortymentu partnerów konsorcjum usprawniają planowanie procesów produkcyjnych i ułożenie harmonogramów spełniających wymagane parametry. Harmonogramowanie wspomagane komputerowo pozwala na opracowanie wielu wariantów rozwiązań".*

W kolejnej części rozprawy Doktorantka omówiła wybrane zagadnienia harmonogramowania procesów produkcyjnych (p-kt 2.5). Właściwe uszeregowanie poziomów decyzyjnych sprzyja skutecznemu zarządzaniu i jednoznacznemu podziałowi zadań, a także znajdywaniu potencjalnych problemów wykonalności powierzonych pracownikowi obowiązków. Zwięźle scharakteryzowała planowanie strategiczne, planowanie taktyczne i operacyjne.

Natomiast w zakresie własnych opracowań mgr inż. B. Balon skupiła się na operacyjnym planowaniu zasobów ludzkich i maszynowych z uwzględnieniem Technologii Blockchain. Procesy harmonogramowania produkcji z użyciem zasobów produkcyjnych pozyskanych ze współdzielonego rejestru danych pozwalają na automatyzację przydzielania zasobów do zadań i usprawniają procesy decyzyjne na etapie realizacji planów produkcyjnych.

Poziomy decyzyjne z uwzględnieniem przepływu informacji w sterowaniu procesami produkcji i zakresu rozprawy zostały przedstawione na rys 1. Jest to w pełni realne podejście w odniesieniu do sformułowanego tematu rozprawy doktorskiej, gdyż *„harmonogramowanie procesów produkcyjnych to działania wieloetapowe, które łączą zagadnienia planowania i sterowania procesami wytwórczymi".*

Wdrożenie komputerowego wspomagania do harmonogramowania operacji produkcyjnych z uwzględnieniem większej ilości danych umożliwia szybsze znalezienie rozwiązania, które może być wdrożone. Odwołując się do analizowanych publikacji Doktorantka trafnie wskazuje, że systemy wspomagania komputerowego umożliwiają:

- *„płynne reagowanie na wprowadzane modyfikacje;*
- *sprawną ocenę szukanych rozwiązań;*
- *analizę zdolności i przepustowości linii produkcyjnych;*
- *interakcję z interfejsem użytkownika;*
- *poprawność działania w czasie rzeczywistym i koordynację z pozostałymi systemami funkcjonującymi w przedsiębiorstwie".*

Te korzystne efekty może zapewnić integracja systemu do harmonogramowania produkcji z Technologią Blockchain. Powiązania dla wymiany danych produkcyjnych w środowiskach zintegrowanych komputerowo zostały przedstawione na rys.2.

W rozdziale 3 - Technologia Blockchain (s.23 - s.50) Doktorantka podała definicję blockchain, genezę powstania technologii oraz główne zagadnienia związane z funkcjonowaniem architektury Technologii Blockchain. Dla zastosowań w warunkach produkcyjnych znajdują zastosowanie systemy informatyczne o różnej konfiguracji, tj.: sieci

scentralizowane (rys.3a), sieci zdecentralizowane (rys.3b) i sieci rozproszone (rys.3c). W szczególności dynamicznie jest rozwijana koncepcja sieci Internetu rzeczy (rys.8), która integruje środowisko IT (Internet, dane w chmurze, komputery, urządzenia sieciowe, symulacje, śledzenie operacji produkcyjnych, uczenie maszynowe, rozbudowanie dotychczas stosowanych narzędzi analitycznych) z rzeczywistym środowiskiem produkcyjnym, obejmującym zarządzanie zapasami, magazynowanie, transport produktów, planowanie produkcji i inne jego obszary. Komponenty zawarte w Internecie rzeczy działają w wielu zakresach, które obejmują warstwy:

- aplikacji – transport, finanse i ubezpieczenia;
- zarządzania – przetwarzanie danych, analityka, zarządzanie bezpieczeństwem danych;
- sieci PAN, LAN, WAN oraz rutery;
- urządzenia – czujniki, akumulatory, inteligentne urządzenia, przetworniki, akumulatory, czujniki, smartfony, układy RFID;
- obiekty fizyczne – ludzie, samochody, domy, fabryki, pociągi, czyli to wszystko, co wymaga monitorowania i kontroli.

Technologię Blockchain stosuje się do budowy interoperacyjnych rozwiązań dla przedsiębiorstw i współpracujących z nimi ośrodków badawczych, biznesowych i społecznych. Szczególne zastosowanie znajdują sieci komputerowe w przetwarzaniu danych w systemach rozproszonych (rys.9 rys.11), w których przepływ informacji jest podzielony na kilka systemów obliczeniowych, komunikujących się za pomocą wybranego komunikatora. Przykłady zastosowania blockchain w różnych obszarach zostały zestawione w tabeli 1.

W świetle analizy dokonanej przez Autorkę rozprawy jednym z kluczowych elementów uzasadniającym użycie Technologii Blockchain w inżynierii produkcji jest bezpieczeństwo archiwizowanych i przesyłanych danych w sieci. Procedury zapewniające wysoki poziom bezpieczeństwa transakcji dotyczą:

- ochrony przed penetracją;
- minimalnych uprawnień dających niskopoziomowy dostęp do danych;
- zarządzania ryzykiem, gdyż umożliwiają kontrolowanie ryzyka w sieci i dokonywanie poprawek poprzez naprawę wadliwych kodów.

Analizując potencjalne zastosowania Technologii Blockchain w produkcji Doktorantka podała korzyści a także i ograniczenia, które mogą wystąpić przy jej implementacji.

Podsumowując analizę dotychczasowego stanu zaawansowania rozwiązań i zastosowań Technologii Blockchain na podstawie dostępnych informacji zawartych w publikacjach stwierdzam, że została ona dokonana w sposób w pełni profesjonalny. Szeroki zakres cytowanej literatury, przejrzystość, zwięzłość, bardzo staranna redakcja i przedstawienie własnych komentarzy oceniam jako wzorcowe.

Rozdział 4 - Cel i zakres rozprawy (s.51-s.53) zawiera sprecyzowane, szczegółowe zadania do rozwiązania i zakładane cele utylitarne. Za istotne uznaję sformułowanie przez Autorkę rozprawy możliwych do osiągnięcia, oryginalnych rozwiązań w porównaniu do przedstawianych w literaturze w zakresie zarządzania zasobami ludzkimi i harmonogramowania produkcji. Są to:

- *„model procesu harmonogramowania produkcji i zarządzania zasobami ludzkimi z implementacją Technologii Blockchain dla rzeczywistych i wirtualnych przedsiębiorstw;*
- *metoda oceny zasobu (pracownika, maszyny lub innego zasobu) oparta na historii pracy zasobu i określeniu jego aktualnej przydatności w ramach poszczególnych kompetencji;*
- *zastosowanie blockchain open-source do poszukiwania pracownika z konkretnymi kompetencjami;*

- *opracowanie sieci synchronizującej możliwości Technologii Blockchain z systemem KbRS (Knowledge based Rescheduling System), w obszarze gromadzenia i ochrony danych oraz zarządzania nimi w sposób bezpieczny i odporny na cyberataki. Funkcjonalność programu do harmonogramowania KbRS jest rozszerzona o możliwości operowania danymi w Technologii Blockchain".*

Sformułowany cel i zakres pracy nie budzą zastrzeżeń.

W rozdziae 5 - Model procesu harmonogramowania z użyciem współdzielonego rejestru zasobów produkcyjnych zorganizowanego według założeń Technologii Blockchain (s.54 - s.90) mgr inż. B. Balon zaprezentowała koncepcję współdzielonego rejestru zasobów produkcyjnych, bazującą na sieci korporacyjnej. Szczegółowo przedstawiła model środowiska produkcyjnego oraz architekturę współdzielonego rejestru zasobów w dwóch rozwiązaniach z przykładami liczbowymi i eksperymentami badawczymi.

Do generowania harmonogramów Doktorantka wybrała system - wersja KbRS 2023 *(Knowledge based Rescheduling System)* ze względu na jego możliwości, w zakresie:

- współpracy systemu z planistami za pośrednictwem Internetu;
- implementacji i wymiany wyników do wymaganych w architekturze blockchain formatów plików (np. XML, xls, JSON);
- integracji z wybranym oprogramowaniem zewnętrznym (klasy ERP, MES itp.);
- implementacji w środowiskach produkcyjnych.

Po szczegółowej analizie tego systemu Autorka rozprawy podjęła modyfikację istniejących funkcji w celu realizacji przyjętego programu badawczego. Opracowała odpowiedni model dla problemu harmonogramowania z użyciem współdzielonych zasobów pozyskanych ze wspólnej bazy danych zorganizowanej w blockchain. Zasoby te realizują zadania zgodnie z posiadanymi kompetencjami (zasoby ludzkie) lub przynależnością do grup zasobowych (zasoby maszynowe). Ogólne zależności przedstawiła we wzorach 1 - 4). Przyjęty model umożliwia prowadzenie badań dla większości przypadków występujących w wirtualnych systemach produkcyjnych.

Wybór Technologii Blockchain do opracowania współdzielonych rejestrów danych produkcyjnych również został poprzedzony analizą, w wyniki której której Doktorantka wzięła pod uwagę:

- zdecentralizowaną sieć komputerową, która nie posiada centralnej jednostki zarządzającej bazą danych i składa się z łańcucha bloków (schemat sieci - rys. 13);
- prowadzenie rozproszonego wspólnego i zbiorczego rejestru rekordów danych w postaci cyfrowej, które są sukcesywnie ogłaszane w sieci po równo dla każdego odbiorcy, zgodnie z ich dostępem;
- globalną księgę danych, w której przechowywane są wszystkie raz zamieszczone rekordy. Rekordy te (transakcje) posiadają znacznik czasu, hash kryptograficzny i są łączone w liniową strukturę bloków, w której każdy kolejny rekord odnosi się do hash'a poprzedniego bloku (drzewo Merkle opracowane do oceny kompetencji pracowników - rys.14);
- nieodwracalny charakter transakcji blockchain i odporność na cyberataki.

Następnie została wyczerpująco przedstawiona w rozprawie metodyka budowy sieci blockchain dla przykładu produkcyjnego. Kolejne jej etapy zostały jednoznacznie scharakteryzowane oraz zilustrowane graficznie na rysunkach prezentujących:

- przetarg nieograniczony na wykonanie zlecenia produkcyjnego z zastosowaniem blockchain w ramach konsorcjum (rys.15);
- odpowiedzi na przetarg ze wstępnymi warunkami umowy (rys.16);

- generowanie zleceń do firm w wirtualnym przedsiębiorstwie według zasady najwyższych kompetencji z użyciem konsorcjum (rys.17);
- blockchain do reagowania na kolejne zlecenia dla pracowników i budowania konsensusu (rys.18);
- procedury składania i weryfikacji podpisów w odpowiedzi na pytanie dotyczące dyspozycyjności pracownika posiadającego poszukiwane kompetencje (rys.19);
- proces obiegu danych zawierających informacje o kompetencjach pracowników w Technologii Blockchain (rys.20);
- proces zbierania danych o kompetencjach pracowników w sieci blokowej (rys.21);
- procesu harmonogramowania produkcji w ramach konsorcjum, z zastosowaniem Technologii Blockchain do obsługi zasobów przy harmonogramowaniu w przedsiębiorstwach sieci korporacyjnej (rys.23);
- schemat działania Technologii Blockchain w analizowanym przykładzie, ogłoszenia wolnych zasobów, wyszukiwania wolnych zasobów (rys.24);
- obieg informacji o udostępnianiu wolnych zasobów lub przeszukiwaniu bazy wspólnych rejestrów pod kątem ich przydatności (rys.25).

Podsumowując krótko tę część rozprawy Doktorantka stwierdza, że *„...platforma wymiany informacji staje się po pewnym czasie optymalnym systemem rozproszonym..."*

Pytanie: w jakim znaczeniu będzie to system optymalny, jeśli *„...użytkownicy mogą dodawać własne segmenty danych do systemu i rozbudowywać istniejące węzły..."*, to czy każdy z dodanych elementów będzie optymalny, a wynik będący sumą również będzie optymalny, czy może będzie to rozwiązanie kompromisowe?

W kolejnym etapie mgr inż. B. Balon przedstawiła założenia badawcze dla doboru zasobów ludzkich o wymaganych kompetencjach. Główne założenia to:

- operacja może wymagać zarezerwowania więcej niż jednego zasobu, np. grup pracowników, kilku maszyn;
- operacja może wymagać rezerwacji zasobów o różnych cechach (maszyna + narzędzia + pracownicy o różnych kompetencjach).

W metodzie oceny zasobów (wzór 6) jest ujęty współczynnik wartości pracownika w danej kompetencji. W wyjaśnieniu jest podane, że ocena wartości kompetencji pracowników w czasie t_n oparta jest na danych historycznych z ustalonego przedziału $<T_1, T_2>$ i uwzględnia czas, jaki upłynął od czynności wykonywanych w ramach tej kompetencji.

Pytanie dyskusyjne: oceny dokonuje planista, a czy są też kryteria ustalane do wyboru planisty, czy podstawą jest wyłącznie zaufanie, że zrobi to dobrze?

Następnym etapem przedstawionym w rozprawie jest określenie modelu współdzielonego rejestru zasobów maszynowych. Algorytm przydzielania zadań do zasobów maszynowych musi spełniać cztery główne warunki dotyczące:

- jakości produktów wykonywanych na maszynie;
- niezawodności (maszyna w drugiej fazie cyklu życia);
- kosztu outsourcingu;
- efektywności dla planowanego horyzontu czasu pracy.

W zaproponowanym algorytmie planowania produkcji przyjęte zostały główne założenia, że:

- operacja wymaga zarezerwowania więcej niż jednego zasobu;
- operacja wymaga rezerwacji pracownika o różnym doświadczeniu i kompetencjach;

- operacja wymaga rezerwacji maszyny wraz ze specyfikacją (typ maszyny + charakterystyki niezawodnościowe maszyny + narzędzia + odległość między firmami, koszt wynajmu maszyny lub koszt wykonania operacji);
- operacja musi być wykonana w celu osiągnięcia najlepszych wskaźników wydajności.

Pytanie: czy w założeniach należałoby uwzględnić również wskaźniki i kryteria jakości produktu, czy też nie ma takiej potrzeby?
Wprawdzie na str.88 pisze Pani, że *„Sieć pod kątem najlepszych parametrów jakości maszyn oferowanych przez usługodawców jest przeszukana w celu zapewnienia jak najlepszej jakości produktu"*, ale wg mnie nie musi to być równoznaczne z zapewnieniem „najlepszej" jakości, jeśli brak jest sformułowanego kryterium.

Dla zilustrowania działania przedstawionej w rozprawie procedury Doktorantka przedstawiła numeryczny przykład doboru zasobu do wykonania operacji, wymagający kompetencji C_1, na okres 15-17 jednostek czasu ustalonym na 12 terminie podjęcia decyzji. Do analiz i weryfikacji przyjętych założeń zastosowała autorskie oprogramowanie, oparte na projekcie (SomayyehGholami/Implementing-Smart-Blockchain 2021) w zakresie komunikacji i obsługi łańcuchów bloków w sieci korporacyjnej oraz program *Knowledge based Rescheduling System* (wersja KbRS 2023) do szeregowania i przygotowywania informacji do kodowania blokowego.

Dobór zasobu do operacji w okresie od 15 do 17 jednostki czasu został zilustrowany na rys.27, wyniki wartości kompetencji dla zasobów M_1-M_5 zostały przedstawione w tab.6 oraz kalkulacja wartości zasobów w tab.7. W każdym przypadku decyzyjnym wartości wag mogą być inne. Przyjętym kryterium była minimalna wartość oceny.

Po rezerwacji pierwszego zasobu następuje utworzenie kolejnego bloku w zasobie blockchain, a po wykonaniu zadań zaplanowanych w harmonogramie rejestry zasobów są aktualizowane o bieżącą ocenę ich pracy. **Przedstawiony przykład wskazuje na poprawne działanie systemu zaproponowanego przez Autorkę rozprawy.**

Rozdział 6 - Porównanie proponowanego podejścia do harmonogramowania z tradycyjnym (s.91 - s.97). W tradycyjnym podejściu przy poszukiwaniu zasobów w pierwszej kolejności brane są pod uwagę zasoby własne. Podejście blockchain znacząco upraszcza czynności sekwencjonowania i harmonogramowania, a selekcja jest dokonywana na szerszym zbiorze zasobów. Tradycyjne i oparte na Technologii Blockchain podejścia do selekcji zasobów zostało przedstawione na rys.28. Szybsze i efektywniejsze planowanie jest możliwe dzięki wyeliminowaniu kanałów pośredniczących w przepływie transakcji danych. Porównanie przepływu informacji o zadaniach produkcyjnych i kompetencjach pracowników w systemie tradycyjnym i blockchain Doktorantka zestawiła w tab. 9.

Rozdział 7 - Internetowa platforma współdzielenia zasobów produkcyjnych (s.98 - s.104) zawiera opis struktury symulatora będącego autorską aplikacją Doktorantki. Ważną, funkcjonalną stroną aplikacji jest możliwość przeszukiwania bazy danych w zakresie zasobów ludzkich o sprecyzowanych kompetencjach i na tej podstawie sprawdzenie własnych możliwości produkcyjnych lub zapotrzebowań zawartych w harmonogramach produkcji.

W zaproponowanej wersji blockchain jest zapisana także historia działań wszystkich pracowników, poziom wykonywanych przez nich usług i posiadanych przez nich kompetencje. Sieć przeszukuje wprowadzone zapytanie poprzez skanowanie zawartych w niej danych i wydobywa jedynie pasujące zasoby. Natomiast na czas wykonywania zleceń zasoby ludzkie - pracownicy są niedostępne. Po wykonaniu zleconych zadań pracownicy wzbogaceni o ocenę swojej pracy są ponownie aktywni w bazie. Proces odbywa się również w drugą stronę, jeśli przedsiębiorstwo chce udostępnić wolny zasób.

W opracowanej przez Doktorantkę aplikacji do oceny produktywności stosuje się kryterium maksymalnego wykorzystania istniejących zasobów ludzkich przedsiębiorstw w sieci blockchain. Dodatkowo brane są także pod uwagę kryteria czasowe, tj. szybkość wykonania zadań, jak również opóźnienie ich realizacji. Schemat współpracy aplikacji internetowej z programem KbRS został przedstawiony na rys.30. Aplikacja obsługuje pięć kluczowych elementów systemu poszukiwania lub ogłaszania zasobów produkcyjnych (rys.32 - rys.36). Szczegółowy opis działania systemu został przedstawiony w rozprawie.

W rozdziale 8 - Przykład harmonogramowania produkcji w sieci korporacyjnej z zastosowaniem blockchain (s.105 - s.118) został zaprezentowany sposób rezerwacji i oceny zasobów według opracowanej metody. Wymiana danych o zasobach współdzielonych za pomocą blockchain jest realizowana w sieci korporacyjnej. Obliczenia zostały wykonane przy użyciu programu w wersji KbRS 2023 (okno ustawień generatora danych - rys.37).

Zestawienia dotyczące stanowisk, pracowników i ich kompetencji, czasy trwania operacji i wymagania zasobowe, zestawienia zleceń w poszczególnych przedsiębiorstwach, współczynniki wartości okresu pracy i oceny cząstkowe dla każdego z okresów, wartości oceny dla zasobów współdzielonych, zestawienie pracowników i ich kompetencji w wybranym przedsiębiorstwie zostały zestawione odpowiednio w tab.11 - tab.22.

Wykres Gantta (rys. 38) przedstawia operacje w ramach poszczególnych zleceń przydzielonych do stanowisk i pracowników. Rys.39 - rys.44 oraz rys.46 - rys.46 - rys.48 zawierają zestawienia (okna programu) informacji niezbędnych do wykonania obliczeń i analiz, na rys.45 został przedstawiony harmonogram wyznaczony w przedsiębiorstwie 2 z uwzględnieniem rezerwacji odczytanych z blockchain oraz na rys.49 harmonogram realizacji zleceń w przedsiębiorstwie 3.

Analiza przedstawionych wyników na przykładzie wirtualnego przedsiębiorstwa jest podstawą do pozytywnej opinii o zaproponowanej przez mgr inż. B. Balon aplikacji do harmonogramowania produkcji z zastosowaniem blockchain.

W rozdział 9 - Wnioski (s.119 - s.123) Autorka rozprawy, zwięźle i rzeczowo scharakteryzowała opracowaną metodę i korzyści, które można osiągnąć z jej wdrażania w przemyśle.

Potwierdziła, że: *„... opracowane algorytmy efektywnego przydziału zasobów do zadań z uwzględnieniem historycznych informacji o pracy zasobów, niezawodności i informacji o planowanej dostępności zasobów pozwoliły na weryfikację założeń rozprawy doktorskiej poprzez sprawdzenie poprawności opracowanych modeli na przykładach współdzielenia zasobów produkcyjnych w przedsiębiorstwach wirtualnych...”.*

Sformułowane wnioski wraz z komentarzami są w pełni odzwierciedleniem wykonanych przez Doktorantkę analiz i badań weryfikacyjnych.

W rozdział 10 - Podsumowanie i kierunki dalszych prac badawczych (s.124 - s.127) Doktorantka przedstawia możliwości i korzyści, które można osiągnąć w wyniku rozwoju i udoskonalania podjętych badań naukowych nad zastosowaniem metody blockchain.

Nowoczesne podejście do zarządzania zasobami produkcyjnymi przy zachowaniu standardów cyberbezpieczeństwa, znaczenia Big Data i potrzeba gromadzenia danych przy interdyscyplinarności procesów produkcyjnych w przestrzeni wirtualnej, automatycznej wymiany danych oraz połączenia przestrzeni cyfrowej z rzeczywistymi procesami produkcyjnymi, to główne atuty opracowań proponowanych przez Autorkę rozprawy.

Należy też podkreślić, że jest to jedna z pierwszych prac, integrujących planowanie produkcji oraz zarządzanie zasobami ludzkimi i maszynowymi z zastosowaniem Technologii Blockchain. Autorski model harmonogramowania procesów produkcyjnych z zastosowaniem współdzielonego rejestru zasobów zorganizowanego w oparciu o założenia Technologii Blockchain i utworzenie prototypowej, internetowej platformy wymiany danych

produkcyjnych są oryginalnymi, innowacyjnymi rozwiązaniami opracowanymi przez mgr inż. Barbarę Balon.

2. Ocena metodologicznej i metodycznej koncepcji rozprawy doktorskiej

Na podstawie przedstawionej analizy rozprawy doktorskiej, sformułowania zakresu i procedury rozwiązywania zaproponowanych zadań badawczych, **metodologiczną**

i metodyczną koncepcję rozprawy doktorskiej oceniam jednoznacznie pozytywnie. Mgr inż. Barbara Balon przedstawiła spójną merytorycznie analizę stanu wiedzy z zakresu zagadnień, które dotyczą organizacji i zarządzania systemami produkcyjnymi. Wykazała, że dysponuje bardzo dobrze opanowaną wiedzą logiczno-matematyczną i informatyczną, niezbędną do rozwiązywania złożonych problemów technicznych oraz do prowadzenia badań i merytorycznej analizy uzyskanych wyników. **Na podkreślenie zasługuje również bardzo staranne opracowanie redakcyjne pracy pod względem językowym i edytorskim.**

3. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do dynamicznie rozwijającego się ważnego obszaru badawczego, związanego z zarządzaniem systemami produkcyjnymi (przemysł 4.0, a także już sygnalizowany przemysł 5.0). **Rozprawa doktorska, należy do dyscypliny inżynieria mechaniczna. Zawiera oryginalne cechy nowości, a także potwierdzone częściowo znaczące walory utylitarne. Uzyskane wyniki wydatnie poszerzają wiedzę w zakresie możliwości rozwoju i prowadzenia modelowych badań systemów produkcyjnych z zastosowaniem technologii informacyjnych oraz metod sztucznej inteligencji.**

W mojej ocenie rozprawa doktorska pani mgr inż. Barbary Balon w pełni zasługuje na wyróżnienie.

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Barbary Balon pt.: „Harmonogramowanie procesów produkcyjnych z zastosowaniem współdzielonego rejestru zasobów zorganizowanego w oparciu o założenia Technologii Blockchain" spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki *(ustawa z dnia 14 marca 2003 r. wraz z późniejszymi zmianami,* a także *ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art.185.)* **i wnoszę o dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony.**

Kraków, dnia 10 listopada 2023 r.

Józef Gawlik