

Wniosek o przeprowadzenie postępowania
w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego
Załącznik 3

dr inż. Krzysztof Żywicki
Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej

AUTOREFERAT

Poznań, marzec 2025

Spis treści

Dane personalne.....	4
Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	4
Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu.....	4
Osiągnięcia naukowe stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego.....	5
1. Model sterowania przepływem produkcji z zastosowaniem koncepcji cyfrowego bliźniaka	6
1.1. Informacje ogólne	6
1.2. Przesłanki i cel realizacji projektu	6
1.3. Charakterystyka autorskiego modelu sterowania przepływem produkcji	8
1.3.1. Cyfrowy bliźniak procesu produkcyjnego	11
1.3.2. Wariantowanie procesów technologicznych	14
1.3.3. Wariantowanie harmonogramu produkcji	16
1.3.4. Wielokryterialne wspomaganie decyzji w harmonogramowaniu produkcji	21
1.3.5. Wspomaganie eksperckie w harmonogramowaniu produkcji	23
1.3.6. Prognozowanie i korygowanie przepływu produkcji.....	24
1.3.7. Analiza danych o procesach wytwarzania	26
1.4. System informatyczny Digitio Factory	27
1.5. Wdrożenie systemu Digitio Factory w przedsiębiorstwie Bluebird Design	41
1.6. Podsumowanie	43
2. Reguły wyboru metod sterowania przepływem produkcji z uwzględnieniem popytu oraz struktury wytworów i procesów technologicznych.....	45
2.1. Wprowadzenie	45
2.2. Analiza relacji determinantów procesów produkcyjnych oraz metod sterowania przepływem produkcji.....	47
2.3. Projekt Opracowanie i wdrożenie systemu organizacyjnego produkcji w nowym zakładzie produkcyjnym	60
2.3.1. Cel i zakres projektu.....	60
2.3.2. Analiza przepływu materiałów i informacji w systemie produkcyjnym	60
2.3.3. Opracowanie nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji	69
2.3.4. Efekty wdrożenia nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji	78
2.3.5. Wnioski	83
2.4. Projekt: Opracowanie i wdrożenie systemu sterowania produkcją wielowariantową	83
2.4.1. Cel i zakres projektu.....	83
2.4.2. Analiza przepływu materiałów i informacji w systemie produkcyjnym	84
2.4.3. Analiza przepływu materiałów i informacji w systemie produkcyjnym	89
2.4.4. Opracowanie nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji	96
2.4.5. Efekty wdrożenia nowych metod sterowania przepływem produkcji	102
2.4.6. Wnioski	108
3. Metody i narzędzia analizy determinantów efektywnego sterowania przepływem produkcji	109
3.1. Wprowadzenie	109
3.2. Wykaz powiązanych tematycznie artykułów	110
3.3. Wpływ specjalizacji stanowisk produkcyjnych na efektywność procesu produkcji	113

3.4.	Kalkulacja normatywów czasu realizacji operacji technologicznych	118
3.5.	Integracja technicznego przygotowania produkcji i sterowania przepływem produkcji	122
3.6.	Zapewnienie dostępności materiałów do realizacji procesów produkcyjnych	125
3.7.	Szacowanie strat materiału w procesie technologicznym	130
3.8.	Podsumowanie	134
4.	Wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna	136
	Informacje o aktywności naukowej.....	137
	Osiągnięcia dydaktyczne i organizacyjne.....	138

Dane personalne

Krzysztof Żywicki

Aktualne miejsce zatrudnienia

Politechnika Poznańska

Instytut Technologii Materiałów

Zakład Inżynierii Produkcji

Zajmowane stanowisko

adiunkt badawczo-dydaktyczny

e-mail: krzysztof.zywicki@put.poznan.pl

Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

2009 – doktor nauk technicznych

Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania

Dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn

Tytuł rozprawy doktorskiej: Zastosowanie metody powierzchni elementarnych do wariantowania operacji technologicznych

Promotor: dr hab. inż. Edward Pająk, prof. PP

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Jan Żurek

prof. dr hab. inż. Józef Gawlik

2001 – magister inżynier

Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania

Kierunek: Mechanika i budowa maszyn

Specjalność: Systemy produkcyjne

Promotor: dr hab. inż. Edward Pająk

Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2020 - obecnie	Politechnika Poznańska Wydział Inżynierii Mechanicznej Instytut Technologii Materiałów Zakład Inżynierii Produkcji adiunkt
2012-2020	Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania Katedra Inżynierii Produkcji adiunkt
2009-2012	Politechnika Poznańska, Budowy Maszyn i Zarządzania Instytut Technologii Mechanicznej Zakład zarządzania produkcją adiunkt

2004-2009	Politechnika Poznańska, Budowy Maszyn i Zarządzania, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Zarządzania i Inżynierii jakości – asystent, Zakład Projektowania Technologii - asystent
-----------	--

Zajmowane stanowiska

2024-obecnie	Zastępca Dyrektora Instytutu Technologii Materiałów ds. dydaktyki
2020-2024	Zastępca Dyrektora Instytutu Technologii Materiałów ds. nauki
2019	Zastępca Dyrektora Instytutu Technologii Materiałów ds. nauki

OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE STANOWIĄCE PODSTAWĘ POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO

Jako osiągnięcia naukowe stanowiące znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna wskazuje się:

- Model sterowania przepływem produkcji z zastosowaniem koncepcji cyfrowego bliźniaka – osiągnięcie projektowe,
- Reguły wyboru metod sterowania przepływem produkcji z uwzględnieniem popytu oraz struktury wyrobów i procesów technologicznych – osiągnięcie projektowe,
- Metody i narzędzia analizy determinantów efektywnego sterowania przepływem produkcji – cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych,

pod zbiorczym tytułem:

Badanie i rozwój modeli oraz metod sterowania przepływem produkcji zorientowanych na poprawę efektywności systemów produkcyjnych

Wskazane osiągnięcia naukowe dotyczą obszaru inżynierii produkcji, która do roku 2018 (reforma nauki i szkolnictwa wyższego) stanowiła odrębną dyscyplinę naukową.

1. Model sterowania przepływem produkcji z zastosowaniem koncepcji cyfrowego bliźniaka

1.1. Informacje ogólne

Osiągnięcie naukowe zrealizowane w ramach projektu: Opracowanie systemu informatycznego do aktywnego sterowania produkcją z zastosowaniem koncepcji Digital Twins, finansowanego z programu „Szybka ścieżka” przez narodowe Centrum Badań i Rozwoju (POIR.01.01.01-00-0352/21-00).

Projekt realizowany przez konsorcjum:

- Politechnika Poznańska
- HIT Kody Kreskowe sp.j.

Rola habilitanta w projekcie:

- Kierownik B+R,
- Wkład własny: Jestem głównym pomysłodawcą projektu. W ramach realizowanych prac badawczych opracowałem: model sterowania przepływem produkcji, model struktury danych do opracowania cyfrowego bliźniaka procesu produkcyjnego, model harmonogramowania produkcji, model analizy wielokryterialnej w harmonogramowaniu produkcji, zasady i metody harmonogramowania produkcji, model prognozowania realizacji zleceń produkcyjnych, zasady sterowania przepływem materiałów, metody i narzędzia analizy danych produkcyjnych. Jestem autorem głównych funkcji systemu informatycznego, struktury baz danych i architektury systemu informatycznego. Opracowałem plan testów i weryfikacji modelu i systemu informatycznego.

Wdrożenie rozwiązania:

- wykonany system informatyczny stanowi ofertę produktową przedsiębiorstwa HIT-Kody kreskowe sp.j.
- wdrożenie systemu informatycznego w przedsiębiorstwie HIT-Kody kreskowe sp.j. w dziale drukarni,
- wdrożenie w przedsiębiorstwie Bluebird Design,
- pilotażowe testy wdrożeniowe w przedsiębiorstwie Kiel Polska sp. z o.o.

1.2. Przesłanki i cel realizacji projektu

Zmieniające się uwarunkowania funkcjonowania przedsiębiorstw produkcyjnych wymuszają na nich poszukiwanie rozwiązań pozwalających zwiększyć ich konkurencyjność i produktywność. Zmiana uwarunkowań jest zauważalna przede wszystkim w preferencjach klientów dotyczących kustomizacji i personalizacji wyrobów. Wpływa ona na zmniejszające się wielkości zamówień.

Przejawem dostosowywania się przedsiębiorstw do tych zmian są inwestycje w maszyny i urządzenia, przede wszystkim w zakresie automatyki oraz robotyki, umożliwiające wytwarzanie wielu wariantów wyrobów. Ich stosowanie generuje

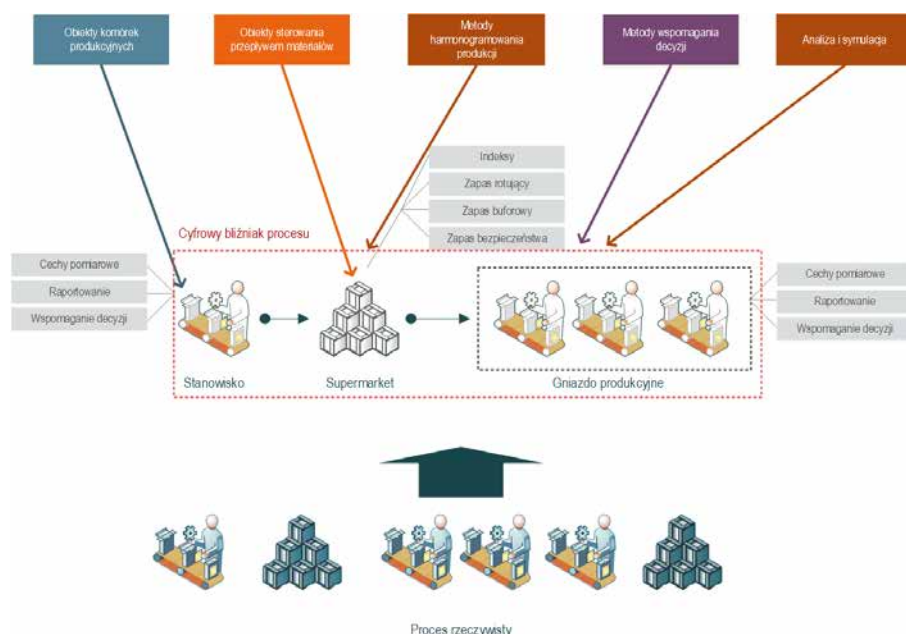
powstawanie coraz większej liczby danych, które należy brać pod uwagę podczas organizacji, planowania i sterowania produkcją. Duża liczba zleceń produkcyjnych, wymaga uwzględnienia wielu procesów technologicznych, różnicowania normatywnych czasów ich realizacji, synchronizacji procesów: wytwarzania, logistycznych, magazynowych czy związanych z obsługą eksploatacyjną maszyn i urządzeń. Podejmowanie decyzji operacyjnych jest w związku z tym obarczone dużą niepewnością co do ich skuteczności.

Wymienione czynniki sprawiają, że konieczne jest wdrażanie rozwiązań informatycznych zapewniających przepływ informacji umożliwiających sprawny przepływ materiałów w systemie produkcyjnym.

Podstawowymi, szeroko stosowanymi rozwiązaniami informatycznymi wspomagającymi sterowanie przepływem produkcji są systemy klasy Manufacturing Execution System (MES) i Advanced Planning System (APS). Niestety, w wielu przypadkach, liczba i zmienność czynników związanych z realizacją procesów produkcyjnych sprawiają, że obecne na rynku systemy informatyczne coraz częściej nie spełniają swojej roli. Nie zawierają np. algorytmów decyzyjnych pozwalających na przeprowadzenia predykcji np. w zakresie możliwych zmian w harmonogramie produkcji (np. alternatywnych przebiegów produkcji) lub zależności pomiędzy czynnikami wejściowymi procesów a ich wynikami, (np. wpływ zmiennych parametrów pracy maszyn na jakość wyrobów i terminowość realizacji zleceń). Dlatego w przedsiębiorstwach często wdrażanych jest kilka rozwiązań informatycznych, wzajemnie się uzupełniających. Takie podejście, powoduje jednak występowanie problemów w przepływie informacji, a tym samym wpływa negatywnie na skuteczność podejmowanych decyzji.

Celem projektu było zaprojektowanie i wykonanie systemu informatycznego umożliwiającego sterowanie przepływem produkcji poprzez elastyczne harmonogramowanie produkcji oraz bieżące monitorowanie parametrów przepływu materiałów, ich analizę oraz podejmowanie decyzji operacyjnych z zastosowaniem metod symulacyjnych oraz wspomagania decyzji.

Innowacyjność proponowanych w systemie rozwiązań polega na zastosowaniu koncepcji cyfrowego bliźniaka (ang, Digital Twin), będącego odwzorowaniem cyfrowym rzeczywistego procesu produkcyjnego (rys. 1.2.1).



Rys. 1.2.1. Założenia koncepcji cyfrowego bliźniaka

Funkcjonalność cyfrowego bliźniaka umożliwia efektywne sterowanie przepływem produkcji poprzez przewidywanie i reagowanie na zakłócenia w realizacji procesu produkcyjnego. W wyniku wsparcia cyfrowego bliźniaka zaawansowanymi metodami wspomagania decyzji możliwe jest na podstawie danych rzeczywistych odwzorowanie procesu oraz analizowanie skutków różnych decyzji operacyjnych.

Główne etapy planu realizacji projektu dotyczyły opracowania modelu sterowania przepływem produkcji, projektu architektury systemu informatycznego, jego wykonania i weryfikacji.

1.3. Charakterystyka autorskiego modelu sterowania przepływem produkcji

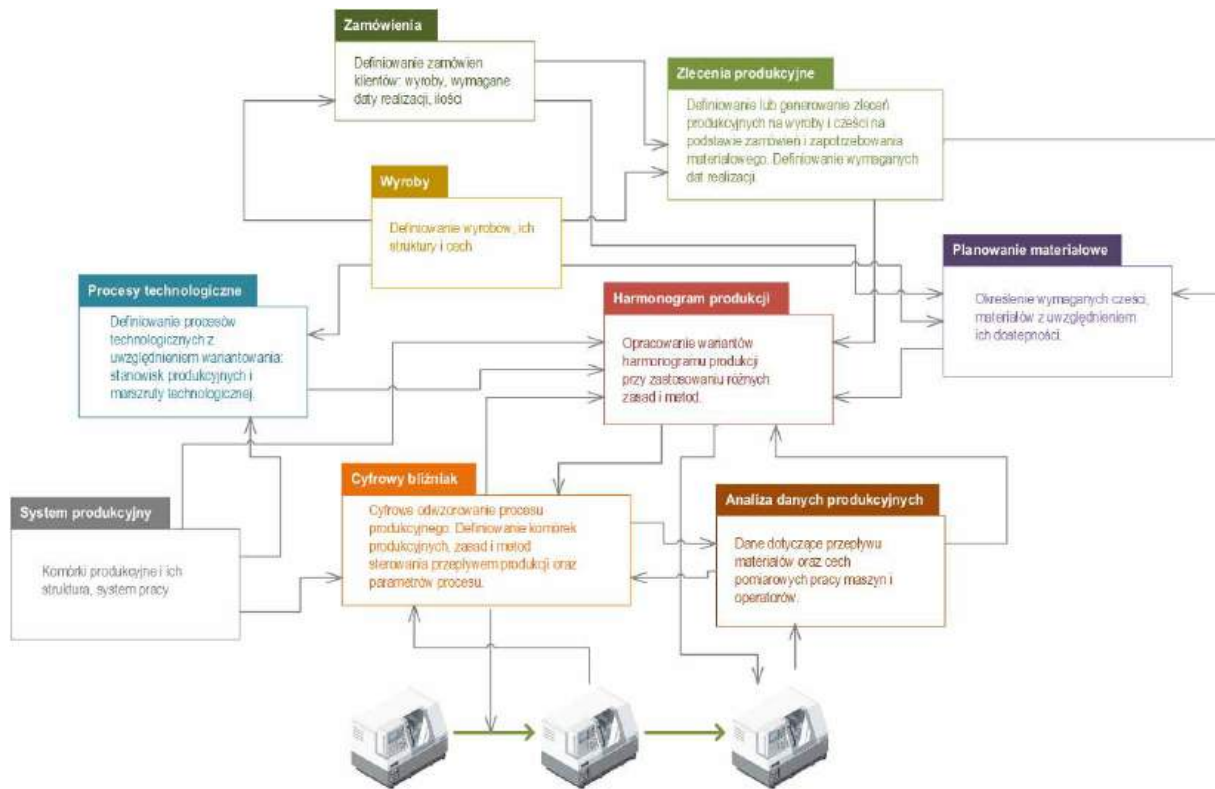
Model obejmuje obszary decyzyjne, grupujące funkcje dotyczące realizacji zadań wspomagających sterowanie przepływem produkcji. Jego elementy i atrybuty nie są dedykowane dla konkretnego procesu produkcyjnego i mają charakter uniwersalny i są konfigurowalne uwzględniając specyfikę procesu.

Podstawowym elementem modelu jest cyfrowe odwzorowanie rzeczywistych procesów produkcyjnych – definiowanie cyfrowego bliźniaka procesu. Zdefiniowane komórki produkcyjne i ich struktura, zasady sterowania przepływem produkcji oraz ich atrybuty pozwalają na realizację funkcji przez pozostałe obszary modelu. Bieżące monitorowanie parametrów przepływu materiałów oraz wyrobów oraz ich analiza, umożliwiają harmonogramowanie produkcji. Metody analiz i wspomagania decyzji pozwalają na dostosowywanie parametrów przepływu produkcji do zmieniających się czynników wewnętrznych i zewnętrznych.

Głównymi obszarami decyzyjnymi obszarami decyzyjnymi modelu są:

- definiowanie cyfrowego bliźniaka procesu produkcyjnego,

- definiowanie zamówień,
- definiowanie wyrobów,
- system produkcyjny,
- projektowanie procesów technologicznych,
- planowanie potrzeb materiałowych,
- zlecenia produkcyjne,
- harmonogramowanie produkcji,
- analiza danych produkcyjnych.



Rys. 1.3.1. Model ogólny sterowania przepływem produkcji

Elementem inicjującym są zamówienia na wyroby gotowe. Zamówienia mogą dotyczyć dwóch sytuacji: zamówienie na wyrób już zdefiniowany, zamówienie na wyrób nowy – bez zdefiniowanej struktury i technologii.

Zamówienie może być traktowane jako zamówienie od klienta zewnętrznego ale także zamówienie tzw. wewnętrzne z innej komórki produkcyjnej/zakładu przedsiębiorstwa. Wyrób katalogowy ma określoną strukturę (elementy składowe: części, podzespoły, itp.) oraz procesy technologiczne dla wszystkich elementów tej struktury. W przypadku wyrobu nowego należy zdefiniować strukturę wyrobu, a następnie opracować procesy technologiczne.

Projektowanie procesów technologicznych polega na określeniu kolejnych operacji technologicznych, zasobów produkcyjnych (maszyny, narzędzia, itp.) oraz standardowych czasów związane z ich realizacją. Procesy technologiczne można

opracować w kilku wariantach obejmujących różną strukturę procesu oraz zasoby produkcyjne – jest to zależne od możliwości technologicznych.

Zamówienia oraz zdefiniowana technologia wykonania umożliwia przeprowadzenie procesu planowania produkcji. Proces planowania produkcji jest zależny od strategii realizacji produkcji (produkcja na zapas lub zamówienie) oraz przyjętego modelu przepływu materiału (potokowa, niepotokowa) oraz przyjętych metod sterowania (np.: push, pull, sterowanie wąskim gardłem).

W zależności od przyjętego modelu sterowania na podstawie zamówień następuje określenie zapotrzebowania materiałowego. Na tym etapie może również nastąpić uwzględnienie stanów magazynowych wyrobów gotowych jak i części składowych.

Na podstawie określonego zapotrzebowania materiałowego generowane są zlecenia produkcyjne stanowiące informacje jakie wyroby i elementy składowe należy wyprodukować w celu realizacji zamówienia lub uzupełnienia stanów magazynowych. Zlecenia produkcyjne podlegają harmonogramowaniu. Proces ten jest realizowany z zastosowaniem wybranych metod i zasad. Cyfrowe odwzorowanie procesu produkcyjnego pozwala na podstawie danych wejściowych, aktualnego obciążenia zasobów produkcyjnych oraz statusu realizacji zleceń i operacji wygenerować możliwe warianty harmonogramu produkcji. Wybrany wariant także na podstawie analizy wielokryterialnej podlega wdrożeniu do realizacji.

Podczas realizacji procesu produkcyjnego zbierane są dane dotyczące przepływu materiału, realizacji operacji technologicznych oraz parametrów procesów wytwarzania.

Na podstawie zebranych danych z procesu produkcyjnego możliwe jest przeprowadzenie prognozowania efektów związanych z realizacją zleceń produkcyjnych w wyniku wystąpienia odstępstwa od harmonogramu bazowego.

Harmonogram produkcji podlega zmianom w przypadku wystąpienia czynników uniemożliwiających osiągnięcie zakładanych parametrów realizacji zleceń produkcyjnych. Na podstawie przeprowadzonego procesu reharmonogramowania opracowywane są możliwe warianty zmian w harmonogramie produkcji.

Czynniki zakłócające są identyfikowane na podstawie danych pozyskanych w wyniku realizacji procesów produkcyjnych. W wyniku tego jest możliwe przeprowadzenie analiz i zastosowaniem opracowanych modeli decyzyjnych jest możliwy wybór rozwiązania pozwalającego uzyskać zakładane cele produkcyjne.

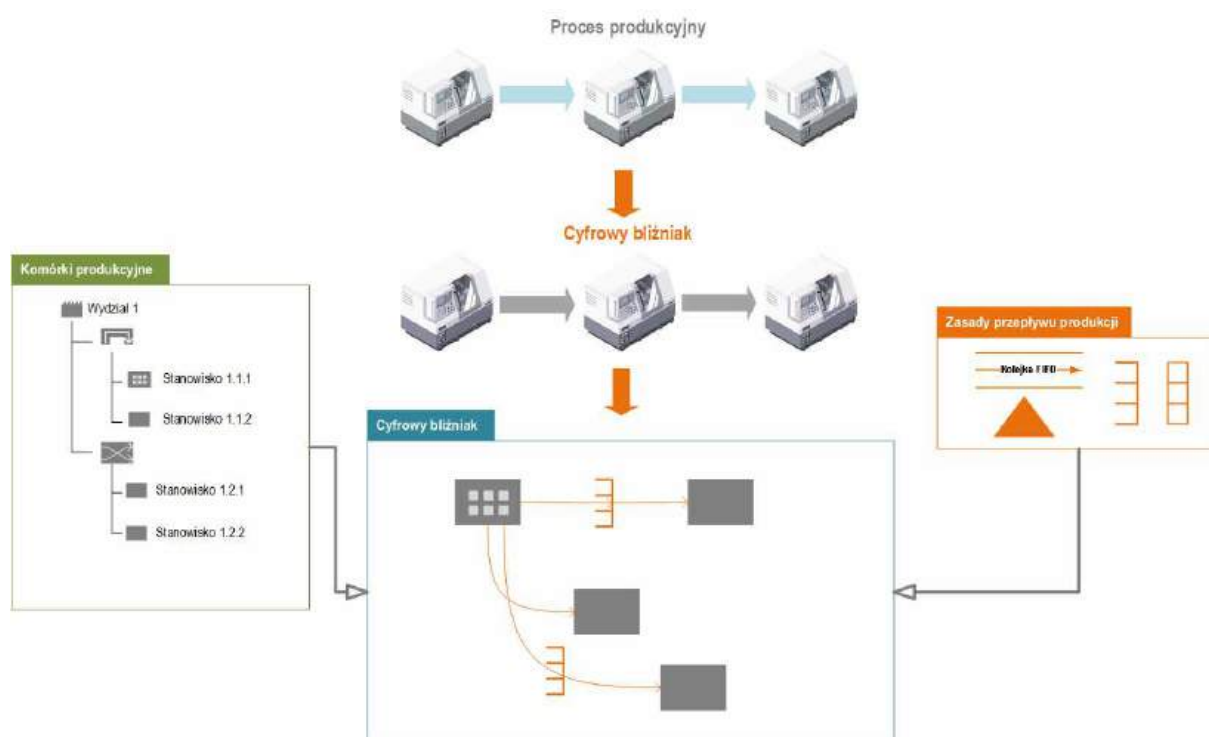
Opracowany model jest autorskim rozwiązaniem integrującym metody i narzędzia pozwalające w sposób całościowy realizować proces sterowania przepływem produkcji. Zastosowanie koncepcji cyfrowego bliźniaka pozwala na realizację tego procesu na podstawie aktualnych danych realizacji procesu produkcyjnego. Analiza tych danych przy uwzględnieniu wariantów możliwości realizacji zleceń produkcyjnych pozwala na efektywne sterowanie przepływem materiałów i informacji w systemie produkcyjnym.

W dalszej części opracowania przedstawiono najważniejsze obszary decyzyjne modelu.

1.3.1. Cyfrowy bliźniak procesu produkcyjnego

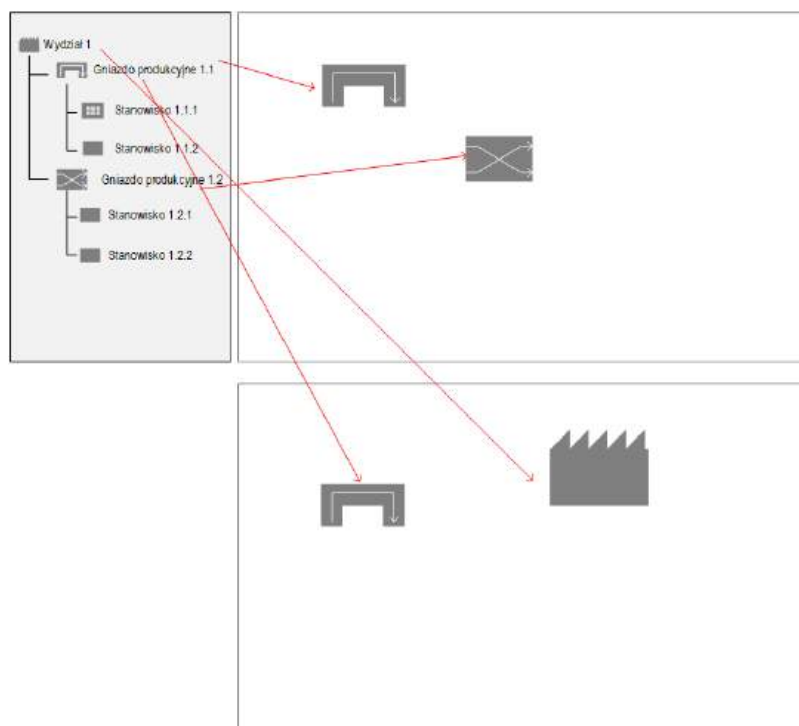
Zastosowanie koncepcji cyfrowego bliźniaka polega na opracowaniu modelu przepływu materiałów i informacji w systemie produkcyjnym stanowiącym cyfrowe odwzorowanie rzeczywistego procesu produkcyjnego.

Modelowanie przepływu produkcji polega na przypisaniu zasad i metod przebiegu przepływu materiałów i informacji w systemie produkcyjnym i zdefiniowaniu wymaganych atrybutów. Modelowanie odbywa się z zastosowaniem obiektów graficznych, do których przypisane są algorytmy definicyjne i decyzyjne. W ten sposób zdefiniowany zostaje cyfrowy bliźniak procesu na poziomie komórek produkcyjnych, zasad przepływu produkcji i ich atrybutów (rys. 1.3.2).



Rys. 1.3.2. Model definiowania cyfrowego bliźniaka procesu

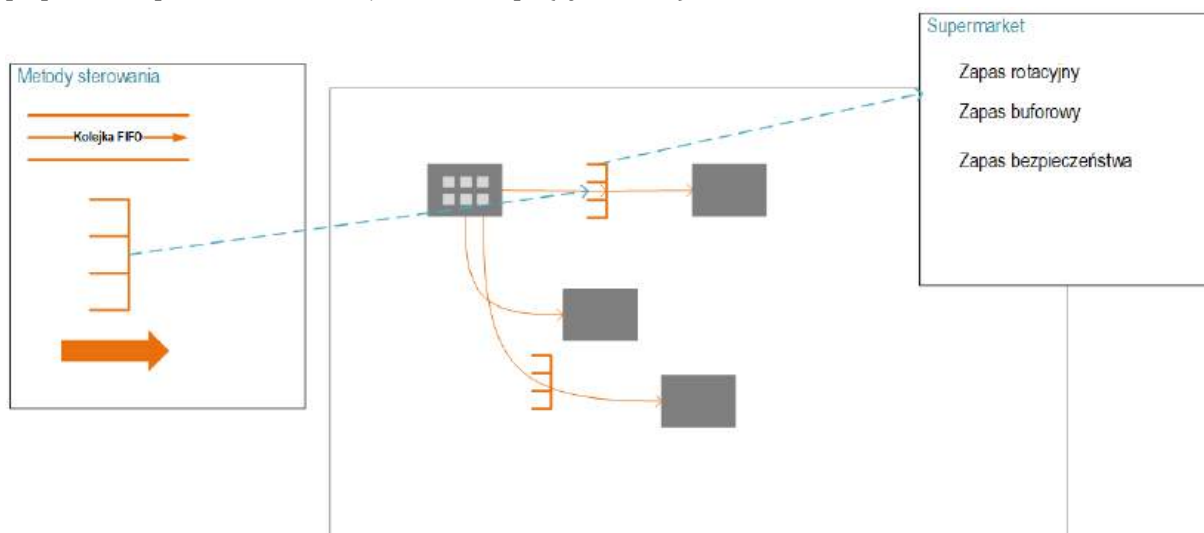
Pierwszym etapem definiowania cyfrowego bliźniaka jest wybór obiektów komórek produkcyjnych, dla których są ustalane relacje związane z przepływem produkcji (rys. 1.3.3). Cyfrowy bliźniak na poziomie komórek produkcyjnych może zostać zdefiniowany z różnym poziomem szczegółowości z punktu widzenia struktury systemu produkcyjnego. Może on uwzględniać różne poziomy tej struktury, np. stanowiska produkcyjne ale i gniazda czy linie produkcyjne (rys. 1.3.3).



Rys. 1.3.3. Definiowanie obiektów komórek produkcyjnych w cyfrowym bliźniaku.

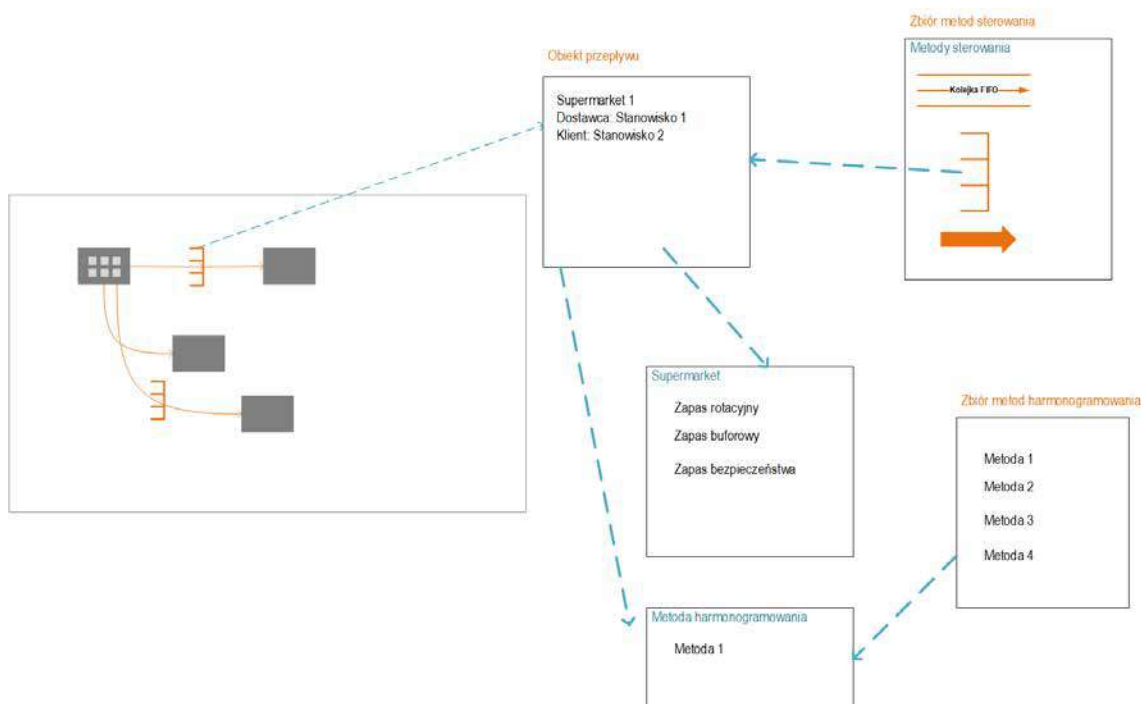
W ramach modelu zdefiniowano kilka typów komórek produkcyjnych, np. stanowisko produkcyjne, stanowisko produkcyjne wsadowe, gniazdo technologiczne i przedmiotowe, linia montażowa. Stopień odwzorowania cyfrowego struktury produkcyjnej ma wpływ na poziom szczegółowości analiz oraz sterowania przepływem produkcji.

Kolejnym krokiem w modelowaniu procesów produkcyjnych jest wybór obiektów metod sterowania przepływem materiałów. Obiekty te określają zasady regulujące przepływ materiałów pomiędzy komórkami produkcyjnymi. Obiektom zostały przypisane charakterystyczne atrybuty i wielkości wymagane do prawidłowego funkcjonowania danej metody sterowania przepływem materiałów, np. sterowanie poprzez supermarket, kolejki FIFO, itp. (rys. 1.3.4).



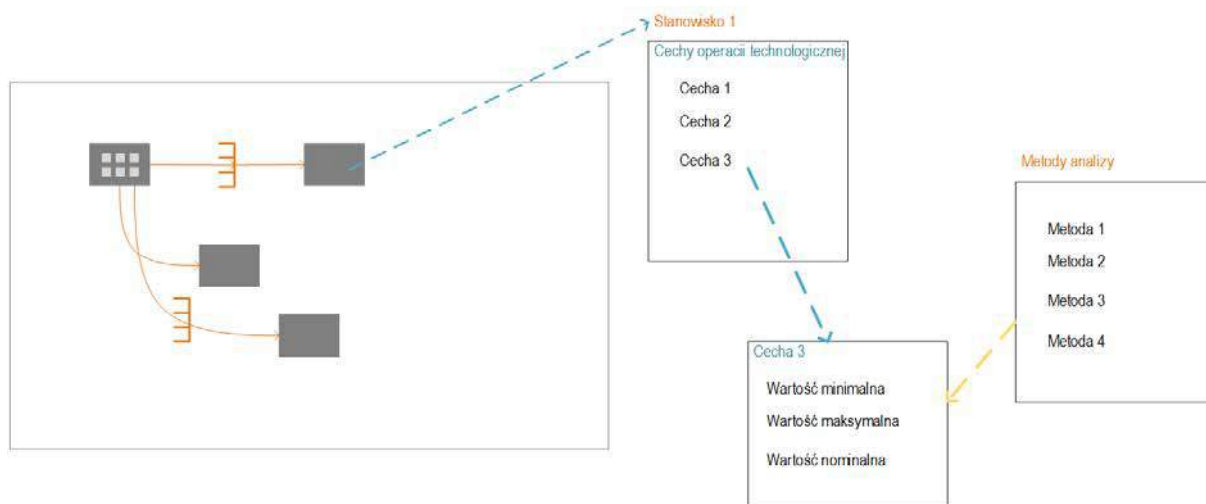
Rys. 1.3.4. Definiowanie zasad sterowania przepływem materiałów w cyfrowym bliźniaku

Dla danego obiektu metody sterowania definiuje się, także z zastosowaniem jakich metod ma być realizowane harmonogramowanie produkcji (rys.1.3.5). Wybór metody harmonogramowania odbywa się ze zbioru zdefiniowanych zasad i metod (zostały one przedstawione w dalszej części opracowania).



Rys. 1.3.5. Przykładowa parametryzacja metod sterowania przepływem materiałów w cyfrowym bliźniaku

W ramach modelu cyfrowego bliźniaka definiowane są także cechy operacji i wyrobów, które mają podlegać akwizycji podczas realizacji zleceń produkcyjnych. Dane mogą dotyczyć, np.: rozpoczęcia i zakończenia operacji technologicznej, liczby wykonanych sztuk, parametrów technologicznych maszyny, cech pomiarowych wyrobów i części. Tak zdefiniowane zbiory cech podlegających kontroli wraz z określeniem jej typu pozwalają na przypisanie metod analizy danych (opisano to w dalszej części opracowania) (rys. 1.3.6).

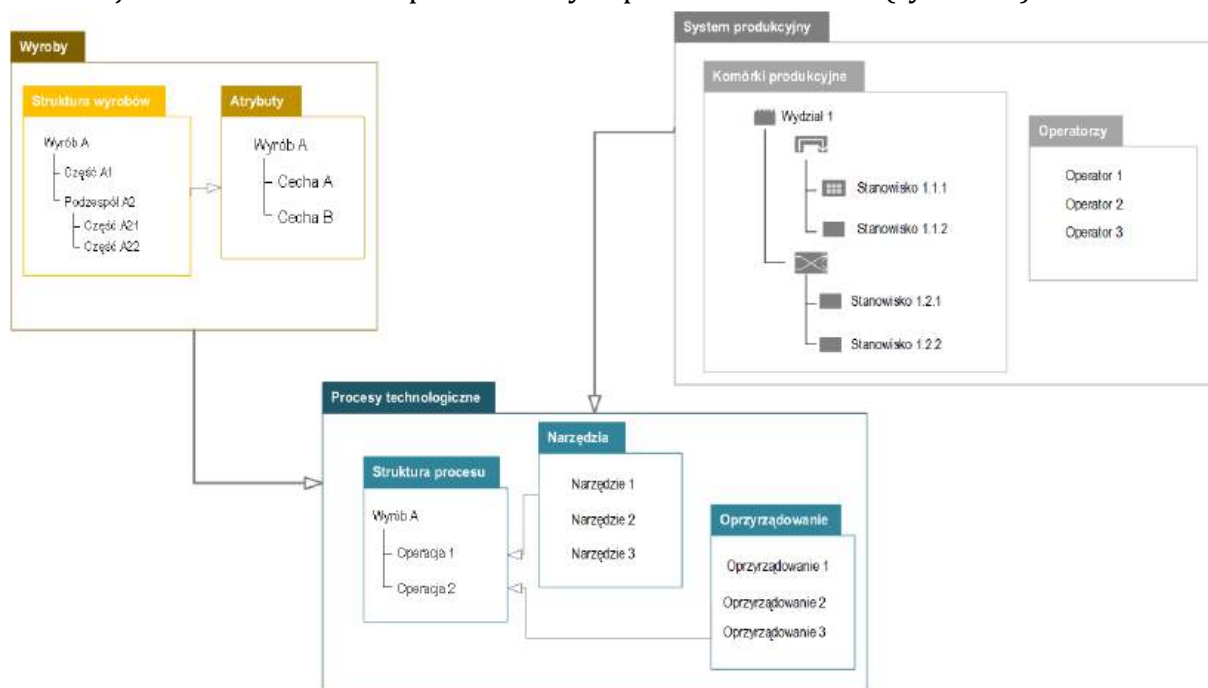


Rys. 1.3.6. Schemat definiowania cech podlegających kontroli w cyfrowym bliźniaku

Odwzorowany procesu produkcyjnego w postaci cyfrowego bliźniaka stanowi podstawę dla realizacji zadań dla kolejnych obszarów modelu sterowania przepływem produkcji. Stanowi on źródło danych produkcyjnych z procesu rzeczywistego oraz agreguje informacje o sposobie przepływu materiałów. W ten sposób jest możliwe określanie statusów zleceń produkcyjnych, prognozowanie i analizowanie wariantów ich realizacji.

1.3.2. Wariantowanie procesów technologicznych

Definiowanie procesu technologicznego polega na określeniu struktury (marszruty) procesu oraz przypisaniu wymaganych zasobów produkcyjnych. Proces technologiczny ma określony zbiór operacji realizowanych w odpowiedniej kolejności. Każda z operacji wymaga przypisania podstawowych zasobów koniecznych do jej realizacji oraz zdefiniowania podstawowych parametrów czasu (rys. 1.3.7).



Rys. 1.3.7. Definiowanie operacji technologicznej

W ramach definiowania operacji technologicznej określone są:

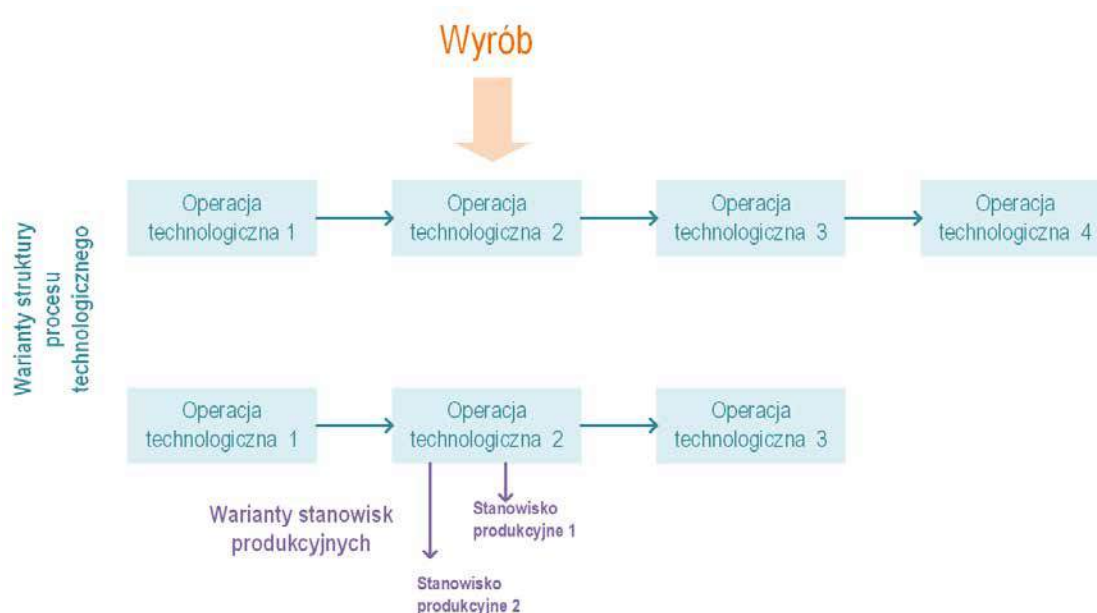
- stanowisko produkcyjne (komórka produkcyjna),
- narzędzia,
- oprządkowanie,
- operatorzy.

Zdefiniowane zasoby są podstawą do kalkulacji norm czasu wykonania operacji technologicznej: czas jednostkowy i czas przygotowawczo-zakończeniowy.

Indeks produkcyjny (wyrób, część) może być wytworzony poprzez realizację różnych wariantów procesu technologicznego, określonych przez:

- strukturę procesu technologicznego,
- komórki produkcyjne, w których mogą być realizowane operacje technologiczne,
- stosowane w operacjach narzędzia/oprzyskradowania.

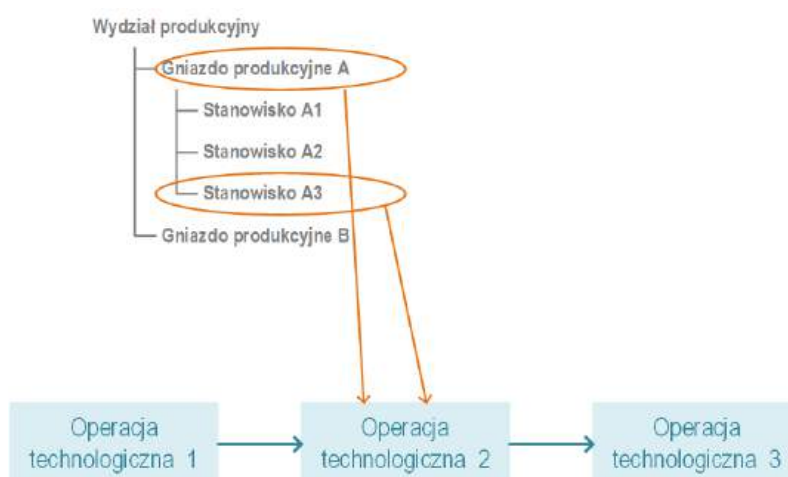
Definiowanie wariantu struktury procesu technologicznego polega na określeniu marszruty operacji technologicznych – przykład poniżej (rys. 1.3.8).



Rys. 1.3.8. Założenia wariantów struktury procesu technologicznego

Dana operacja technologiczna, w danym wariantcie procesu technologicznego, może być realizowana na różnych stanowiskach produkcyjnych. Przy czym przypisanie do operacji stanowisk produkcyjnych wymaga określenia czasu realizacji danej operacji.

Podczas projektowania procesów technologicznych jest możliwość definiowania komórek produkcyjnych do realizacji danej operacji technologicznej o różnym poziomie złożoności, np. gniazd, linii produkcyjnych czy np. wydziałów produkcyjnych (rys. 1.3.9).



Rys. 1.3.9. Okna definiowania operacji technologicznej

Takie podejście daje możliwość odwzorowania rzeczywistych przepływów materiałów i realizacji zleceń produkcyjnych, np. w przypadku realizacji operacji technologicznych w gniazdach technologicznych.

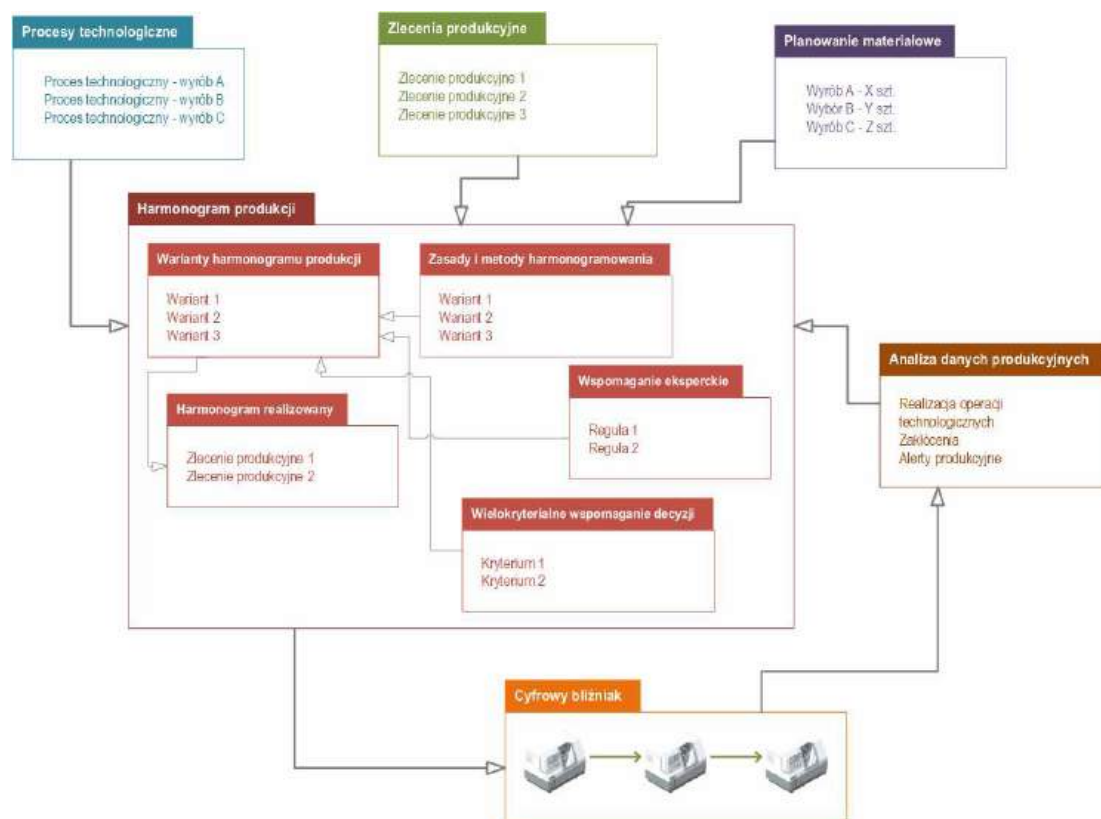
Zdefiniowane warianty procesu technologicznego są uwzględniane podczas harmonogramowania produkcji. W takiej sytuacji algorytm będzie uwzględniał dostępność różnych komórek produkcyjnych do realizacji danej operacji technologicznej.

1.3.3. Wariantowanie harmonogramu produkcji

Harmonogramowanie produkcji w opracowanym modelu bazuje na zastosowaniu reguł priorytetu. Rozwiązanie to cechuje się aktywnym zaangażowaniem użytkownika systemu w procesie harmonogramowania produkcji. Rozwiązanie to umożliwia dostosowanie reguł decyzyjnych dla danego systemu produkcyjnego uwzględniając jego specyfikę oraz charakterystykę zamówień oraz priorytety operacyjne. Model sterowania przepływem produkcji przewiduje możliwość opracowania wariantów harmonogramu produkcji dla danego zbioru zleceń produkcyjnych i wybraniu rozwiązania akceptowalnego. Podstawą tego procesu są definiowane procesy technologiczne oraz zlecenia produkcyjne.

Wariantowanie harmonogramowania obejmuje (rys. 1.3.10) :

- zasady harmonogramowania,
- zasady szeregowania zleceń produkcyjnych,
- metody harmonogramowania produkcji.



Rys. 1.3.10. Model harmonogramowania produkcji

Jako zasady harmonogramowania przyjęto:

- harmonogramowanie w przód - oznacza rozpoczęcie poszukiwania dostępnego okresu czasu dla danej komórki produkcyjnej w celu realizacji zlecenia/operacji technologicznej szeregowo od zdefiniowanej Planowanej daty planowania,
- harmonogramowanie w tył - oznacza rozpoczęcie poszukiwania dostępnego okresu czasu dla danej komórki produkcyjnej w celu realizacji zlecenia/operacji technologicznej wstecznie od Wymaganej daty produkcji.

Zasady szeregowania zleceń produkcyjnych określają kolejność zleceń produkcyjnych, które będą stanowiły podstawę planowania obciążania zasobów produkcyjnych.

Opracowano następujące zasady szeregowania:

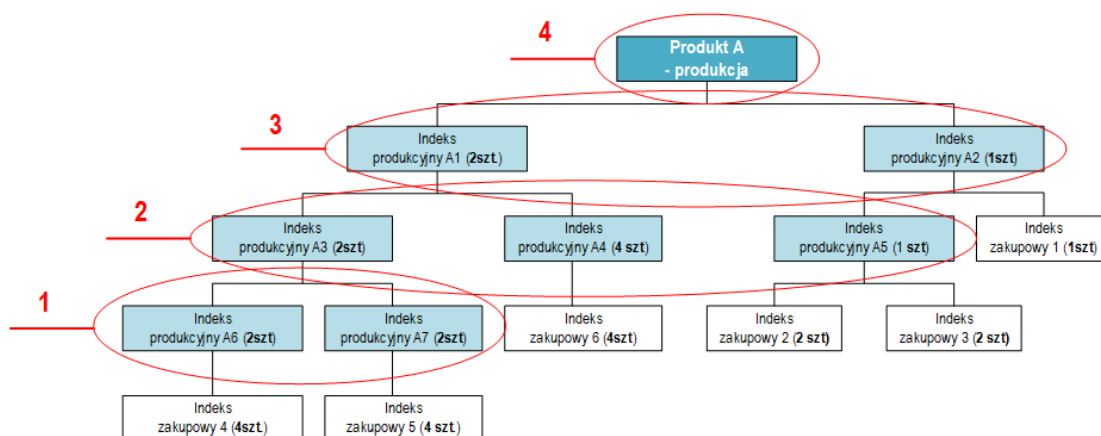
- szeregowanie według indeksu produkcyjnego - kolejność harmonogramowania dotyczy kolejno całego zbioru zleceń produkcyjnych dla danego jednego indeksu produkcyjnego,
- szeregowanie według poziomu struktury indeksu produkcyjnego - kolejność harmonogramowania dotyczy kolejno zbioru zleceń produkcyjnych dla danego poziomu struktury zbioru zleceń produkcyjnych.

Przykład

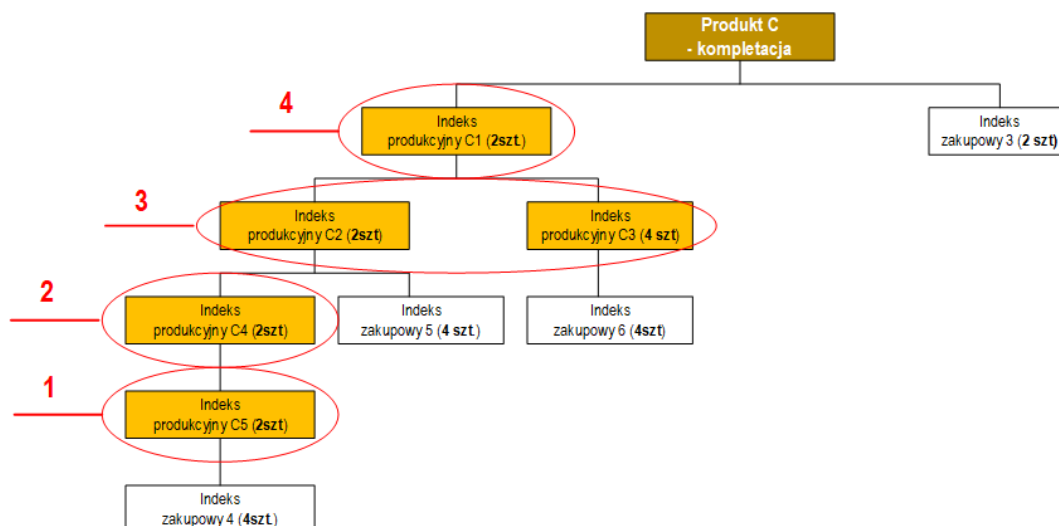
Zbiór zleceń do harmonogramowania obejmuje Wyrób A i Wyrób C. Wybór tej opcji powoduje, że harmonogramowanie będzie realizowane:

dla zasady harmonogramowania „w przód” (rys. 1.3.11 i 1.3.12):

- w pierwszej kolejności dla zleceń produkcyjnych najniższego rzędu struktury wszystkich indeksów najwyższego rzędu (Wyrób A i C),
- w dalszej kolejności kolejnych poziomów struktury wyższego rzędu.



Rys. 1.3.11. Przykład interpretacji zasad szeregowania.

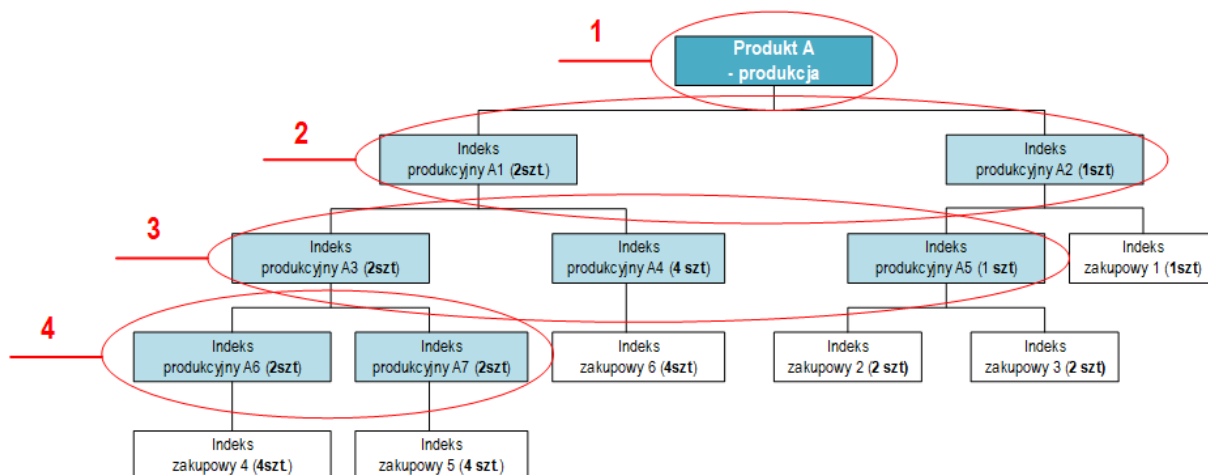


Rys. 1.3.12. Przykład interpretacji zasad szeregowania.

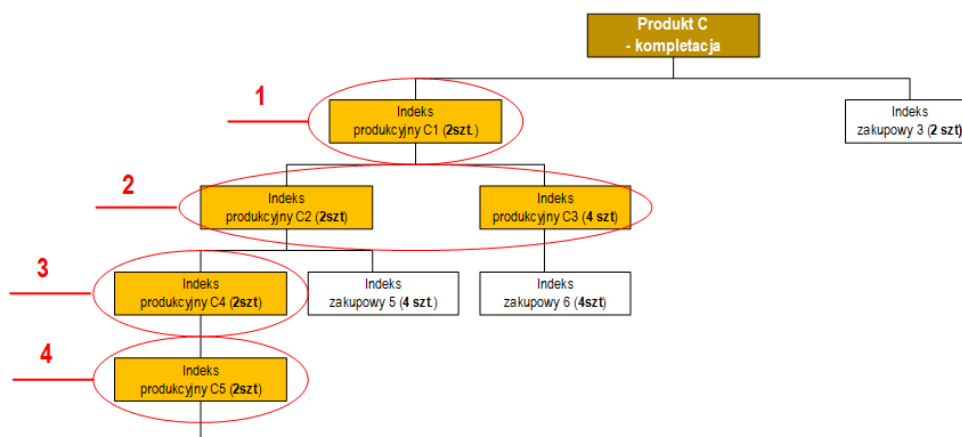
O wyborze kolejności harmonogramowania zleceń na danym poziomie struktury indeksów (np. w jakiej kolejności harmonogramować zbiór: Zlecenie Indeks produkcyjny C5, Zlecenie Indeks produkcyjny A6 i Zlecenie Indeks produkcyjny A7) – będą decydowały reguły priorytetu opisane w kolejnych punktach opracowania.

dla zasady harmonogramowania „w tył” (1.3.13 i 1.3.14):

- w pierwszej kolejności dla zleceń produkcyjnych najwyższego rzędu struktury wszystkich indeksów najwyższego rzędu (Wyrób A i C),
- w dalszej kolejności kolejnych poziomów struktury niższego rzędu.



Rys. 1.3.13. Przykład interpretacji zasad szeregowania.



Rys. 1.3.14. Przykład interpretacji zasad szeregowania.

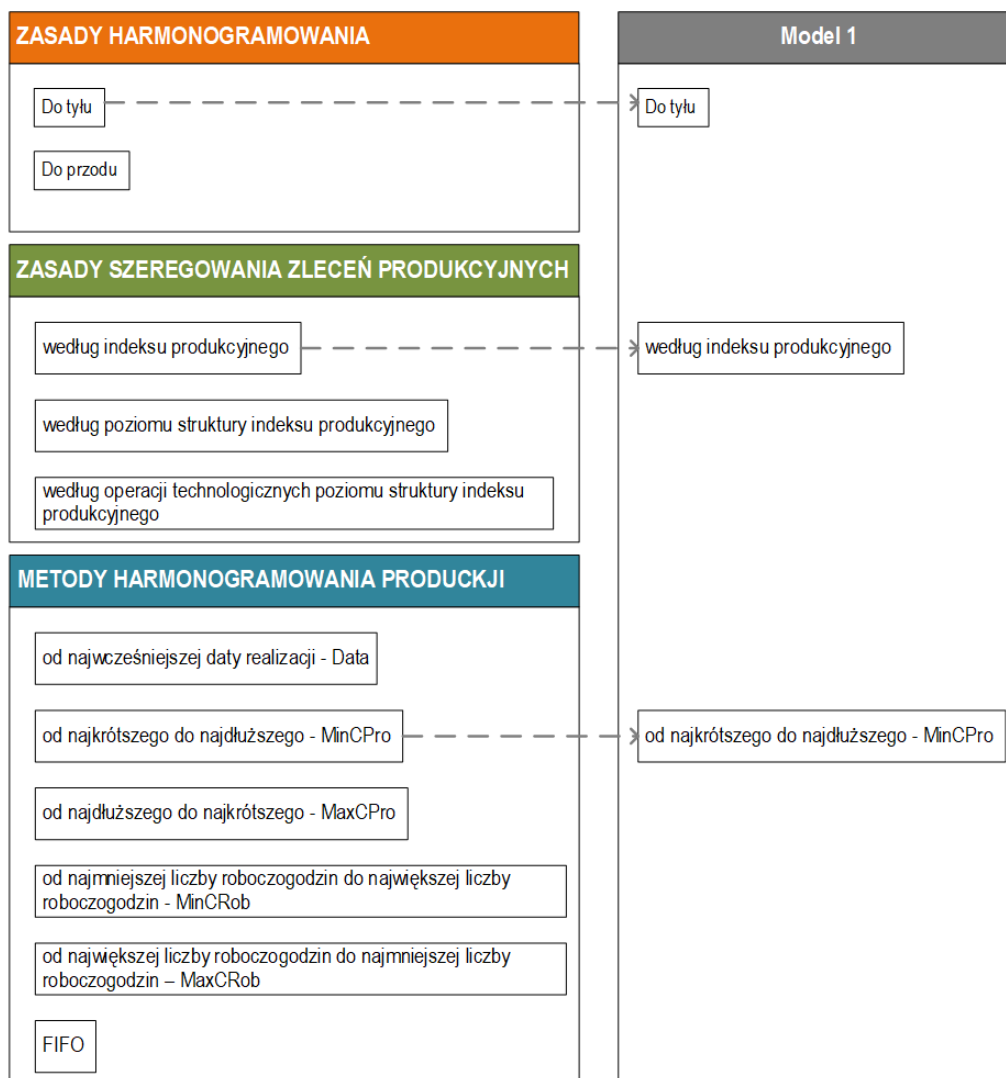
O wyborze kolejności harmonogramowania zleceń na danym poziomie struktury indeksów (np. w jakiej kolejności harmonogramować zbiór: Zlecenie Indeks produkcyjny produkt A - produkcja, Zlecenie Indeks produkcyjny C1) – będą decydowały reguły priorytetu opisane w kolejnych punktach opracowania.

- szeregowanie według operacji technologicznych poziomu struktury indeksu produkcyjnego - kolejność harmonogramowania dotyczy kolejno zbioru zleceń produkcyjnych dla danego poziomu struktury zbioru zleceń produkcyjnych (uwzględnienie zasady „w przód” i „w tył”) ale z uwzględnieniem operacji procesu technologicznego.

Metody harmonogramowania obejmują reguły priorytetów. Reguły określają kolejność obciążania stanowisk produkcyjnych realizacją zleceń produkcyjnych ze zbioru zleceń. W modelu decyzyjnym zastosowano następujące reguły priorytetu:

- od najwcześniejszej daty realizacji,
- priorytet zlecenia,
- FIFO (data wprowadzenia do systemu/data do realizacji),
- od najkrótszego do najdłuższego,
- od najdłuższego do najkrótszego,
- od najmniejszej liczby roboczogodzin do największej liczby roboczogodzin,
- od największej liczby roboczogodzin do najmniejszej liczby roboczogodzin.

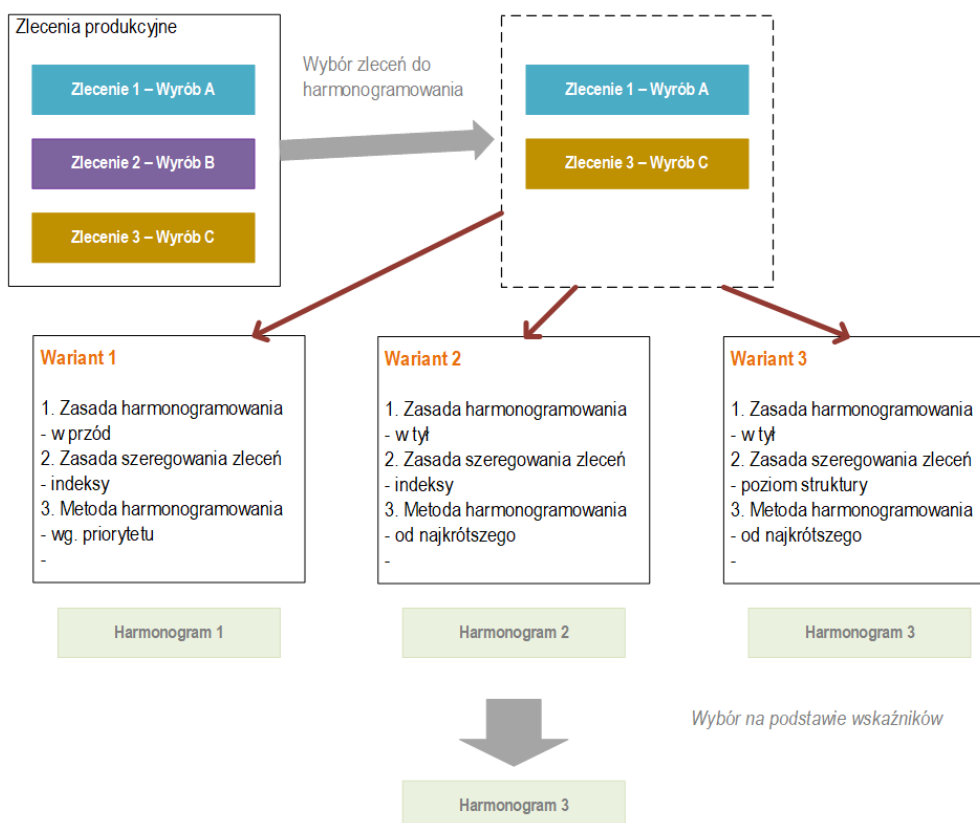
Opracowane zasady i metody pozwalają na opracowanie wielu harmonogramów produkcji (rys. 1.3.15).



Rys. 1.3.15. Założenia opracowywania harmonogramów produkcji

Wygenerowane warianty harmonogramów produkcji tworzą zbiór możliwych alternatywnych przepływów materiału w realizacji danego zbioru zleceń produkcji. Każdy z nich jest sparametryzowany wskaźnikami, które są podstawą analizy i porównania.

Na podstawie wskaźników możliwe jest porównanie harmonogramów produkcji i wybór akceptowalnego, który zostanie wdrożony do realizacji (rys. 1.3.16).



Rys. 1.3.16. Założenia wariantowania harmonogramów produkcji

Wskaźnikami oceny harmonogramów produkcją są:

- czas realizacji zlecenia produkcyjnego,
- czas produkcji wyrobu,
- czas realizacji zleceń produkcyjnych,
- opóźnienie realizacji zleceń produkcyjnych,
- opóźnienie produkcji,
- opóźnienie realizacji zleceń produkcyjnych,
- przekroczenie wymaganej daty dostawy,
- odchylenie od wymaganej daty realizacji,
- liczba zleceń z przekroczoną datą realizacji,
- średnie opóźnienie zleceń z przekroczoną datą realizacji,
- średnie obciążenie komórek produkcyjnych,
- średnia wartość zapasów międzyoperacyjnych,
- ciągłość realizacji zleceń produkcyjnych.

1.3.4. Wielokryterialne wspomaganie decyzji w harmonogramowaniu produkcji

Dla potrzeb skutecznego i aktywnego harmonogramowania produkcji opracowano także moduł zawierający funkcję wielokryterialnego wspomaganie wyboru harmonogramu produkcji. Przedstawione powyżej możliwości wygenerowania wielu wariantów harmonogramu produkcji są podstawą do automatycznej ich oceny z punktu widzenia przyjętych kryteriów.

Do oceny opracowanych wariantów harmonogramów produkcji zastosowano metodę Analytic Hierarchy Process (AHP). Umożliwia ona dekompozycję złożonego problemu decyzyjnego oraz utworzenie rankingu finalnego dla skończonego zbioru wariantów harmonogramu produkcji. Zdecydowano się na tę metodę z uwagi na możliwość zdefiniowania przez decydenta/użytkownika swoich preferencji w zakresie ważności kryteriów oceny – co jest istotne z punktu widzenia różnej specyfiki funkcjonowania systemów produkcyjnych.

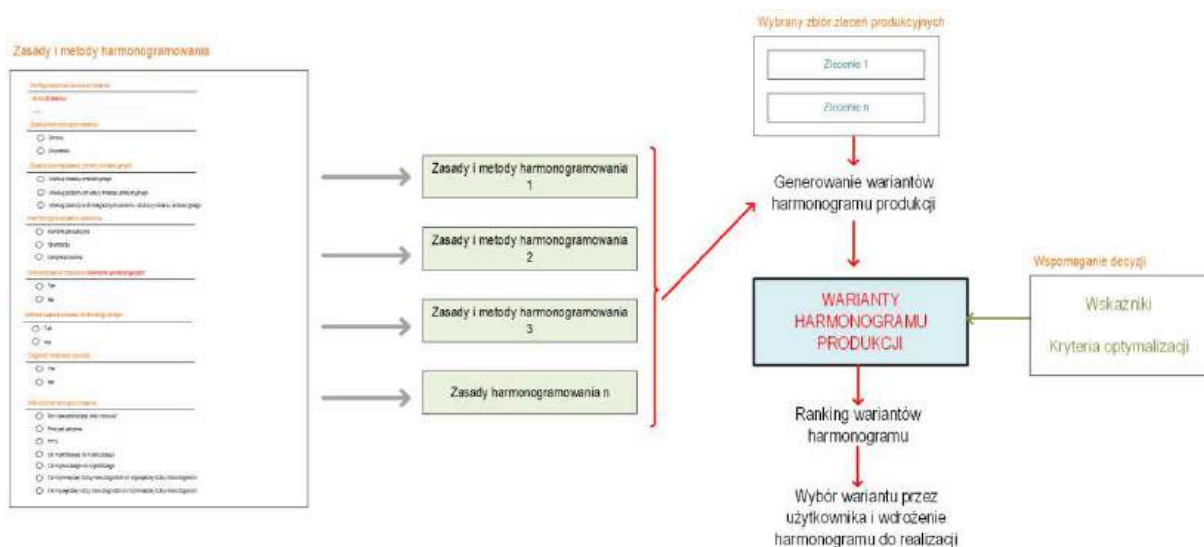
Ocena wielokryterialna składa się z kolejnych kroków, które w efekcie końcowych pozwalają na ustalenie rankingu dla opracowanych wariantów harmonogramu produkcji. Jako główne kryteria oceny harmonogramów produkcji przyjęto:

- minimalizację odchylenia od wymaganej daty realizacji zleceń produkcyjnych,
- minimalizację czasu realizacji zleceń produkcyjnych.

W modelu przyjęto także kryteria dodatkowe, które w systemach produkcyjnych mogą być koniecznością z punktu widzenia efektywności przepływu produkcji. Kryteriami tymi są:

- maksymalizacja obciążenia stanowisk produkcyjnych – wskaźnik: średnie obciążenie stanowisk produkcyjnych w czasie realizacji zbioru zleceń produkcyjnych,
- minimalizacja zapasu produkcji w toku – wskaźnik: średni zapas materiałów pomiędzy stanowiskami produkcyjnymi,
- maksymalizacja ciągłości realizacji zleceń produkcyjnych – wskaźnik: średnia wartość ilorazów rzeczywistego czasu realizacji zlecenia do czasu normatywnego.

Przedstawione kryteria mogą być zamiennie stosowane w procesie wspomagania decyzji wyboru harmonogramu produkcji a ich ważność jest wyrażona nadaniem odpowiednich wag przez użytkownika (rys. 1.3.17).



Rys. 1.3.17. Założenia funkcji optymalizacji wielokryterialnej.

Wykonany moduł wspomagający wybór harmonogramu produkcji w oparciu o kilka kryteriów oceny umożliwia wybór akceptowalnego rozwiązania umożliwiając aktywne sterowanie przepływem produkcji.

1.3.5. Wspomaganie eksperckie w harmonogramowaniu produkcji

W modelu sterowania przepływem produkcji opracowano także rozwiązanie umożliwiające opracowanie harmonogramu produkcji z zastosowaniem wnioskowania eksperckiego. Moduł umożliwia zdefiniowanie modeli decyzyjnych harmonogramowania produkcji, które pozwalają osiągnąć zakładane kryteria oceny. Do budowy modeli decyzyjnych stosuje się zasady i metody harmonogramowania produkcji wymienione we wcześniejszych punktach opracowania. Przewidziano dwie możliwości przygotowania reguł decyzyjnych: jedno i dwu poziomowe.

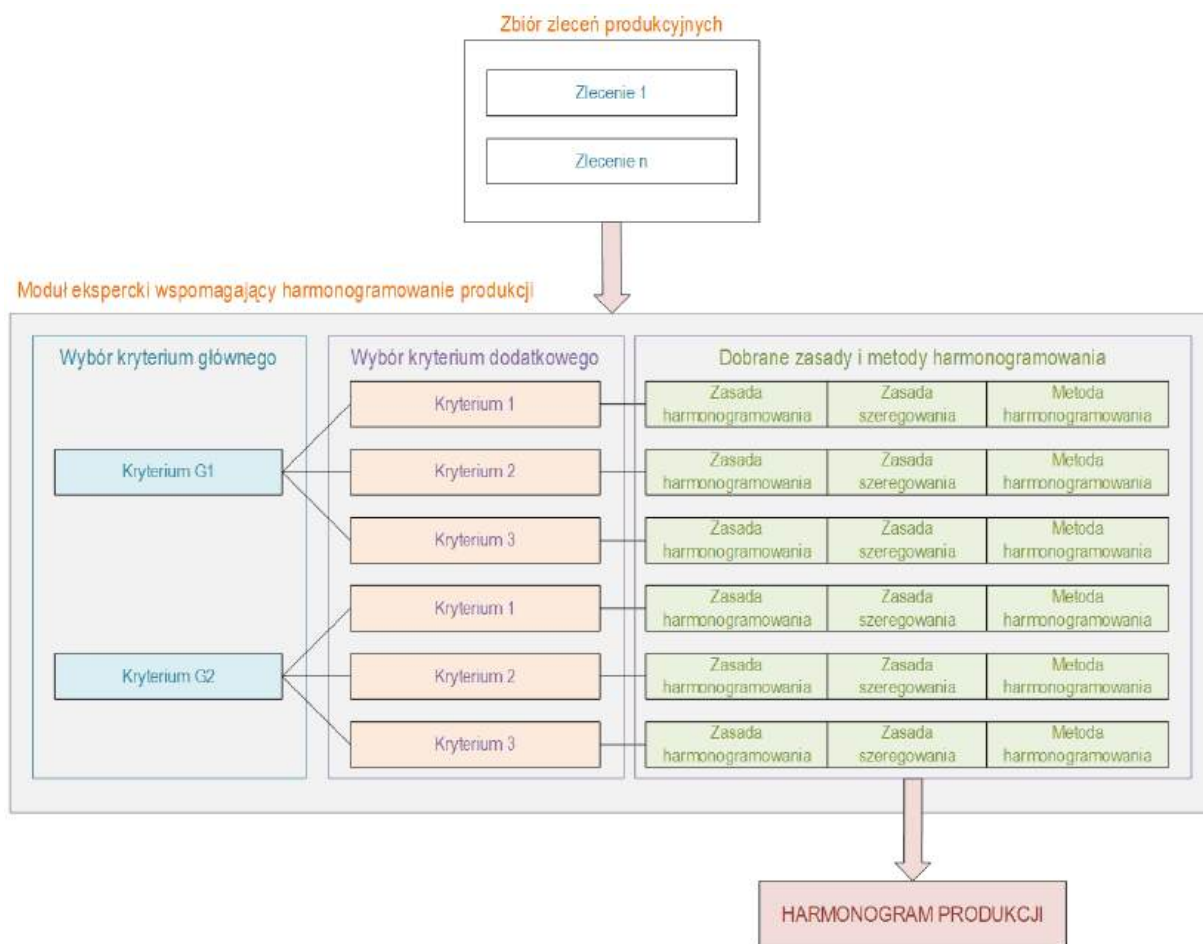
Jednopoziomowe reguły decyzyjne umożliwiają opracowanie modelu harmonogramowania produkcji dla jednego kryterium oceny. Natomiast w przypadku dwu poziomowego procesu decyzyjnego, należy wybrać główne kryterium decyzyjne:

- minimalizacja odchylenia od wymaganej daty realizacji zleceń produkcyjnych – wskaźnik: średnie odchylenie terminów zakończenia zleceń od wymaganych terminów ich zakończenia ,
- minimalizacja czasu realizacji zleceń produkcyjnych – wskaźnik: czas realizacji zbioru zleceń produkcyjnych.

A następnie wskazać kryterium dodatkowe:

- maksymalizacja obciążenia stanowisk produkcyjnych – wskaźnik: średnie obciążenie stanowisk produkcyjnych w czasie realizacji zbioru zleceń produkcyjnych,
- minimalizacja zapasu produkcji w toku – wskaźnik: średni zapas materiałów pomiędzy stanowiskami produkcyjnymi,
- maksymalizacja ciągłości realizacji zleceń produkcyjnych – wskaźnik: średnia wartość ilorazów rzeczywistego czasu realizacji zlecenia do czasu normatywnego.

Pierwszym krokiem jest wybór kryterium lub kryteriów oceny harmonogramów produkcji. Następnie system na podstawie reguł wnioskowania ze zbioru zasad i metod harmonogramowania dobiera odpowiednie zasady i metody. Są one podstawą do opracowania harmonogramu produkcji (rys. 1.3.18).

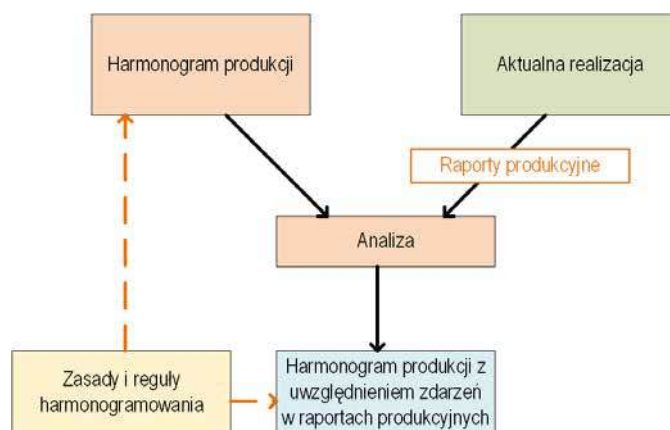


Rys. 1.3.18. Założenia funkcji wspomaganie eksperckiego w harmonogramowaniu produkcji.

Dzięki zastosowaniu „otwartej” i konfigurowalnej architektury modułu możliwe jest dowolne definiowanie reguł wnioskowania i opracowania własnych reguł decyzyjnych.

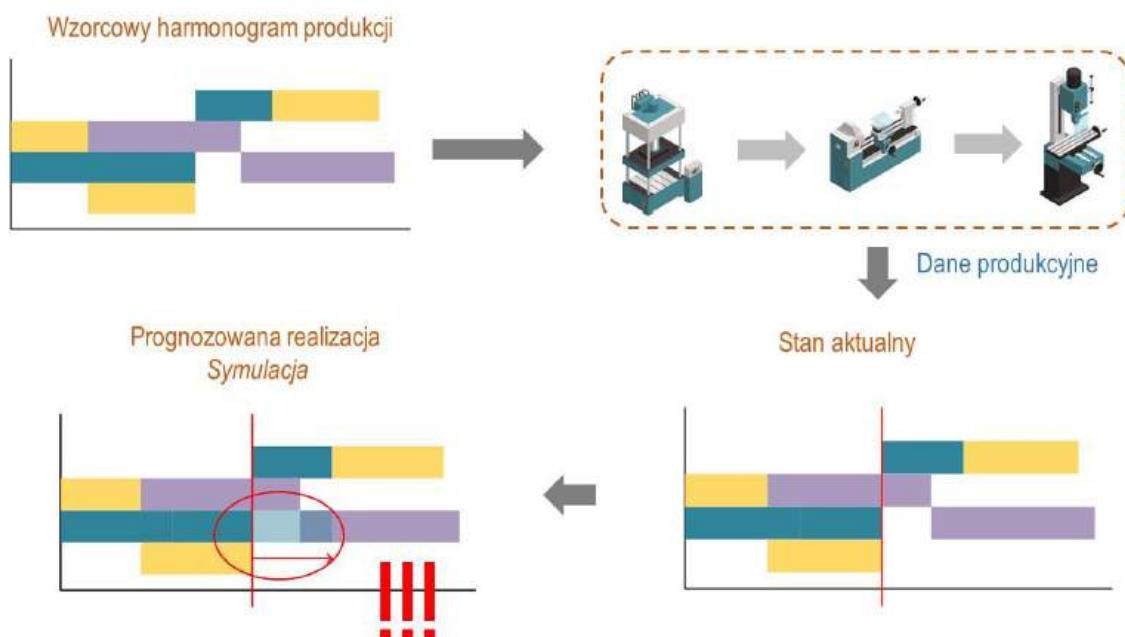
1.3.6. Prognozowanie i korygowanie przepływu produkcji

Jednym z głównych elementów modelu sterowania przepływem jest możliwość przeprowadzenia analizy wpływu zakłóceń w realizacji zleceń produkcyjnych na harmonogram produkcji – efekty końcowe realizacji zleceń (rys. 1.3.19).



Rys. 1.3.19. Założenia prognozowania realizacji harmonogramu produkcji.

Funkcja ta bazuje na założeniach eksperymentów symulacyjnych, w których czynnik zakłócający wyzwała algorytmy decyzyjne związane z przebudową harmonogramu – symulacja realizacji. Wynikiem zmieniony harmonogram produkcji oraz jego analiza na podstawie wskaźników oceny (wskaźniki te zostały przedstawione we wcześniejszych punktach opracowania) (rys. 1.3.20).



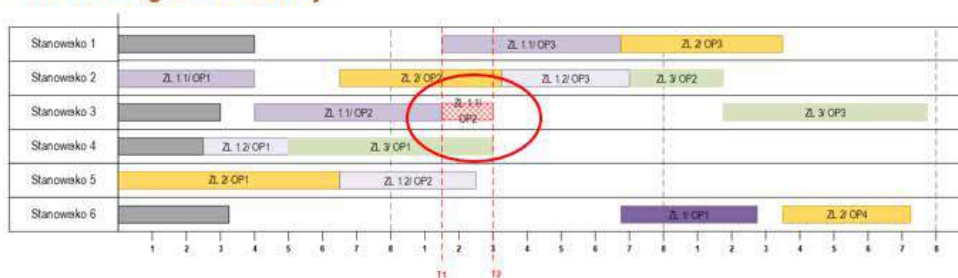
Rys. 1.3.20. Założenia prognozowania realizacji harmonogramu produkcji.

Zdefiniowano następujące czynniki zakłócające, których wystąpienie wyzwała proces analizy realizacji zleceń produkcyjnych dla nowych warunków:

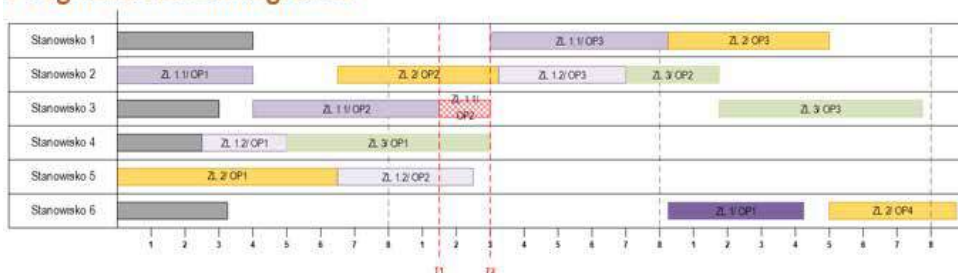
- przekroczony termin rozpoczęcia operacji technologicznej,
- postój na stanowisku produkcyjnym - zdarzenie oznaczające brak możliwości realizacji zadań produkcyjnych z powodu różnych czynników (np. brak materiału, awaria, itp.),
- przekroczony termin zakończenia operacji technologicznej,
- przekroczony czas jednostkowy operacji technologicznej.

Poniżej przedstawiono interpretację wystąpienia czynnika zakłócającego – przekroczony termin rozpoczęcia operacji technologicznej (rys. 1.3.21).

Harmonogram bazowy



Prognoza harmonogramu



Wskaźniki realizacji produkcji

Rys. 1.3.21. Przykład analizy i korygowania harmonogramu produkcji.

Model umożliwia także dokonanie przebudowy harmonogramu produkcji ze względu na wystąpienie zakłócenia, które uniemożliwia zrealizowanie celów produkcyjnych. Opracowano zasady przebudowy harmonogramu dla następujących zakłóceń:

- awaria maszyny,
- przekroczony czas rozpoczęcia operacji/zlecenia,
- przekroczony czas zakończenia operacji/zlecenia,
- brak materiału,
- brak operatora,
- brak oprzyrządowania.

Przebudowa/zmiana harmonogramu może być zrealizowana poprzez:

- przesunięcie zleceń produkcyjnych,
- anulowanie zleceń produkcyjnych,
- zmianę stanowiska produkcyjnego,
- zmianę terminów realizacji zleceń produkcyjnych.

1.3.7. Analiza danych o procesach wytwarzania

System zawiera także moduł umożliwiający dokonywanie zaawansowanych analiz procesów wytwarzania poprzez zastosowanie metod analizy i wspomaganie decyzji.

Analiza danych może dotyczyć:

- jakości wyrobów (indeksów produkcyjnych i zakupowych),
- jakości procesów,
- maszyn,
- oprzyrządowania.

Parametryzacji w obszarze jakości wyrobów mogą podlegać indeksy produkcyjne i zakupowe. Podstawowe dane/cechy podlegające parametryzacji:

- cechy geometryczne,
- cechy powierzchni,
- itp.

Każdy typ cechy ma określone wartości graniczne, które użytkownik definiuje dla danej cechy. Każdy typ cechy ma przypisaną grupę narzędzi analizy w ramach, której są zdefiniowane konkretne narzędzia i metody wspomagania decyzji. Wykaz grup:

- statystyka opisowa,
- wykres przebiegu wartości cechy,
- wskaźniki zdolności jakościowej.

Każda grupa ma zdefiniowane narzędzia w odniesieniu do typu cechy. Każde narzędzie ma przypisany algorytm obliczeniowy lub decyzyjny lub postać graficzną. Przykładami narzędziami i metodami ujętymi w modelu są:

- statystyka opisowa, np.: średnia, odchylenie standardowe, rozstęp,
- wykresy, np.: Pareto, szeregów czasowych,
- wskaźniki zdolności jakościowej, np.: C_p , C_{pk} .

W wyniku przeprowadzonych analiz możliwe jest bieżące reagowanie na wystąpienie zakłóceń.

1.4. System informatyczny Digitio Factory

Opracowany model sterowania przepływem produkcji był podstawą do wykonania komercyjnego systemu informatycznego o nazwie handlowej DIGIT.IO factory. Został on wykonany przez Lidera konsorcjum projektu – HIT Kody kreskowe sp.j.

System składa się z modułów grupujących funkcje definicyjne i algorytmiczne związane z realizacją zadań pozwalających na planowanie i sterowanie przepływem produkcji w systemie produkcyjnym (rys. 1.4.1).



Rys. 1.4.1. Moduły systemu DIGIT.IO factory

Podstawowe informacje dotyczące modułów systemu przedstawiono poniżej.

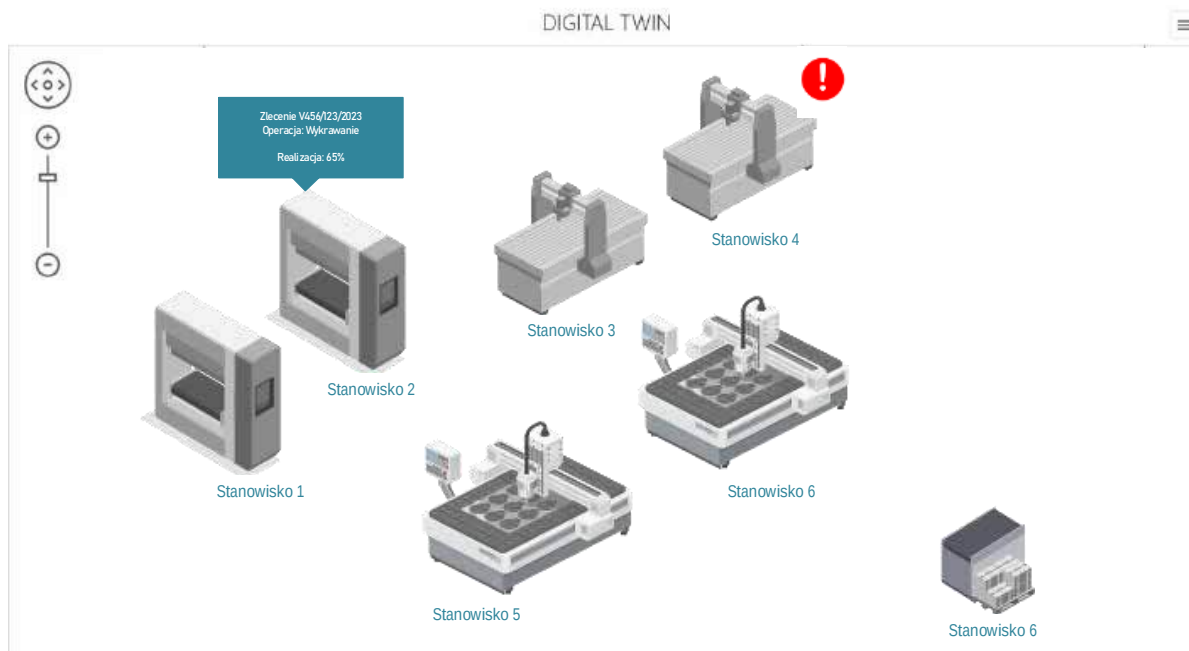
Administracja

Moduł umożliwia m.in. definiowanie użytkowników oraz zarządzanie uprawnieniami w systemie. Uprawnienia obejmują: dostęp do poszczególnych modułów systemu oraz uprawnienia w ramach danego modułu: dodawanie, edytowanie, usuwanie danych.

iFactory – cyfrowy bliźniak procesu produkcyjnego

Podstawowym modulem jest moduł **umożliwiający opracowanie cyfrowego bliźniaka procesu produkcyjnego**. Moduł ten pozwala na zdefiniowanie parametrów i zasad sterowania przepływem produkcji dla wydzielonych komórek w systemie produkcyjnym. Jest związany z odwzorowaniem cyfrowym rzeczywistych procesów produkcyjnych – definiowanie cyfrowego bliźniaka. Działania podejmowane w tym module pozwalają na konfigurację systemu informatycznego, parametryzację elementów przepływu produkcji oraz definiowanie powiązań pomiędzy nimi.

Moduł umożliwia graficzne odwzorowanie komórek produkcyjnych i dodanie do nich kluczowych informacji związanych ze stanem realizacji zleceń produkcyjnych oraz zakłóceń pojawiających się w trakcie ich realizacji (rys. 1.4.2).

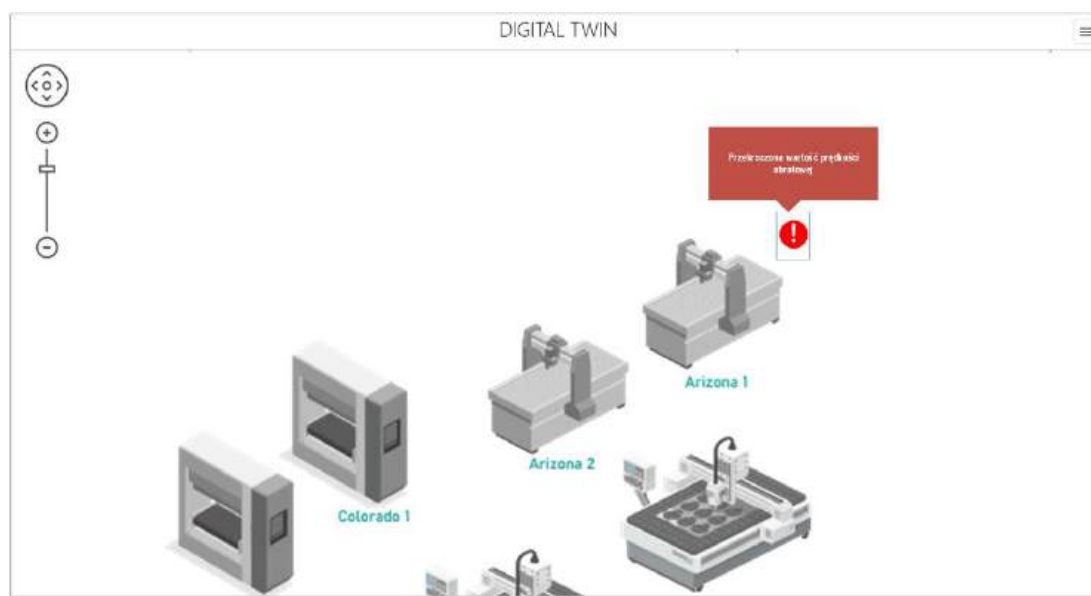


Rys. 1.4.2. Widok główny modułu cyfrowego bliźniaka.

Zakłócenia są zobrazowane odpowiednim komunikatem i mogą one dotyczyć:

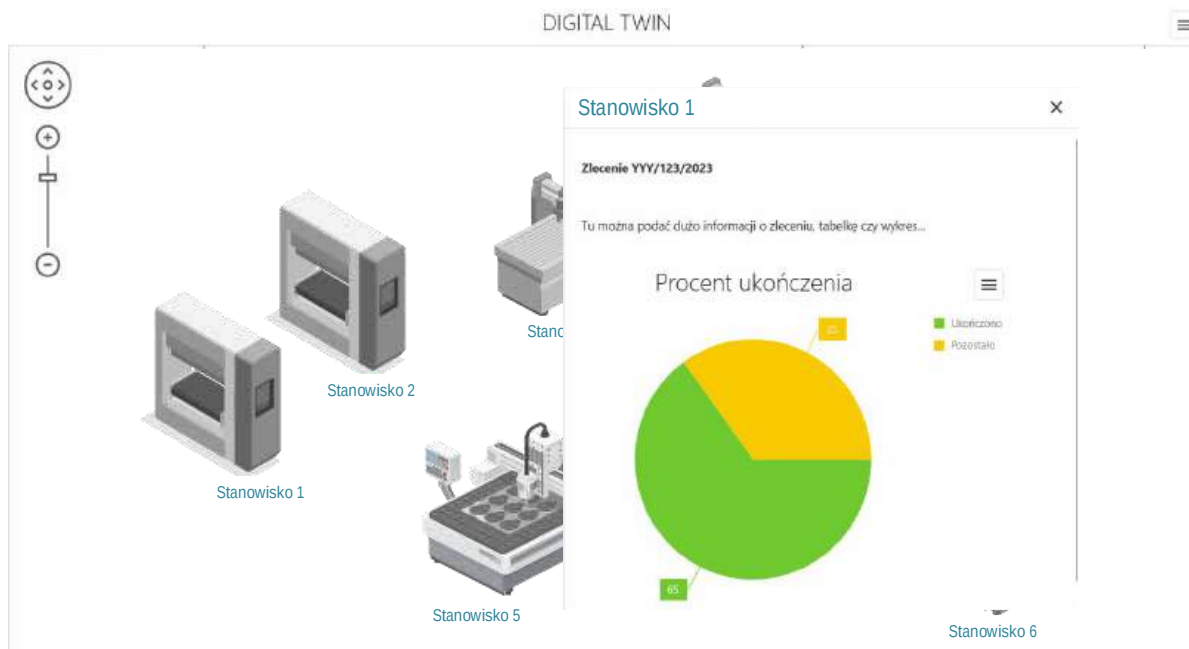
- postojów w danej komórce produkcyjnej,
- przekroczenia wartości granicznych zdefiniowanych cech.

Dodatkowo można także monitorować stan pracy dla poszczególnych komórek produkcyjnych. W osobnym oknie prezentowane są informacje szczegółowe dotyczące zasobów produkcyjnych oraz zlecenia produkcyjne (rys. 1.4.3 i 1.4.4.).



Widok główny z alertem produkcyjnym

Rys. 1.4.3. Widok z alertem produkcyjnym.

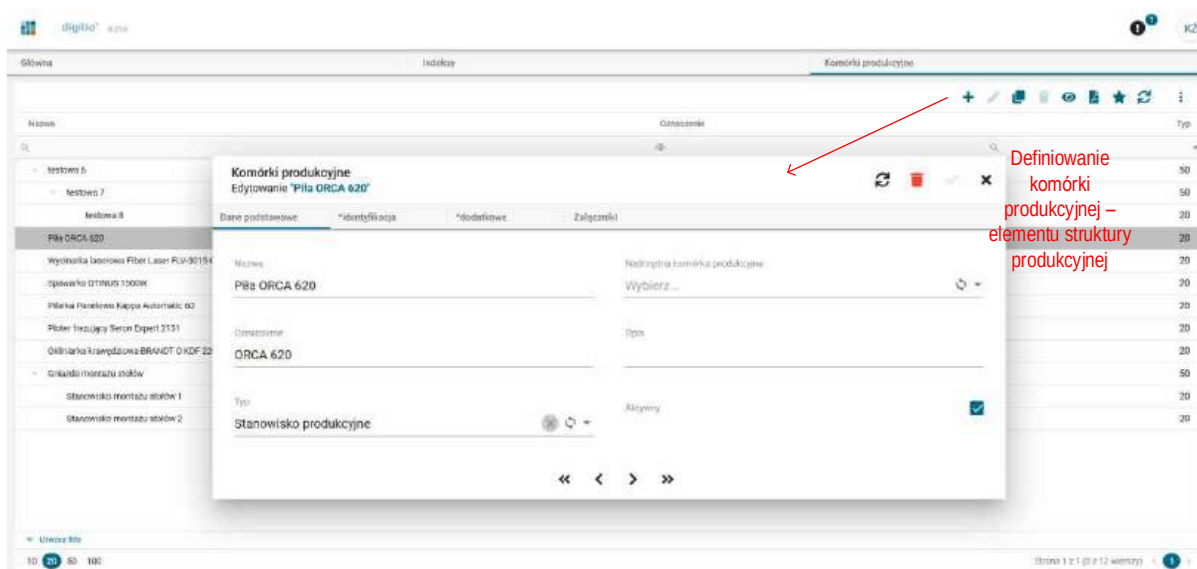


Rys. 1.4.4.. Informacje o realizacji zlecenia produkcyjnego

Źródłem danych dla modułu są informacje zawarte w innych modułach systemu. Umożliwia to poprzez wsparcie wizualne nadzorowanie przebiegu realizacji zleceń produkcyjnych, identyfikację odchyleń oraz zakłóceń w systemie produkcyjnym. Tym samym moduł jest swego rodzaju platformą cyfrowego odwzorowania funkcjonowania systemu produkcyjnego.

System produkcyjny

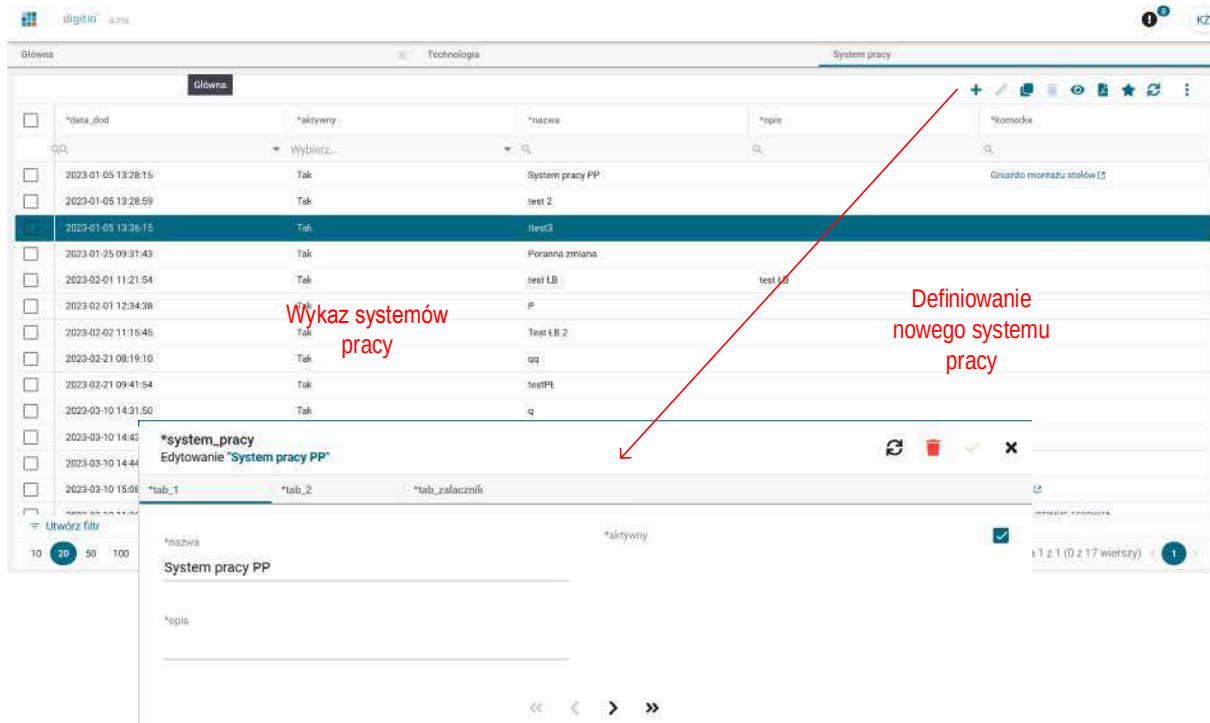
W module definiowanie są elementy struktury systemu produkcyjnego: gniazda, linie, stanowiska produkcyjne wraz z ich powiązaniem organizacyjnym. W ramach modułu definiowani są także pracownicy oraz systemy pracy określające dostępny czas pracy w założonym przedziale czasu (rys. 1.4.5).



Rys. 1.4.5. Widok przykładowych okien systemu – komórki produkcyjne

System pracy określa dostępny czas, w którym mogą być obciążane poszczególne komórki produkcyjne podczas harmonogramowania produkcji – praca na jedną zmianę, dwie, trzy. W systemie pracy są też uwzględnione dni wolne od pracy – planowane przerwy w pracy, np. Święta.

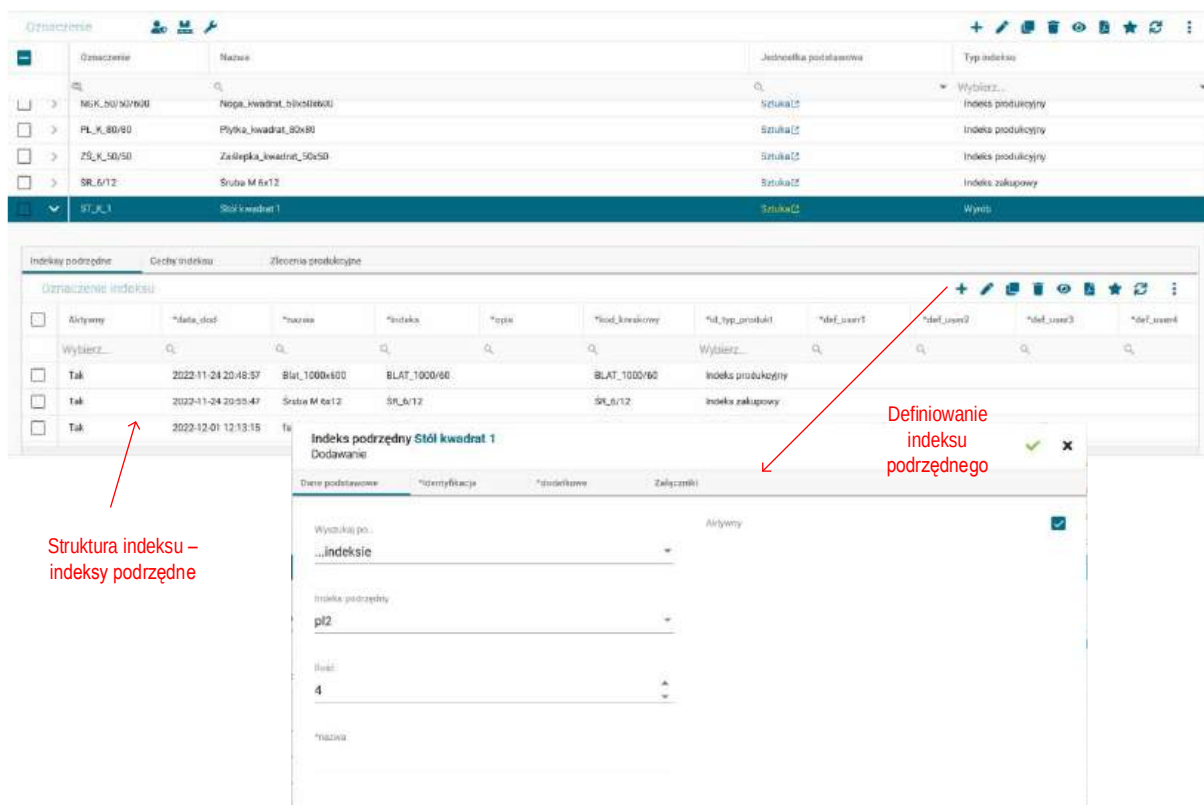
System pracy może być także przypisany do innych zasobów koniecznych do realizacji procesu technologicznego: narzędzia, oprzyrządowanie, pracownicy. Warunkiem oczywiście jest zdefiniowanie tych danych w systemie. Przypisanie systemu pracy do tych zasobów może być wykorzystywane w algorytmach harmonogramowania (rys. 1.4.6).



1.4.6. Przykładowe okna systemu - system pracy

Indeksy

Moduł, w którym definiowane są wyroby gotowe, części będące ich składnikami oraz materiały stosowane do ich produkcji. Definiowane są także struktury wyrobów wskazujące zależności części składowych – ang. manufacturing BOM (rys. 1.4.7).



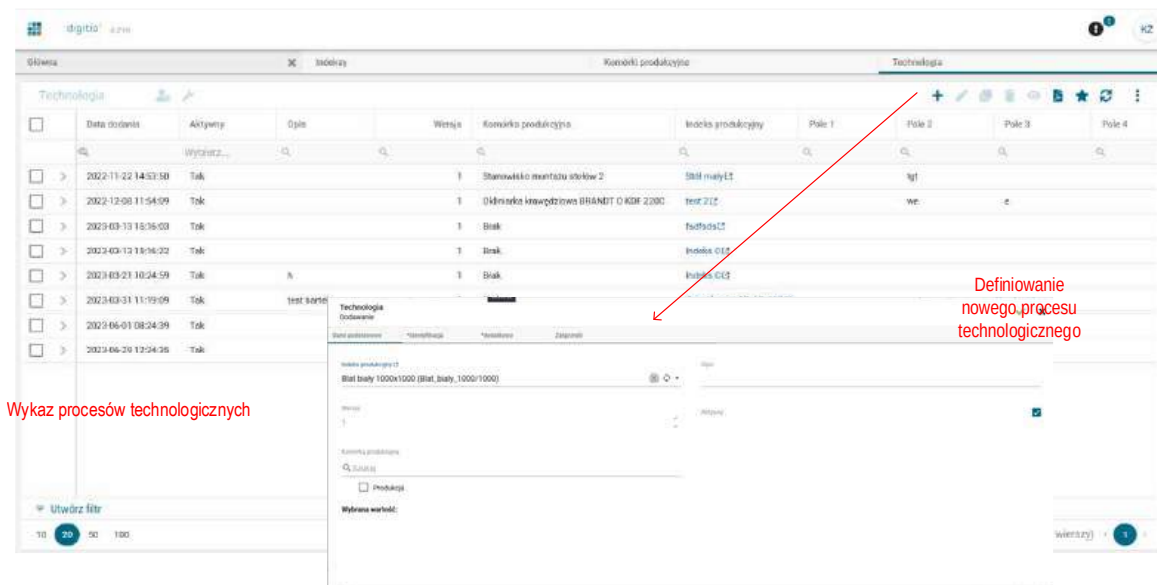
Rys. 1.4.7. Przykładowe okna systemu – struktura wyrobów

Technologia

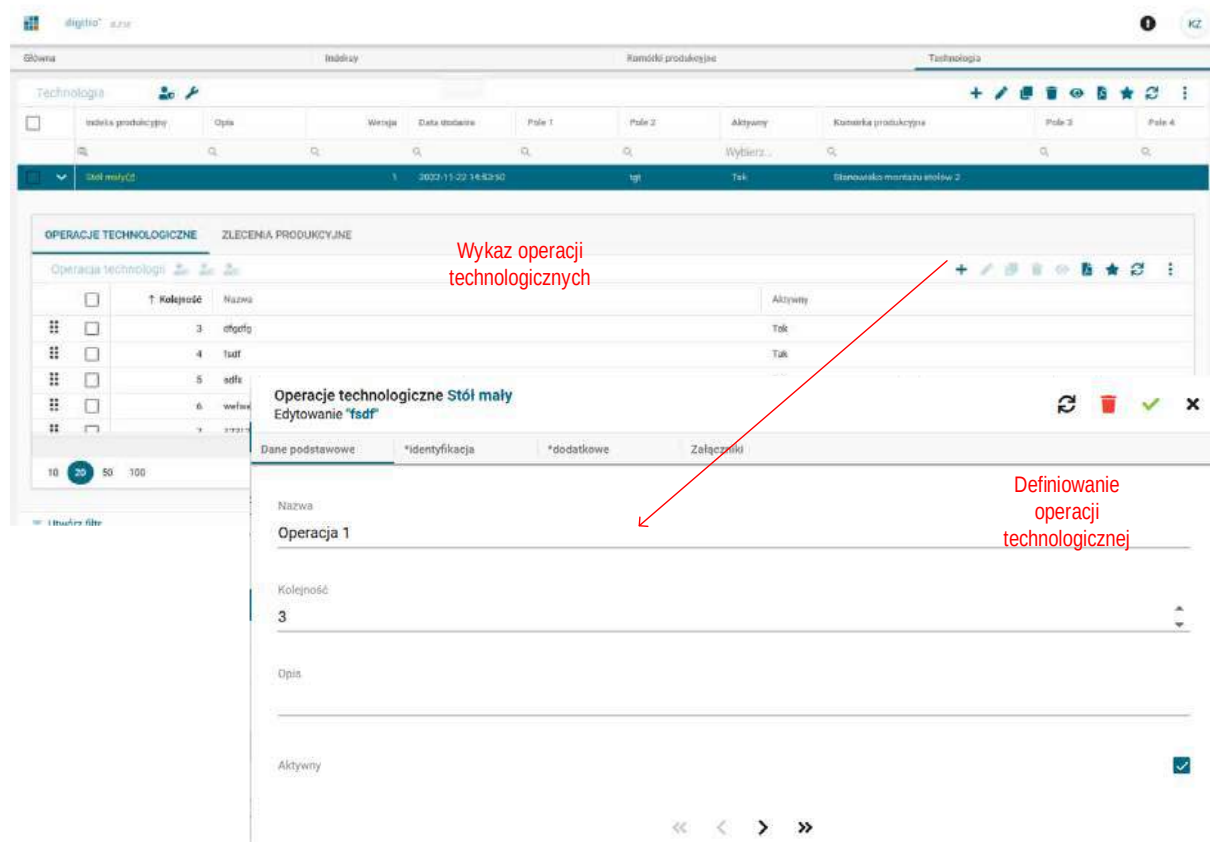
Moduł odpowiedzialny za definiowanie procesów technologicznych związanych z produkcją wyrobów oraz części składowych. Definiowanie procesu polega na określeniu kolejnych operacji (np. cięcie, montaż), przypisaniu dla danej operacji wymaganych zasobów w postaci stanowiska produkcyjnego czy komórki produkcyjnej (np. gniazdo), pracowników, narzędzi oraz zdefiniowaniu czasów: jednostkowego oraz przygotowawczego.

Zgodnie z opracowanym modelem sterowania przepływem produkcji dany indeks produkcyjny (wyrób, część) może być wyprodukowany w dowolnej liczbie wariantów procesu technologicznego. Dana operacja może być realizowana w różnych komórkach produkcyjnych/stanowiskach produkcyjnych. Dla zdefiniowanej operacji jest także możliwość przypisania wykonawcy (operatora produkcyjnego) oraz oprzyrządowania i narzędzi technologicznych.

Poniżej przedstawiono przykłady widoków ekranów definiowania danych o procesie technologicznym (rys. 1.4.8 i 1.4.9).



Rys. 1.4.8. Przykładowe okna systemu – moduł Technologia

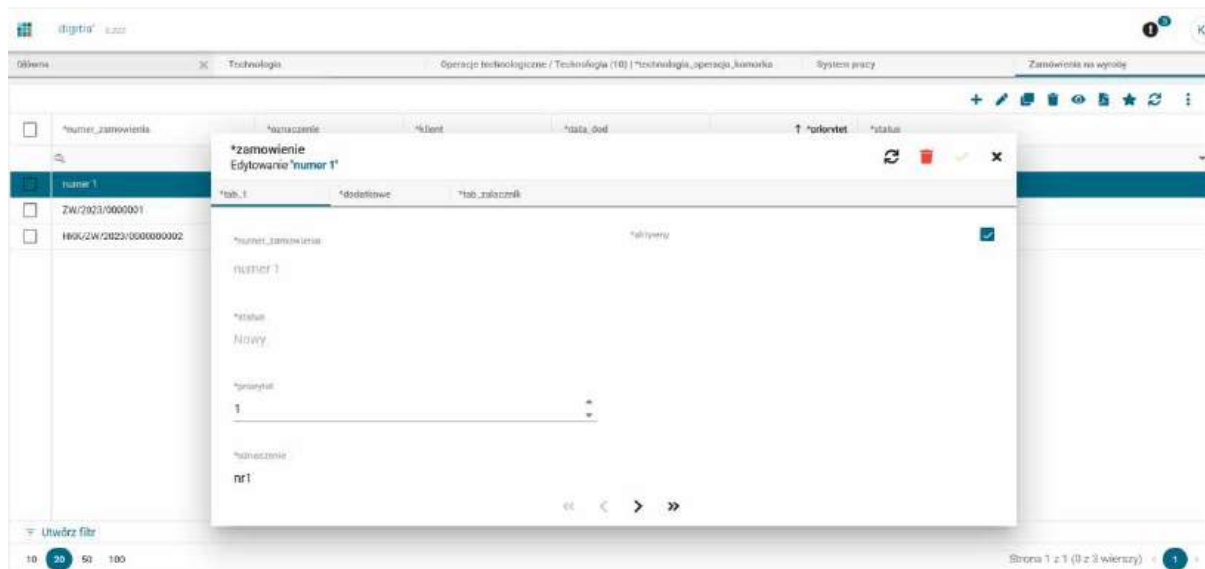


Rys. 1.4.9. Przykładowe okna systemu – moduł Technologia – definiowanie operacji

Zamówienia

W module definiowane są zamówienia klientów zewnętrznych i wewnętrznych na wyroby lub części. Zamówienia wewnętrzne mogą dotyczyć np. uzupełnienia stanów magazynowych wyrobów lub części z innych komórek organizacyjnych systemu

produkcyjnego. Pozycja zamówienia jest elementem składowym Zamówienia i określa wyrób, który należy wytworzyć w ramach zamówienia. Zamówienie może składać się z dowolnej liczby pozycji zamówienia z określoną ilością i terminami dostawy (rys. 1.4.10).



Rys. 1.4.10. Przykładowe okna systemu – moduł Zamówienia

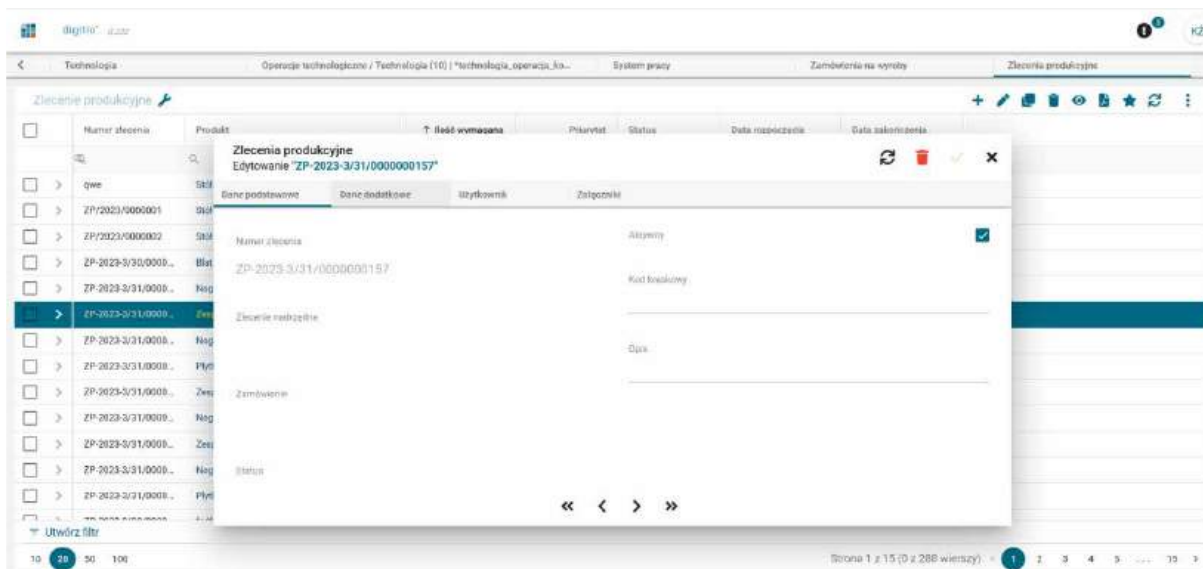
Zlecenia produkcyjne

W ramach modułu definiowane są zlecenia będące podstawą harmonogramowania produkcji. Zlecenie produkcyjne dotyczy każdego indeksu produkcyjnego będącego wyrobem lub częścią (element składowy wyrobu gotowego).

Definiowanie zleceń produkcyjnych może odbywać się:

- automatycznie na podstawie zdefiniowanych zamówień na wyroby,
- manualnie przez użytkownika na dowolnych indeks produkcyjny,
- automatycznie na podstawie stanów magazynowych do uzupełnienia,
- manualnie przez użytkownika na podstawie stanów magazynowych.

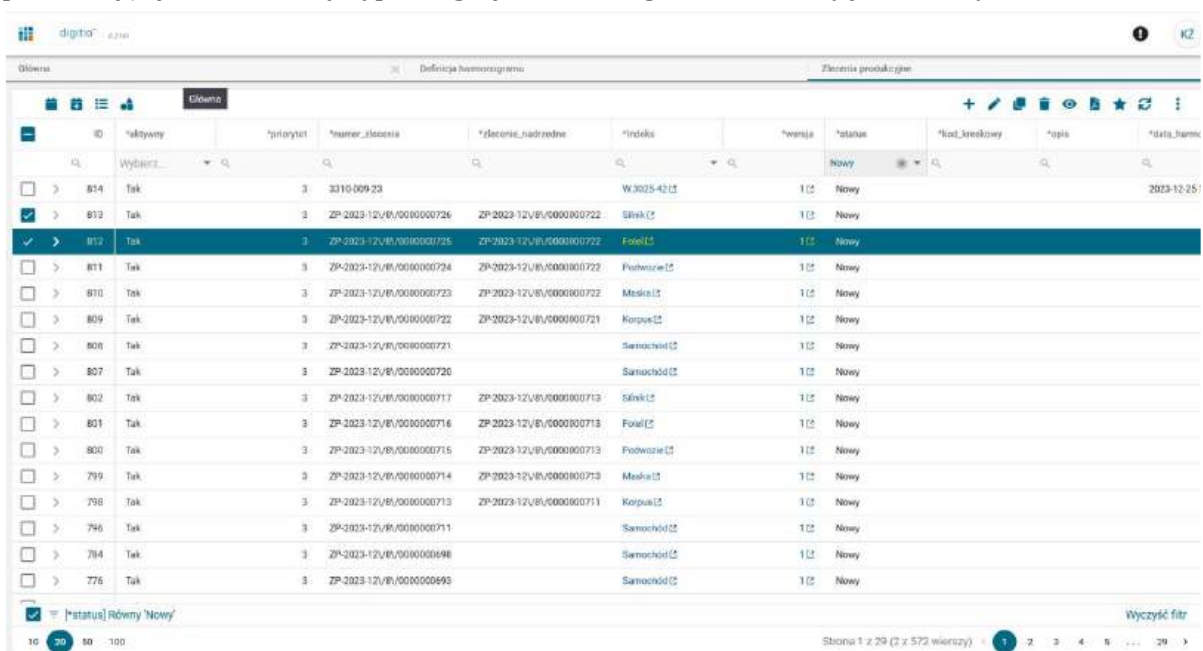
Definiowane są wymagane daty, np. rozpoczęcia, zakończenia, które będą informacją wejściową w procesie harmonogramowania i analiz realizacji produkcji. Istotnym elementem związanym ze zleceniem produkcyjnym są jego statusy - dane określające fazę realizacji Zlecenia produkcyjnego. Informacje dotyczące statusu są nadawane automatycznie bądź manualnie przez użytkownika (rys. 1.4.11).



Rys. 1.4.11. Przykładowe okna systemu – moduł Zlecenia produkcyjne

Harmonogramowanie produkcji

W systemie DF proces harmonogramowania rozpoczyna się od wyboru zleceń produkcyjnych, które będą podlegały harmonogramowaniu (rys. 1.4.12).



Rys. 1.4.12. Wybór zleceń produkcji do harmonogramowania produkcji.

Kolejnym krokiem jest wybór zasad i metod harmonogramowania produkcji, który będzie zastosowany do wygenerowania wariantu harmonogramu.

Wygenerowane warianty harmonogramów produkcji tworzą zbiór możliwych wariantów realizacji danego zbioru zleceń produkcji. Każdy z nich jest sparametryzowany wskaźnikami, które są podstawą analizy i porównania (rys. 1.4.13).

*technologia_operacja / Technologia...				
Postaje				
Zlecenia produkcyjne				
*Symulacja harmonogramu				
*symulacja_wskaznik / Symulacja harmonogramu [...]				
☐	ID	*symulacja	*wskaznik	*wynik
☐	Q1	Q1	Q1	Q1
☐	154	Symulacja_Test_1_KZ	Średnie obciążenie komórek produkcyjnych	Wycinarka laserowa Fiber Laser FLW-3015C2
☐	155	Symulacja_Test_1_KZ	Średnie obciążenie komórek produkcyjnych	Pilarka Panelowa Kappa Automatic 60
☐	156	Symulacja_Test_1_KZ	Średnie obciążenie komórek produkcyjnych	Płoter frezujący Seron Expert 2131
☐	157	Symulacja_Test_1_KZ	Średnia wartość zapasów międzykomórkowych	Płoter frezujący Seron Expert 2131
☐	158	Symulacja_Test_1_KZ	Średnia wartość zapasów międzykomórkowych	Pilarka Panelowa Kappa Automatic 60
☐	211	Symulacja_Test_1_KZ	Czas realizacji zleceń produkcyjnych	Symulacja_Test_1_KZ
☐	212	Symulacja_Test_1_KZ	Średnia wartość opóźnienia dla zleceń z przekroczoną datą realizacji	Symulacja_Test_1_KZ
☐	213	Symulacja_Test_1_KZ	Średnia wartość ciągłości realizacji zleceń produkcyjnych produkcyjnych	Symulacja_Test_1_KZ
☐	214	Symulacja_Test_1_KZ	Uczestnictwo zleceń z przekroczoną datą realizacji	Symulacja_Test_1_KZ
☐	215	Symulacja_Test_1_KZ	Średnia wartość zapasów międzyoperacyjnych	Symulacja_Test_1_KZ
☐	590	Symulacja_Test_1_KZ	Czas realizacji zlecenia	ZP-2023-12V4V000000669
☐	591	Symulacja_Test_1_KZ	Czas realizacji zlecenia	ZP-2023-12V4V000000668
☐	592	Symulacja_Test_1_KZ	Czas produkcji wyrobu	ZP-2023-12V4V000000669
☐	593	Symulacja_Test_1_KZ	Czas produkcji wyrobu	ZP-2023-12V4V000000668
☐	594	Symulacja_Test_1_KZ	Opóźnienie zleceń produkcyjnych	ZP-2023-12V4V000000669
☐	595	Symulacja_Test_1_KZ	Opóźnienie zleceń produkcyjnych	ZP-2023-12V4V000000668

Rys. 1.3.13. Wskaźniki oceny harmonogramu produkcji.

Wybór harmonogramu produkcji do realizacji może nastąpić poprzez:

- porównanie przez użytkownika wskaźników wariantów harmonogramu ,
- z zastosowaniem wielokryterialnego wspomaganie decyzji,
- zastosowanie modułu eksperckiego.

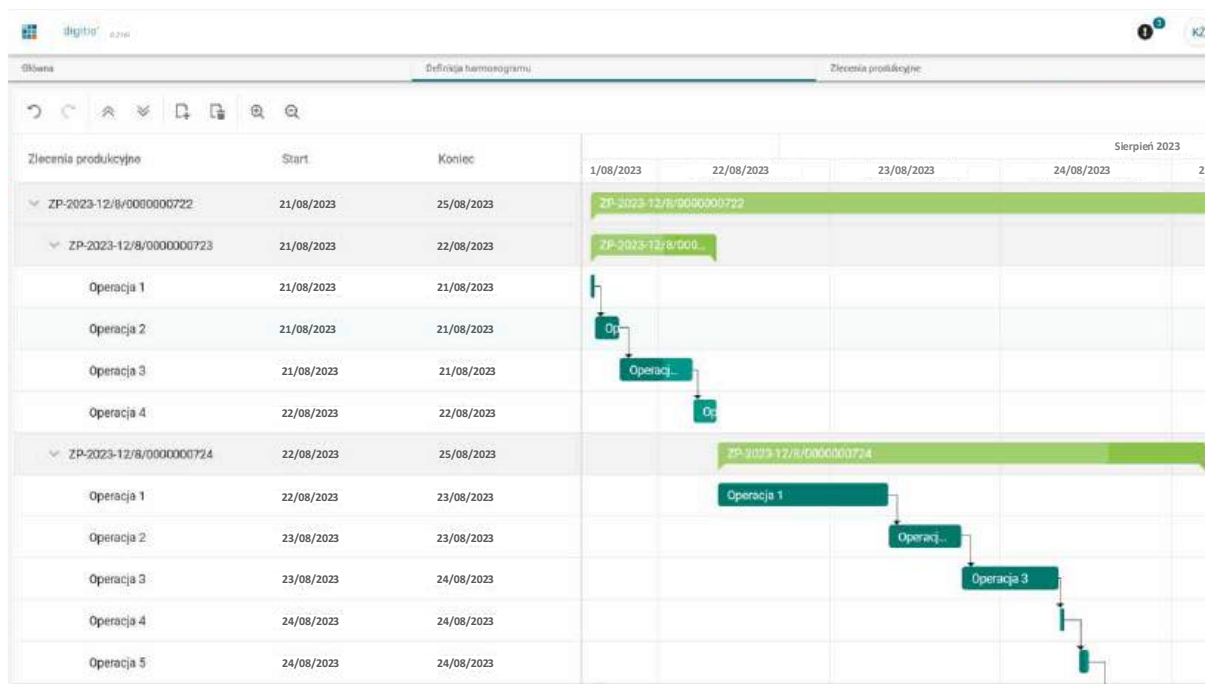
Wdrożony harmonogram produkcji jest zwizualizowany w kilku widokach:

- widok tabelaryczny – prezentujący w kolejnych wierszach realizowane operacje technologiczne zleceń produkcyjnych – umożliwia to dostęp do wszystkich danych danego zlecenia produkcyjnego (rys. 1.4.14),

Symulacja harmonogramu										
Zadania / unrolled (728)										
Zlecenie zadanie										
☐	Data dostawy	Aktywny	Numer zlecenia	*indeks_nazwa ↑	Indeks	Operacja technologiczna	Komórka	Data rozpoczęcia	Data zakończenia	Czas trwania (s)
☐	Q1	Wybierz...	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1
☐	2023-11-09 16:56...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP1	Wycinarka laserowa F	2023-11-09 10:30...	2023-11-09 10:54...	1440
☐	2023-11-09 16:56...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP2	Płoter frezujący Seron	2023-11-09 10:54...	2023-11-09 11:06...	720
☐	2023-11-09 16:56...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP3	Pilarka Panelowa Kap	2023-11-09 11:06...	2023-11-09 11:18...	600
☐	2023-11-09 16:58...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP1	Wycinarka laserowa F	2023-11-09 10:30...	2023-11-09 10:54...	1440
☐	2023-11-09 16:58...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP2	Płoter frezujący Seron	2023-11-09 10:54...	2023-11-09 11:06...	720
☐	2023-11-09 16:58...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP3	Pilarka Panelowa Kap	2023-11-09 11:06...	2023-11-09 11:18...	600
☐	2023-11-10 12:55...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP1	Wycinarka laserowa F	2023-11-10 12:42...	2023-11-10 13:06...	1440
☐	2023-11-10 12:55...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP2	Płoter frezujący Seron	2023-11-10 13:06...	2023-11-10 13:18...	720
☐	2023-11-10 12:55...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP3	Pilarka Panelowa Kap	2023-11-10 13:18...	2023-11-10 13:28...	600
☐	2023-11-10 13:46...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP1	Wycinarka laserowa F	2023-11-10 13:46...	2023-11-10 14:10...	1440
☐	2023-11-10 13:46...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP2	Płoter frezujący Seron	2023-11-10 14:10...	2023-11-10 14:22...	720
☐	2023-11-10 13:46...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP3	Pilarka Panelowa Kap	2023-11-10 14:22...	2023-11-10 14:32...	600
☐	2023-11-10 13:51...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP1	Wycinarka laserowa F	2023-11-10 14:10...	2023-11-10 14:34...	1440
☐	2023-11-10 13:51...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP2	Płoter frezujący Seron	2023-11-10 14:34...	2023-11-10 14:46...	720
☐	2023-11-10 13:51...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP3	Pilarka Panelowa Kap	2023-11-10 14:46...	2023-11-10 14:56...	600
☐	2023-11-10 13:52...	Tak	ZP-2023-11V2V000000664	Indeks TESTOWY12	INDEX TESTOWY12	OP1	Wycinarka laserowa F	2023-11-10 14:34...	2023-11-10 14:58...	1440

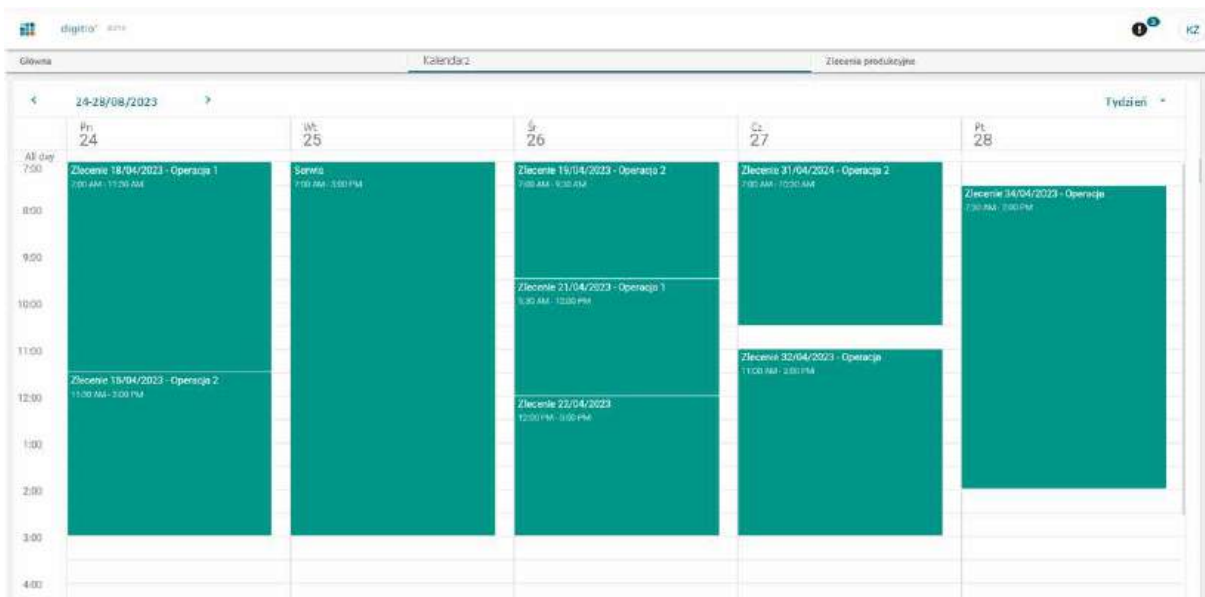
Rys. 1.4.14. Harmonogram realizacji zleceń produkcyjnych.

- widok wykresu Gantta – prezentujący w klasycznym układzie graficznym harmonogram realizacji zleceń produkcyjnych, wykres zawiera także strukturę realizacji zleceń produkcyjnych związaną z kolejnością ich realizowania a także kolejnych operacji procesu technologicznego (rys. 1.4.15),



Rys. 1.4.15. Harmonogram Gantta realizacji zleceń produkcyjnych.

- widok kalendarza – prezentowanie obciążenia komórek produkcyjnych; kalendarz zasobu zawiera wszystkie informacje o operacjach technologicznych danych zleceń produkcyjnych przewidzianych do realizacji (rys. 1.4.16).



Rys. 1.4.16. Kalendarz obciążenia komórek produkcyjnych.

Wprowadzenie kilku form wizualizacji harmonogramu umożliwia szybkie analizowanie danych i szybsze podejmowanie operacyjnych.

Produkcja

Moduł raportowania to osobna aplikacja kliencka służąca do raportowania danych produkcyjnych związanych z realizacją harmonogramu produkcji. Aplikacja pozwala na zbieranie podstawowych danych dotyczących (rys. 1.4.17):

- rozpoczęcia realizacji operacji technologicznej danego zlecenia produkcyjnego,
- zakończenia realizacji operacji technologicznej danego zlecenia produkcyjnego,
- ilości wykonanych wyrobów.

The screenshot shows the 'digitio' application interface. On the left is a sidebar with buttons: 'START' (blue), 'RAPORT CZĘŚCIOWY' (purple), 'POSTÓJ' (red), 'KONIEC' (green), 'SIGMO' (grey), and 'WSTECZ' (grey). The main area is titled 'Zlecenie produkcyjne' and contains the following data:

- nr zlecenia: ZP-2023-10\10\0000000001
- status: Realizacja
- indeks: Noga_kwa_50/50/600
- nazwa: Noga kwadrat 50x50x600
- operacja: Cięcie z profili kwadratowych 50x50x3
- planowana data rozpoczęcia: 2023-10-12 11:00:00.000
- planowana data zakończenia: 2023-10-12 15:10:45.000
- czas trwania:
- ilość zadysponowana: 10
- ilość zrealizowana dobra: 300
- ilość zrealizowana zła: 0
- jednostka: Sztuki
- czas jednostkowy: 00:01:45
- czas przygotowania: 00:24:00
- opis:

At the bottom, there is a section titled 'Oprządkowanie i narzędzia' with a table structure.

1.4.17. Wybrane zlecenie produkcyjne do raportowania

Aplikacja umożliwia także ewidencjonowanie:

- postojów, które pojawiły się w trakcie realizacji zadania produkcyjnego,
- liczby wyrobów wadliwych.

Zebrane dane pozwalają na dokonanie analizy bieżących danych produkcyjnych i porównanie ich z harmonogramem produkcji.

Ważną funkcją modułu są komunikaty (alerty) o wystąpieniu odstępstwa od przyjętych wartości granicznych cech obiektów podlegających monitoringowi. Alerty wyzwalane są automatycznie przez system i wskazują co problem pojawiający się w trakcie realizacji zlecenia produkcyjnego (1.4.18).

ID	*typ_cechy	*numer_zlecenia	*nazwa	*komunikat	
80 120	Wyrób	ZP-2023-11V/2V/0000000644	Zależność	Cecha typu Indeks: Cecha1 cecha pozycji osiągnęła przedział 1.0000 - 15.0000 wartośćią 10.5357269404, Indeks Cecha1 należy zmienić na None Zmień cechę 1 na 2	In
80 119	Wyrób	4/2023	Nominanta	Powyżej wartości maksymalnej przedział od 1000 do 1000. Wykryto: 1009.69290451	El
80 118	Wyrób	ZP-2023-11V/2V/0000000644	Nominanta	Poniżej wartości minimalnej przedział od 12 do 12. Wykryto: 11.8942662231	In
80 117	Wyrób	ZP-2023-11V/24V/0000000653	Nominanta	Poniżej wartości minimalnej przedział od 595 do 605. Wykryto: 594.286042279	In
80 116	Wyrób	ZP-2023-11V/16V/0000000648	Nominanta	Powyżej wartości maksymalnej przedział od 1000 do 1000. Wykryto: 1007.35470167	In
80 115	Wyrób	ZP-2023-11V/2V/0000000644	Nominanta	Powyżej wartości maksymalnej przedział od 1001 do 999. Wykryto: 1009.13852333	In
80 114	Wyrób	ZP-2023-12V/4V/0000000660	Zależność	Cecha typu Indeks: Cecha1 cecha pozycji osiągnęła przedział 1.0000 - 15.0000 wartośćią 10.5742787725, Indeks Cecha1 należy zmienić na None Zmień cechę 1 na 2	In
80 113	Wyrób	ZP-2023-11V/23V/0000000651	Nominanta	Powyżej wartości maksymalnej przedział od 1000 do 1000. Wykryto: 1001.64956137	In
80 112	Wyrób	ZP-2023-11V/24V/0000000644	Nominanta	Poniżej wartości minimalnej przedział od 1495 do 1505. Wykryto: 1485.16986507	In
80 111	Wyrób	ZP-2023-11V/2V/0000000644	Nominanta	Powyżej wartości maksymalnej przedział od 595 do 605. Wykryto: 605.25615555	In
80 110	Wyrób	ZP-2023-11V/24V/0000000652	Nominanta	Powyżej wartości maksymalnej przedział od 1001 do 999. Wykryto: 999.451798523	In
80 109	Wyrób	ZP-2023-11V/24V/0000000652	Nominanta	Poniżej wartości minimalnej przedział od 1001 do 999. Wykryto: 999.451798523	In
80 108	Wyrób	ZP-2023-11V/2V/0000000644	Zależność	Cecha typu Indeks: Wysokość cecha pozycji osiągnęła przedział 95.0000 - 97.0000 wartośćią 95.3582001096, Komórka Prędkość kątowna należy zmienić na 23.0000 test 2	In
80 107	Wyrób	ZP-2023-11V/2V/0000000644	Zależność	Cecha typu Indeks: Cecha1 cecha pozycji osiągnęła przedział 1.0000 - 15.0000 wartośćią 10.5960955644, Indeks Cecha1 należy zmienić na None Zmień cechę 1 na 2	In
80 106	Wyrób	ZP-2023-11V/2V/0000000644	Nominanta	Poniżej wartości minimalnej przedział od 1001 do 999. Wykryto: 997.338107659	In
80 105	Wyrób	ZP-2023-11V/2V/0000000644	Zależność	Cecha typu Indeks: Wysokość cecha pozycji osiągnęła przedział 95.0000 - 97.0000 wartośćią 95.312578329, Komórka Prędkość kątowna należy zmienić na 23.0000 test 2	In

1.4.18. Widok wykazu alertów

Dzięki tej funkcji jest możliwe podjęcie działań przez użytkownika w celu wyeliminowania odstępstwa/problemu.

Analiza danych

Moduł umożliwia dokonywanie analiz danych produkcyjnych poprzez zastosowanie narzędzi statystycznych i metod wspomagania decyzji. Analiza danych może dotyczyć:

- jakości wyrobów (indeksów produkcyjnych i zakupowych),
- jakości procesów,
- maszyn – monitoring,
- oprzyrządowania – monitoring.

Definiowane są cechy pomiarowe, którym nadaje się typ. Każda grupa ma zdefiniowane konkretne narzędzia w odniesieniu do typu cechy. Użytkownik decyduje, które narzędzia z danej grupy będą stosowane do analizy. Użytkownik może wybrać dowolną liczbę narzędzi z dowolnej liczby grup. Każde narzędzie ma przypisany algorytm obliczeniowy lub decyzyjny lub postać graficzną.

Źródłem danych do przeprowadzenia analiz z zastosowaniem wskazanych metod mogą być (rys. 1.4.19):

- pomiary dokonywane manualnie przez pracowników,
- sygnały z czujników pomiarowych,
- zewnętrzne bazy danych.

1.5. Wdrożenie systemu Digitio Factory w przedsiębiorstwie Bluebird Design

Pierwsze wdrożenie systemu Digitio nastąpiło w przedsiębiorstwie Blue Bird Design. Przedmiotem działalności przedsiębiorstwa jest produkcja tapet ściennych, plakatów i innych elementów dekoracyjnych. Przedmiotem produkcji są wyroby projektowane według indywidualnych wymagań klienta.

W wyniku wdrożenia osiągnięto poprawę przepływu produkcji a tym samym realizacji zleceń produkcyjnych. Do najważniejszych efektów wdrożenia można zaliczyć:

- poprawa procesów planowania i harmonogramowania produkcji – możliwość opracowywania wariantów harmonogramu produkcji uwzględniających wymagania klientów oraz dostępność zasobów produkcyjnych; zastosowanie algorytmu grupującego zlecenia pod względem podobieństwa wybranych cech wyrobów wpłynęło na poprawę czasów realizacji zleceń produkcyjnych, bez konieczności długotrwałego przezbrajania maszyn, taka zmiana procesowa umożliwiła również osiągnięcie lepszego zarządzania pracą operatorów, uniezależnienie ich działań od subiektywnego decydowania o kolejności oraz lepszą kontrolę jakości i efektów ich pracy,
- zwiększenia efektywności zarządzania materiałem wymaganym do produkcji - przed wdrożeniem systemu kontrola dostępności oraz ilości surowca wykorzystanej do produkcji zależny był od wskazań operatorów dokonywanych post factum, to znaczy w momencie zbiorczego podsumowania prac wykonanych w konkretnej zmianie produkcyjnej; zastosowanie systemu informatycznego doprowadziło do zwiększenia precyzji obliczeń, które są na bieżąco podczas realizacji zleceń produkcyjnych; taka forma zwiększonej kontroli materiałów pozwala lepiej zarządzać ich dostawami do komórek produkcyjnych; wyeliminowano problem rozpoczęcia produkcji bez właściwego zabezpieczenia materiałowego,
- poprawa kontroli jakości wyrobów - określono czynniki wpływające na powstawanie błędów jakościowych; zidentyfikowane główne obszary i objęto je wsparciem informatycznym; były to przede wszystkim: kontrola profili kolorystycznych związanych z wydrukiem na konkretnej maszynie drukarskiej, z wykorzystaniem konkretnego materiału i innych kluczowych parametrów druku oraz kontrola narzędzi wykorzystywanych podczas cięcia po wydruku na, umożliwiające dostosowanie wydruku do wymagań klienta,

Poniżej przedstawiono wyniki weryfikacyjne dotyczące porównania czasów realizacji zleceń produkcyjnych realizowanych bez wsparcia informatycznego oraz z zastosowaniem systemu Digitio. Wymierne rezultaty wdrożenia, wyrażone w skróconym czasie produkcji to tylko część korzyści z wdrożenia. Kompletnie zestawienie korzyści zostało przedstawiono powyżej.

Tabela. 1.1. Porównanie realizacji zleceń produkcyjnych – zbiór 1.

Zlecenie produkcyjne ZBIÓR 1	Wyrób	Stan aktualny	Po wdrożeniu systemu Digitio
		Czas realizacji [min]	Czas realizacji [min]
ZP-2023-12\6\0000000048	Tapeta - Fizelina strukturalna piasek - 1/1,5 m (BB-000013)	246	194,5
ZP-2023-12\6\0000000049	Tapeta - Fizelina strukturalna piasek - 0,5/3 m (BB-000012)	83	62,5
ZP-2023-12\6\0000000050	Tapeta - Fizelina strukturalna piasek - 1/3 m (BB-000016)	310	239

W pierwszym analizowanym zbiorze zleceń produkcyjnych osiągnięto skrócenie czasu realizacji zbioru zleceń produkcyjnych na poziomie 23%. W kolejnym zbiorze analizowanych zleceń produkcyjnych skrócenie czasu realizacji wynikające z realizacji wspartej systemem Digitio wyniosło 20%.

Tabela. 1.2. Porównanie realizacji zleceń produkcyjnych – zbiór 2.

Zlecenie produkcyjne ZBIÓR 2	Wyrób	Stan aktualny	Po wdrożeniu systemu Digitio
		Czas realizacji [min]	Czas realizacji [min]
ZP-2023-12\6\0000000051	Tapeta - Fizelina strukturalna piasek - 1/3 m (BB-000016)	175	143
ZP-2023-12\6\0000000052	Tapeta - Fizelina strukturalna piasek - 1/3 m (BB-000016)	309	249
ZP-2023-12\6\0000000053	Tapeta - Fizelina strukturalna beton - 1/1,5 m (BB-000021)	206	159

Tabela. 1.3. Porównanie realizacji zleceń produkcyjnych – zbiór 3.

Zlecenie produkcyjne ZBIÓR 3	Indeks	Stan aktualny	Po wdrożeniu systemu Digitio
		Czas realizacji [min]	Czas realizacji [min]
ZP-2023-12\6\0000000056	Tapeta - Fizelina gładka - 1/3 m (BB-000008)	365	301
ZP-2023-12\6\0000000057	Tapeta - Fizelina strukturalna beton - 0,5/3 m (BB-000020)	329	265,5
ZP-2023-12\6\0000000058	Tapeta - Fizelina strukturalna beton - 0,5/1,5 m (BB-000017)	220	178

Trzeci zbiór to również skrócenie czasu realizacji zleceń produkcyjnych na poziomie 19,6%.

Wdrożenie pilotażowe pozwoliło na analizę stosowania systemu informatycznego w warunkach losowo pojawiających się zakłóceń zewnętrznych i wewnętrznych. Między innymi aby sprawdzić poprawność funkcjonowania algorytmów decyzyjnych wprowadzano „sztuczne” zakłócenia w realizacji procesów produkcyjnych. Potwierdzono właściwe wyzwalanie algorytmów decyzyjnych na pojawiające się czynniki zakłócające,

zwłaszcza w obszarze działania reguł systemu eksperckiego wspomagającego przepływ produkcji. Ocena końcowa przeprowadzonych testów jest pozytywna, zarówno z perspektywy HIT-Kody Kreskowe (wykonawca systemu Digitio), jak i Blue Bird (klient/użytkownik systemu). Testy wdrożeniowe potwierdziły także poprawne funkcjonowanie interfejsów komunikacyjnych (interfejsy API) w obszarze akwizycji danych z maszyn i urządzeń komunikacyjnych.

Uzyskane efekty w postaci skrócenia czasu realizacji zleceń produkcyjnych nie odzwierciedlają w pełni wszystkich korzyści związanych z wdrożeniem systemu Digitio. Wdrożenie systemu wpłynęło na ogólnie rozumianą świadomość wśród pracowników produkcyjnych w zakresie odpowiedzialności powierzonych im zadań. Wprowadzenie ustanowionych zasad planowania i sterowania przepływem produkcji pozwoliło przede wszystkim na poprawę stabilności procesów a tym samym na efektywność procesów produkcyjnych.

1.6. Podsumowanie

Celem projektu było opracowanie nowego innowacyjnego produktu w postaci systemu informatycznego umożliwiającego aktywne sterowanie produkcją poprzez dynamiczne harmonogramowanie produkcji oraz bieżące monitorowanie parametrów przepływu materiałów i procesów ich analizę oraz podejmowanie decyzji z zastosowaniem metod symulacyjnych oraz wspomagania decyzji. Podstawą funkcjonowania systemu jest koncepcja Digital Twin. Do głównych funkcji systemu można zaliczyć:

Cyfrowe odwzorowanie przepływu produkcji w procesach produkcyjnych

Architektura systemu pozwala w elastyczny sposób konfigurować system w zakresie cyfrowego odwzorowania rzeczywistego procesu produkcyjnego. Możliwe jest poprzez zdefiniowane obiekty opracowanie workflow procesu i przypisać odpowiednie metody/reguły harmonogramowania i wspomagania decyzji.

Zastosowanie koncepcji Digital Twin umożliwia podejmowanie bardziej optymalnych decyzji produkcyjnych co bezpośrednio przekłada się na wymierne efekty w postaci zwiększenia dostępności zasobów produkcyjnych oraz skrócenia czasów przepływu materiałów w procesie produkcyjnym. Uwzględnienie w procesie podejmowania decyzji wielu czynników związanych z bieżącą realizacją rzeczywistych procesów produkcyjnych pozwoli na aktywne sterowanie przepływem produkcji (np. czas rozpoczęcia i zakończenia operacji produkcyjnych, wykonawcę, stanowiska produkcyjne, liczbę sztuk wykonanych, liczbę sztuk wadliwych, liczbę sztuk naprawialnych, czas wykonania zadania produkcyjnego. A to bezpośrednio wpływa na wzrost konkurencyjności przedsiębiorstw.

Wariantowe harmonogramowanie produkcji z oceną wielokryterialną

W ramach funkcji systemu możliwe jest opracowanie harmonogramu produkcji z zastosowaniem algorytmów decyzyjnych wspieranych systemem ekspertowym oraz metodami wielokryterialnego wspomagania decyzji. W wyniku zbieranych danych na

temat stanu realizowanych zleceń produkcyjnych możliwe jest ich bieżące analizowanie i wskazywanie zagrożeń (np. nieterminowa realizacja zleceń produkcyjnych, przekroczenie czasu realizacji zleceń produkcyjnych). System umożliwia w sposób automatyczny generowanie wariantów harmonogramów produkcji i wskazuje najlepsze możliwe rozwiązanie.

Metody te pozwolą także na wskazanie możliwych rozwiązań pozwalających na eliminowanie zagrożeń lub zmniejszenie ich negatywnych skutków. Na podstawie tych informacji z zastosowaniem cyfrowego odwzorowania procesów produkcyjnych możliwe jest poprzez zastosowanie koncepcji metod symulacyjnych wskazać także zagrożenia i warianty alternatywne dla realizacji przepływu produkcji. Pozwala to w aktywny sposób harmonogramować przepływem produkcji.

Sterowanie procesem produkcyjnym w oparciu

o informacje dotyczące aktualnego stanu realizacji zleceń produkcyjnych

System umożliwia bieżącą analizę stanu realizacji harmonogramu produkcji. W wyniku cyfrowego odwzorowania procesów produkcyjnych możliwe jest automatyczne określenie prognozowanych efektów/wyników związanych z realizacją zleceń produkcyjnych. Analizy są inicjowane automatycznie w wyniku pojawienia się np. zakłóceń w realizowanym procesie produkcyjnym np. opóźnienie w realizacji operacji technologicznej w komórce produkcyjnej, potencjalne opóźnienie w wyniku zmiany parametrów pracy maszyn, zagrożenia związane z uzyskaniem wyrobów zgodnych jakościowo.

W przypadku pojawienia się konieczności zmiany harmonogramu poprzez zastosowanie systemu eksperckiego dobór reguł pozwalających przeanalizować różne warianty harmonogramu produkcji przybliżające do celów określonych w pierwotnej jego wersji. Proces ten będzie realizowany w sposób automatyczny. Zakłada się funkcjonalność pozwalającą zdefiniować częstotliwość dokonywanych zmian - jest to związane z koniecznością dostosowania się do różnej charakterystyki procesów produkcyjnych w systemach produkcyjnych klientów, głównie ze względu na czas cyklu procesu - im krótszy tym częstotliwość zmian powinna być większa.

W ten sposób możliwe jest uniknięcie nieprawidłowych i nie efektywnych decyzji operacyjnych związanych z realizacją zleceń produkcyjnych.

2. Reguły wyboru metod sterowania przepływem produkcji z uwzględnieniem popytu oraz struktury wyrobów i procesów technologicznych

2.1. Wprowadzenie

Osiągnięcie naukowe jest wynikiem zrealizowanych projektów:

1. Opracowanie i wdrożenie systemu organizacyjnego produkcji w nowym zakładzie produkcyjnym.

Projekt zrealizowany dla przedsiębiorstwa Fabryka Armatur „Swarzędz” sp. z o.o. i finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

Rola habilitanta w projekcie:

- Kierownik projektu
- Wkład własny: Jest głównym pomysłodawcą projektu i planu badań. W ramach projektu dokonałem analizy stanu obecnego systemu produkcyjnego w zakresie zapotrzebowania na wyroby i materiały, procesów technologicznych. Wykonałem mapy strumieni wartości stanu obecnego i dokonałem ich analizy. Zaproponowałem i opracowałem nowe metody sterowania przepływem produkcji dla wydzielonych rodzin wyrobów i opracowałem mapy strumienia wartości stanu przyszłego. Uczestniczyłem w opracowaniu planu badań weryfikacyjnych i wdrożeniowych. Przeprowadziłem weryfikację wdrożonych rozwiązań sterowania przepływem produkcji.

2. Opracowanie i wdrożenie systemu sterowania produkcją wieloasortymentową. Projekt zrealizowany dla przedsiębiorstwa Domex sp. z o.o. i finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Rola habilitanta w projekcie:

- Kierownik projektu
- Wkład własny: Jest głównym pomysłodawcą projektu i planu badań. W ramach projektu dokonałem analizy stanu obecnego systemu produkcyjnego w zakresie zapotrzebowania na wyroby i materiały, procesów technologicznych. Wykonałem mapy strumieni wartości stanu obecnego i dokonałem ich analizy. Zaproponowałem i opracowałem nowe metody sterowania przepływem produkcji dla wydzielonych rodzin wyrobów i opracowałem mapy strumienia wartości stanu przyszłego. Uczestniczyłem w opracowaniu planu badań weryfikacyjnych i wdrożeniowych. Przeprowadziłem weryfikację wdrożonych rozwiązań sterowania przepływem produkcji.

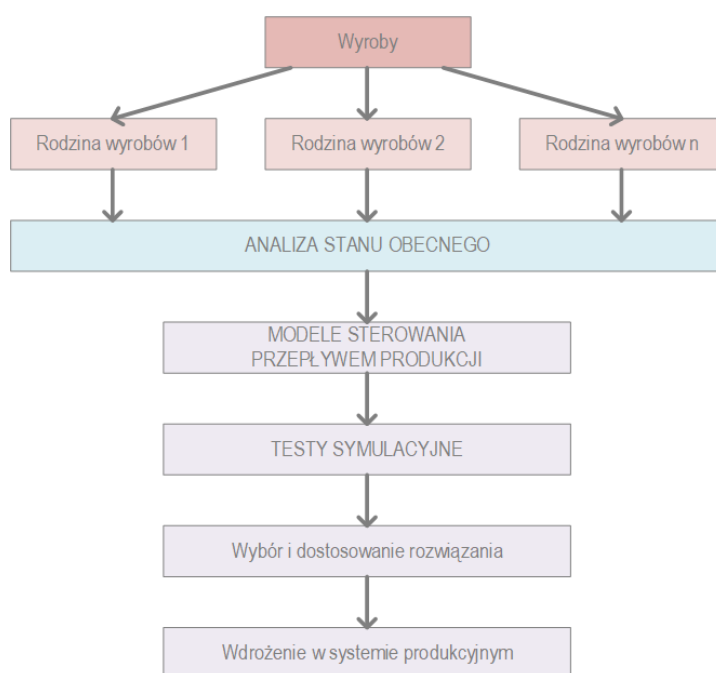
Głównym celem zrealizowanych prac badawczych w ramach wskazanych projektów była poprawa efektywności przepływu produkcji poprzez opracowanie nowych rozwiązań i wdrożenie ich w systemach produkcyjnych. Bezpośrednim powodem

podjęcia takich działań rosnącą presją konkurencji oraz coraz bardziej zmienne wymagania klientów.

Projekty były realizowane w następujących etapach:

- analiza stanu obecnego – dotycząca analizy kluczowych czynników mających wpływ na organizację przepływu produkcji: procesów technologicznych, zapotrzebowania na wyroby i materiały, przepływ materiałów i informacji,
- opracowanie wariantów modeli sterowania przepływem produkcji – rozwiązania początkowe bazowały na znanych metodach sterowania, które podlegały dostosowaniu do specyfiki danego procesu produkcyjnego i przedsiębiorstwa,
- testy symulacyjne wariantów modeli sterowania przepływem produkcji – testy były realizowane w formie symulacyjnej ale w warunkach produkcyjnych; wyniki testów pozwoliły na wybór najlepszego rozwiązania,
- wdrożenie i testy weryfikacyjne wybranego rozwiązania sterowania przepływem produkcji w warunkach rzeczywistych – wybrane rozwiązanie podlegało opracowaniu niezbędnych dokumentów, narzędzi, środków technicznych a następnie wdrożone w warunkach produkcyjnych; w okresie testowym wprowadzono niezbędne modyfikacje i analizowano parametry funkcjonowania rozwiązania w celu porównania z wartościami bazowymi.

Etapy prac badawczych były realizowane dla rodzin wyrobów, które zostały wyodrębnione na podstawie przeprowadzonej analizy procesów technologicznych. Jako rodzinę przejęto wyroby odznaczające się podobieństwem marszruty procesu technologicznego. W takim przypadku przepływ produkcji jest realizowany przez te same komórki produkcyjne (stanowiska, gniazda, itp.), dzięki temu możliwe było opracowanie dedykowanych rozwiązań sterowania pozwalających uzyskać wzrost efektywności produkcji (rys. 2.1.1).



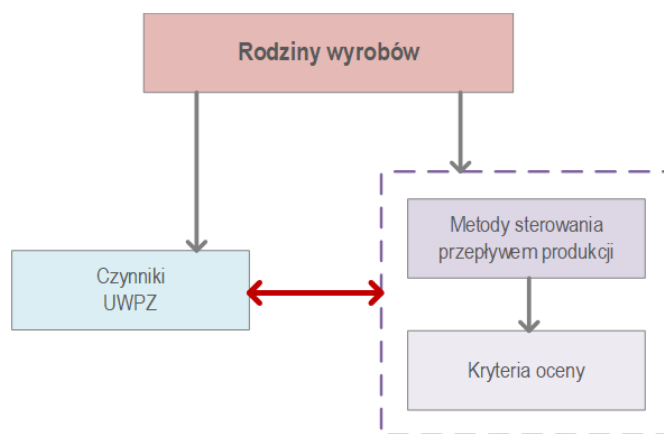
Rys. 2.1.1. Etapy realizacji prac badawczych.

Podczas realizacji poszczególnych etapów stosowano metody i narzędzia różnych koncepcji zarządzania produkcją, np. lean manufacturing, teoria ograniczeń. Były one stosowane do przeprowadzenia analiz i zaprojektowania rozwiązań doskonalących, np.: analiza ABC, mapowanie strumienia wartości. Opracowano także autorskie rozwiązanie informatyczne pozwalające na analizę danych produkcyjnych.

Opracowane i wdrożone rozwiązania sterowania przepływem produkcji będące przedmiotem wskazanych projektów pozwoliły na poprawę efektywności produkcji i tym samym zakończyły się sukcesem. W opracowaniu przedstawiono główne informacje dotyczące zakresu merytorycznego zrealizowanych projektów.

2.2. Analiza relacji determinantów procesów produkcyjnych oraz metod sterowania przepływem produkcji

Realizacja wskazanych projektów i uzyskane w nich wyniki zmotywowały habilitanta do przeprowadzenia analizy porównawczej metod sterowania przepływem produkcji z uwzględnieniem uwarunkowań związanych z czynnikami określającymi strukturę wyrobów, strukturę procesów technologicznych oraz zamówienia klientów (uwarunkowania wyrobów, procesów i zamówień - UWPZ). Celem analizy była próba określenia ogólnych reguł ułatwiających dobór metody sterowania przepływem produkcji najbardziej odpowiedniej dla danych uwarunkowań procesów produkcyjnych (rys. 2.2.2).



Rys. 2.2.2. Schemat oceny relacji determinantów procesów produkcyjnych i metod sterowania przepływem produkcji

W analizie uwzględniono następujące metody sterowania przepływem produkcji:

- push – harmonogram – przepływ materiałów jest realizowany na podstawie harmonogramów produkcji bez uwzględniania aktualnego zapotrzebowania kooperujących ze sobą stanowisk produkcyjnych,
- pull, typu supermarket – przepływ materiałów odbywa się na podstawie rzeczywistego zużycia materiałów, części i wyrobów w supermarkecie stanowiącym zapas pomiędzy kooperującymi komórkami produkcyjnymi,
- pull sekwencyjny – przepływ odbywa się według ustalonej sekwencji produkcji, ale z kontrolą ilości części pomiędzy komórkami produkcyjnymi,

- pull mieszany – przepływ materiałów jest realizowany poprzez metodę pull typu supermarket oraz pull sekwencyjny,
- werbel-bufor-lina – przepływ jest regulowany z uwzględnieniem wąskiego gardła w procesie produkcyjnym.

Analizę przeprowadzono dla pięciu, z trzydziestu jeden rodzin wyrobów, będących przedmiotem realizacji wskazanych projektów badawczych. Przy ich wyborze kierowano się zróżnicowaniem charakterystyki konstrukcyjnej wyrobów, procesów technologicznych wytwarzania oraz zapotrzebowania ze strony odbiorców.

Jako czynniki określające UWPZ przyjęto:

- liczbę części składowych wyrobów gotowych w danej rodzinie wyrobów, z uwzględnieniem:
 - średniej liczby części,
 - rozpiętości liczby części,
- liczbę operacji technologicznych w procesie technologicznym,
- liczbę stanowisk produkcyjnych współdzielonych w procesach produkcji,
- czas jednostkowy operacji technologicznych, z uwzględnieniem:
 - czasu średniego czasu jednostkowego dla procesów w danej rodzinie wyrobów,
 - rozpiętości czasów jednostkowych,
 - czasu technologicznego - suma czasów jednostkowych,
- średnie dzienne zapotrzebowanie na wyroby,
- średnia częstotliwość zamówień na wyroby.

Jako kryteria oceny przyjęto:

- czas przejścia materiału w procesie produkcyjnym – *lead time* – określający czas „pobytu” materiału w systemie produkcyjnym od przyjęcia surowca do wysyłki wyrobów gotowych,
- całkowity zapas międzyoperacyjny w procesie produkcyjnym.

W tabeli 2.2.1 przedstawiono zestawienie wartości czynników UWPZ dla analizowanych rodzin wyrobów.

Tabela 2.2.1. Wartości czynników dla analizowanych rodzin wyrobów

		Rodzina wyrobów				
		Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III	Zawory Z6	Korpusy wodomierzy
Liczba części [szt.]	Średnia	4	4	6	2	1
	Rozpiętość	4	1	2	0	0
Stanowiska produkcyjne współdzielone	Liczba stanowisk	3	3	4	1	0
Czas jednostkowy operacji technologicznych [s]	Średnia	386	1 885	2 814	12	8
	Rozpiętość	930	5 670	10 400	58	22
	Suma (czas technologiczny)	5 017	33 930	67 540	137	65
Liczba operacji technologicznych		13	20	24	13	8
Średnie dzienne zapotrzebowanie [szt.]		1	10	120	4000	7500
Średnia częstotliwość zamówień [dni]		10	15	28	60	65

Jako kryteria oceny przyjęto wskaźniki: zapasy międzyoperacyjne i czas przejścia (lead time).

Wartości wskaźników uzyskane w produkcji wybranych rodzin wyrobów przy zastosowaniu wskazanych metod sterowania przepływem produkcji przedstawiono w tabeli 2.2.2.

Tabela 2.2.2. Wartości wskaźników oceny metod sterowania przepływem produkcji

Metoda sterowania przepływem produkcji	Wskaźnik	Rodzina wyrobów				
		Korpusy wodomierzy	Zawory Z6	Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III
push – harmonogram	Zapasy [szt.]	267 970	217 195	57	154	274
	Czas przejścia [dni]	35,7	32	9,2	18,4	21,3
pull typu supermarket	Zapasy [szt.]	144 290	98 620	105	195	315
	Czas przejścia [dni]	22,1	16,5	15,6	23,2	25,6
pull sekwencyjny	Zapasy [szt.]	184 900	138 800	89	132	252
	Czas przejścia [dni]	26,4	19,7	10,9	13,1	15,7
pull mieszany	Zapasy [szt.]	120 630	84 960	96	176	290
	Czas przejścia [dni]	21,6	15,4	12,7	21,8	27,9
werbel-bufor-lina	Zapasy [szt.]	165 720	110 700	72	119	221
	Czas przejścia [dni]	24,6	18,2	7,4	16,9	18,5

W celu określenia wpływu metody sterowania przepływem produkcji na przyjęte kryteria oceny, w zależności od UWPZ, przyjęto metodę rangowania. Zastosowano skalę pięciostopniową(1-5), przy czym wartość 1 wskazuje, że dana metoda sterowania pozwala uzyskać w rozpatrywanych warunkach produkcyjnych najlepsze efekty.

Rodziny wyrobów zostały uszeregowane dla danego czynnika UWPZ, od jego wartości najmniejszej do największej. Wyniki rangowania metod sterowania przepływem produkcji, kolejno dla badanych czynników UWPZ, przedstawiono w postaci tabelarycznej oraz wykresu. **Poniżej przedstawiono zauważalne zależności dla wzrastającej wartości danego czynnika UWPZ.**

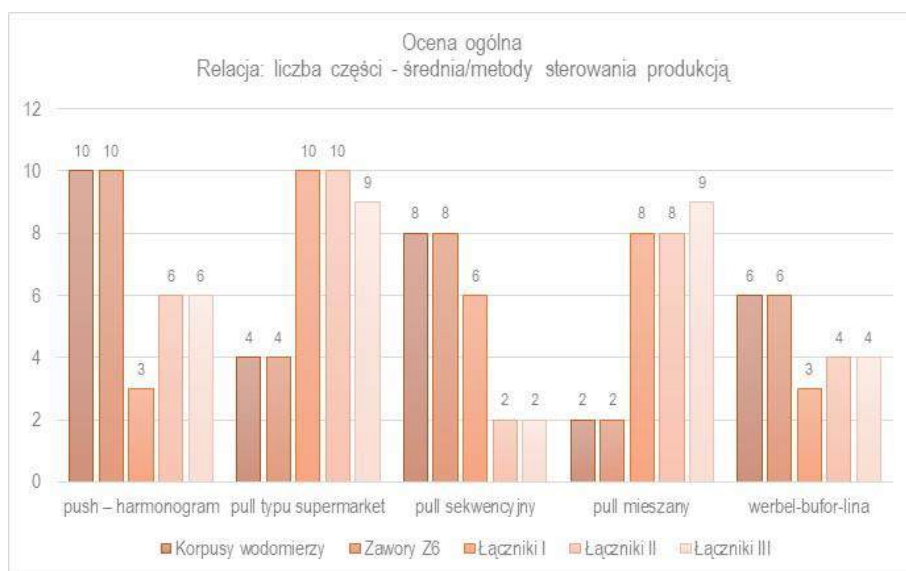
Liczba części składowych wyrobów gotowych

Wzrost średniej liczby części składowych wyrobów wpływa na (tab. 2.2.3):

- mniejsze zapasy międzyoperacyjne w przypadku stosowania metod pull sekwencyjny i werbel-bufor-lina ,
- wzrost zapasów międzyoperacyjnych w przypadku stosowania metod pull typu supermarket i pull mieszany.
- zmniejszanie czasu przejścia materiału dla metody pull sekwencyjny.

Tabela 2.2.3. Zależności między metodami sterowania przepływem produkcji a średnią liczbą części w wyrobie.

Wskaźnik	Metoda sterowania przepływem produkcji	Korpusy wodomierzy	Zawory Z6	Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III
		Czynnik				
		Liczba części - średnia				
		1	2	4	4	6
Zapasy	push – harmonogram	5	5	1	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	5
	pull sekwencyjny	4	4	3	2	2
	pull mieszany	1	1	4	4	4
	werbel-bufor-lina	3	3	2	1	1
Czas przejścia	push – harmonogram	5	5	2	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	4
	pull sekwencyjny	4	4	3	1	1
	pull mieszany	1	1	4	4	5
	werbel-bufor-lina	3	3	1	2	2
Ocena ogólna	push – harmonogram	10	10	3	6	6
	pull typu supermarket	4	4	10	10	9
	pull sekwencyjny	8	8	6	3	3
	pull mieszany	2	2	8	8	9
	werbel-bufor-lina	6	6	3	3	3



Rys. 2.2.3. Ocena ogólna relacji czynnika średnia liczba części i metod sterowania przepływem produkcji

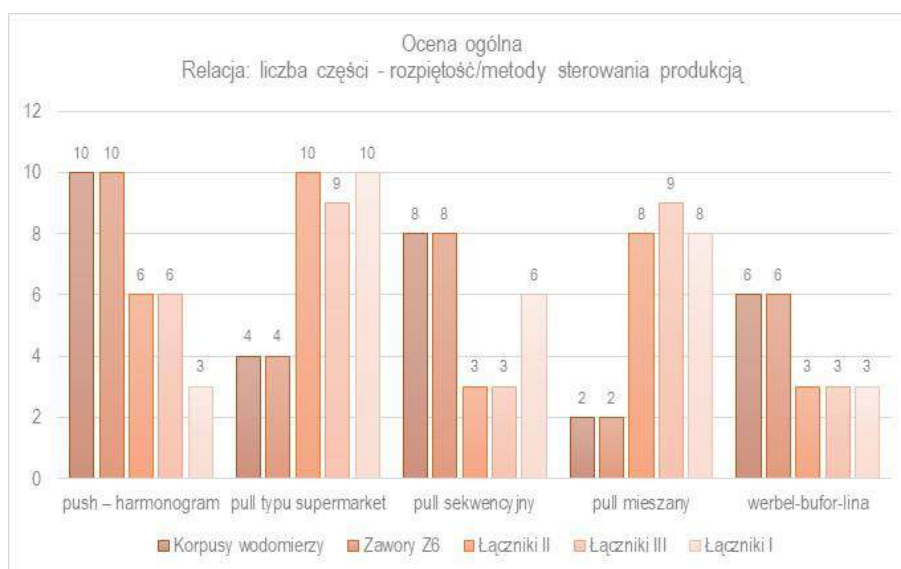
Uogólniając, wraz ze wzrostem średniej liczby części w wyrobach, zastosowanie metod pull typu supermarket oraz pull mieszany powoduje pogorszenie wartości kryteriów oceny. Natomiast metoda pull sekwencyjny pozwala na ich poprawę. W przypadku pozostałych metod nie występują jednoznaczne relacje (rys. 2.2.3).

Wzrost rozpiętości liczby części składowych wyrobów wpływa na (tab. 2.2.4):

- wzrost zapasów międzyoperacyjnych w przypadku stosowania metod pull typu supermarket oraz pull mieszany,
- tendencję malejącą czasu przejścia materiału w przypadku metod push – harmonogram oraz werbel-bufor-lina.

Tabela 2.2.4. Zależności między metodami sterowania produkcją a liczbą części składowych wyrobów gotowych – rozpiętość

Wskaźnik	Metoda sterowania przepływem produkcji	Korpusy wodomierzy	Zawory Z6	Łączniki II	Łączniki III	Łączniki I
		Czynnik				
		Liczba części – rozpiętość				
		0	0	1	2	4
Zapasy	push – harmonogram	5	5	3	3	1
	pull typu supermarket	2	2	5	5	5
	pull sekwencyjny	4	4	2	2	3
	pull mieszany	1	1	4	4	4
	werbel-bufor-lina	3	3	1	1	2
Czas przejścia	push – harmonogram	5	5	3	3	2
	pull typu supermarket	2	2	5	4	5
	pull sekwencyjny	4	4	1	1	3
	pull mieszany	1	1	4	5	4
	werbel-bufor-lina	3	3	2	2	1
Ogólna ocena	push – harmonogram	10	10	6	6	3
	pull typu supermarket	4	4	10	9	10
	pull sekwencyjny	8	8	3	3	6
	pull mieszany	2	2	8	9	8
	werbel-bufor-lina	6	6	3	3	3



Rys. 2.2.4. Ocena ogólnej relacji czynnika rozpiętości liczby części i metod sterowania przepływem produkcji

Uogólniając, wraz ze wzrostem średniej liczby części w wyrobach zastosowanie metod pull typu supermarket oraz pull mieszany powoduje pogorszenie wartości kryteriów oceny. Natomiast metody push-harmonogram i werbel-bufor-lina pozwalają na ich poprawę. W przypadku pozostałych metod nie występują jednoznaczne relacje (rys. 2.2.4).

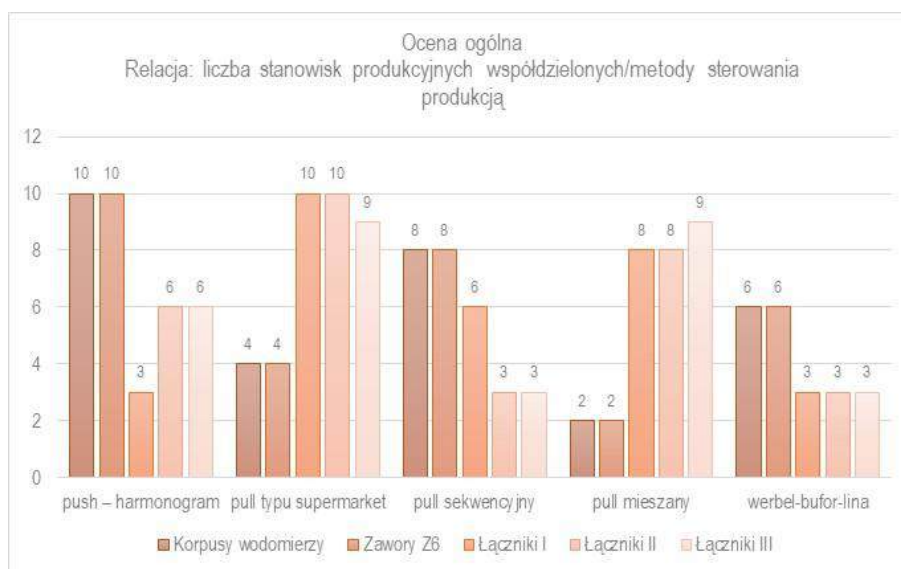
Liczba stanowisk produkcyjnych współdzielonych

Wzrost liczby stanowisk produkcyjnych współdzielonych wpływa na (tab. 2.2.5):

- wzrost zapasów międzyoperacyjnych w przypadku zastosowania metod pull typu supermarket oraz pull mieszany,
- zmniejszanie czasu przejścia materiału przy zastosowaniu metody pull sekwencyjny.

Tabela 2.2.5. Zależności między metodami sterowania produkcją a liczbą stanowisk produkcyjnych współdzielonych w procesie produkcji

Wskaźnik	Metoda sterowania przepływem produkcji	Korpusy wodomierzy	Zawory Z6	Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III
		Czynnik				
		Liczba stanowisk produkcyjnych współdzielonych				
		0	1	3	3	4
Zapasy	push – harmonogram	5	5	1	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	5
	pull sekwencyjny	4	4	3	2	2
	pull mieszany	1	1	4	4	4
	werbel-bufor-lina	3	3	2	1	1
Czas przejścia	push – harmonogram	5	5	2	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	4
	pull sekwencyjny	4	4	3	1	1
	pull mieszany	1	1	4	4	5
	werbel-bufor-lina	3	3	1	2	2
Ogólna ocena	push – harmonogram	10	10	3	6	6
	pull typu supermarket	4	4	10	10	9
	pull sekwencyjny	8	8	6	3	3
	pull mieszany	2	2	8	8	9
	werbel-bufor-lina	6	6	3	3	3



Rys. 2.2.5. Ocena ogólnej relacji czynnika liczba stanowisk produkcyjnych współdzielonych i metod sterowania przepływem produkcji

Uogólniając, wraz ze wzrostem średniej liczby części w wyrobach zastosowanie metod pull typu supermarket oraz pull mieszany powoduje pogorszenie wartości kryteriów oceny. Natomiast metody pull sekwencyjny i werbel-bufor-lina pozwalają na ich poprawę. W przypadku pozostałych metod nie występują jednoznaczne relacje (rys. 2.2.5).

Czas jednostkowy operacji technologicznych

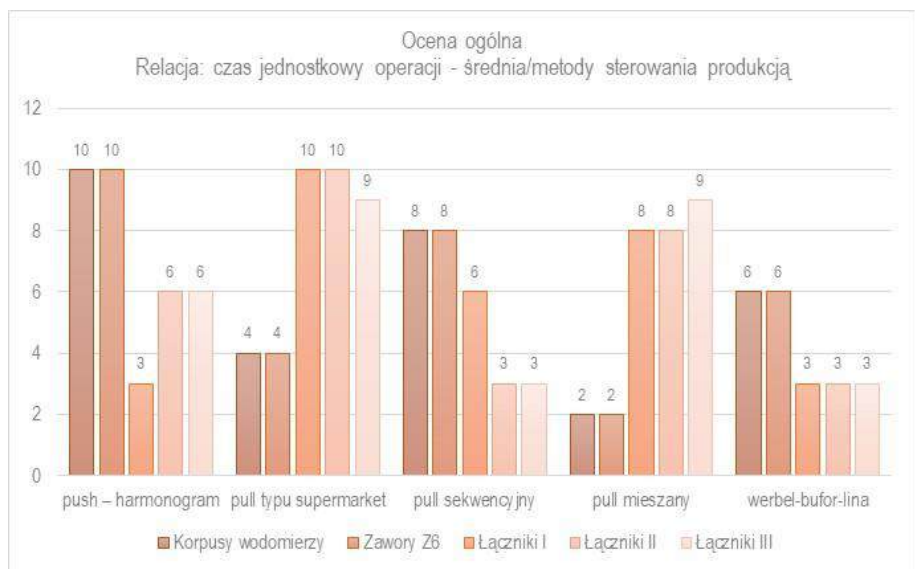
Wzrost średniego czasu jednostkowego operacji technologicznych wpływa na (tab. 2.2.6):

- uzyskanie coraz mniejszych wartości zapasów międzyoperacyjnych przy stosowaniu metody pull sekwencyjny oraz werbel-bufor-lina,
- wzrost czasu przejścia materiału w przypadku metody pull mieszany.

Tabela 2.2.6. Zależności między metodami sterowania produkcją a czasem jednostkowym operacji technologicznych – wartość średnia.

Wskaźnik	Metoda sterowania przepływem produkcji	Korpusy wodomierzy	Zawory Z6	Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III
		Czynnik				
		Czas jednostkowy [s] – średnia				
		8	12	386	1885	2814
Zapasy	push – harmonogram	5	5	1	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	5
	pull sekwencyjny	4	4	3	2	2
	pull mieszany	1	1	4	4	4
	werbel-bufor-lina	3	3	2	1	1
Czas przejścia	push – harmonogram	5	5	2	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	4
	pull sekwencyjny	4	4	3	1	1
	pull mieszany	1	1	4	4	5
	werbel-bufor-lina	3	3	1	2	2
Ogólna ocena	push – harmonogram	10	10	3	6	6
	pull typu supermarket	4	4	10	10	9
	pull sekwencyjny	8	8	6	3	3
	pull mieszany	2	2	8	8	9
	werbel-bufor-lina	6	6	3	3	3

Można stwierdzić, że wraz ze wzrostem średniej liczby części w wyrobach zastosowanie metod pull typu supermarket oraz pull mieszany powoduje pogorszenie wartości kryteriów oceny. Natomiast metody pull sekwencyjny i werbel-bufor-lina pozwalają na ich poprawę. W przypadku pozostałych metod nie występują jednoznaczne relacje (rys. 2.2.6).



Rys. 2.2.6. Ocena ogólnej relacji średni czas jednostkowy operacji technologicznych i metod sterowania przepływem produkcji

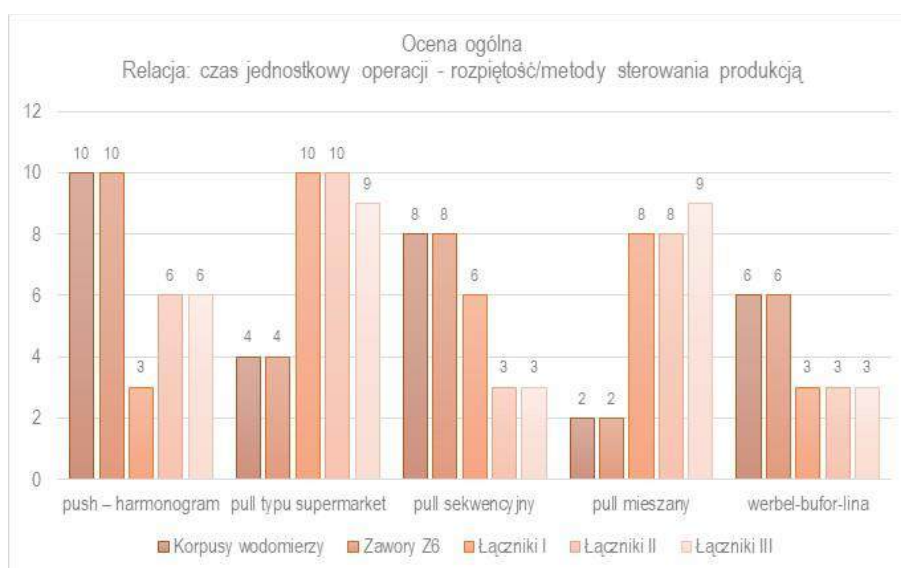
Wzrost rozpiętości czasu jednostkowego operacji technologicznych wpływa na (tab. 2.2.7):

- zmniejszanie wartości zapasów międzyoperacyjnych w przypadku metod pull sekwencyjny oraz werbel-bufor-lina,

- wzrost czasu przejścia materiału w przypadku metody pull mieszany.

Tabela 2.2.7. Zależności między metodami sterowania produkcją a czasem jednostkowym operacji technologicznych – rozpiętość

Wskaźnik	Metoda sterowania przepływem produkcji	Korpusy wodomierzy	Zawory Z6	Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III
		Czynnik				
		Czas jednostkowy [s] - rozpiętość				
		22	58	930	5 670	10 400
Zapasy	push – harmonogram	5	5	1	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	5
	pull sekwencyjny	4	4	3	2	2
	pull mieszany	1	1	4	4	4
	werbel-bufor-lina	3	3	2	1	1
Czas przejścia	push – harmonogram	5	5	2	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	4
	pull sekwencyjny	4	4	3	1	1
	pull mieszany	1	1	4	4	5
	werbel-bufor-lina	3	3	1	2	2
Ogólna ocena	push – harmonogram	10	10	3	6	6
	pull typu supermarket	4	4	10	10	9
	pull sekwencyjny	8	8	6	3	3
	pull mieszany	2	2	8	8	9
	werbel-bufor-lina	6	6	3	3	3



Rys. 2.2.7. Ocena ogólna relacji rozpiętość czasu jednostkowego operacji technologicznych i metod sterowania przepływem produkcji

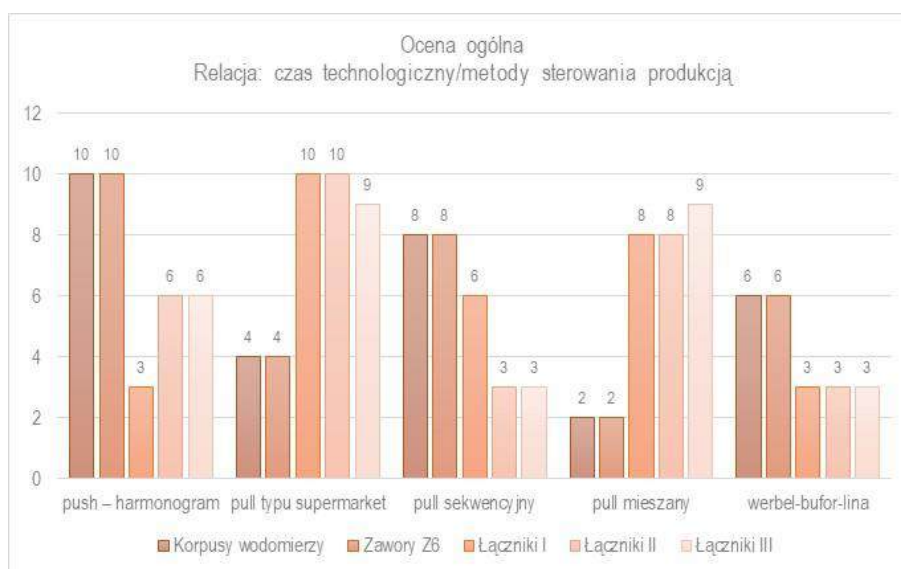
Uogólniając, wraz ze wzrostem średniej liczby części w wyrobach zastosowanie metod pull typu supermarket oraz pull mieszany powoduje pogorszenie wartości kryteriów oceny. Natomiast metody pull sekwencyjny i werbel-bufor-lina pozwalają na ich poprawę. W przypadku pozostałych metod nie występują jednoznaczne relacje (rys. 2.2.7).

Wzrost sumy czasu jednostkowego operacji technologicznych (czas realizacji procesu technologicznego) wpływa na (tab. 2.2.8):

- uzyskanie mniejszych wartości zapasów międzyoperacyjnych w przypadku stosowania metod pull sekwencyjny oraz werbel-bufor-lina,
- wzrost czasu przejścia materiału w przypadku metody pull mieszany.

Tabela 2.2.8. Zależności między metodami sterowania produkcją a czasem jednostkowym operacji technologicznych – suma (czas technologiczny).

Wskaźnik	Metoda sterowania przepływem produkcji	Korpusy wodomierzy	Zawory Z6	Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III
		Czas technologiczny [s]				
		65	137	5 017	33 930	67 540
Zapasy	push – harmonogram	5	5	1	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	5
	pull sekwencyjny	4	4	3	2	2
	pull mieszany	1	1	4	4	4
	werbel-bufor-lina	3	3	2	1	1
Czas przejścia	push – harmonogram	5	5	2	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	4
	pull sekwencyjny	4	4	3	1	1
	pull mieszany	1	1	4	4	5
	werbel-bufor-lina	3	3	1	2	2
Ogólna ocena	push – harmonogram	10	10	3	6	6
	pull typu supermarket	4	4	10	10	9
	pull sekwencyjny	8	8	6	3	3
	pull mieszany	2	2	8	8	9
	werbel-bufor-lina	6	6	3	3	3



Rys. 2.2.8. Ocena ogólna relacji czasu technologicznego i metod sterowania przepływem produkcji

Można stwierdzić, że wraz ze wzrostem średniej liczby części w wyrobach zastosowanie metod pull typu supermarket oraz pull mieszany powoduje pogorszenie wartości kryteriów oceny. Natomiast metody pull sekwencyjny i werbel-bufor-lina pozwalają na ich poprawę. W przypadku pozostałych metod nie występują jednoznaczne relacje (rys. 2.2.8).

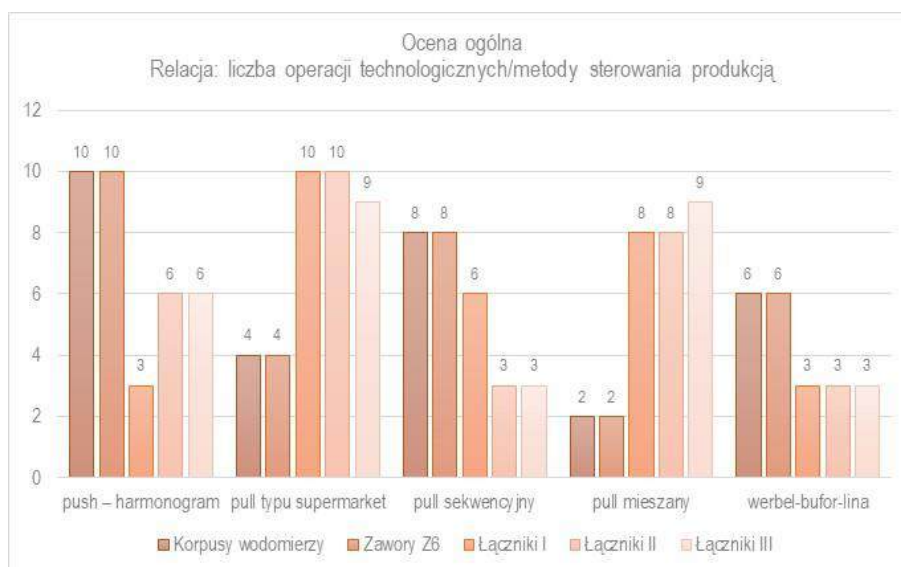
Liczba operacji technologicznych

Wzrost liczby operacji technologicznych wpływa na (tab. 2.2.9):

- uzyskanie coraz mniejszych wartości zapasów międzyoperacyjnych w przypadku stosowania metod pull sekwencyjny oraz werbel-bufor-lina,
- wzrost czasu przejścia materiału w przypadku metody pull mieszany.

Tabela 2.2.9. Zależności między metodami sterowania produkcją a liczbą operacji technologicznych

Wskaźnik	Metoda sterowania przepływem produkcji	Korpusy wodomierzy	Zawory Z6	Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III
		Liczba operacji technologicznych				
		8	13	13	20	24
Zapasy	push – harmonogram	5	5	1	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	5
	pull sekwencyjny	4	4	3	2	2
	pull mieszany	1	1	4	4	4
	werbel-bufor-lina	3	3	2	1	1
Czas przejścia	push – harmonogram	5	5	2	3	3
	pull typu supermarket	2	2	5	5	4
	pull sekwencyjny	4	4	3	1	1
	pull mieszany	1	1	4	4	5
	werbel-bufor-lina	3	3	1	2	2
Ogólna ocena	push – harmonogram	10	10	3	6	6
	pull typu supermarket	4	4	10	10	9
	pull sekwencyjny	8	8	6	3	3
	pull mieszany	2	2	8	8	9
	werbel-bufor-lina	6	6	3	3	3



Rys. 2.2.9. Ocena ogólna relacji liczba operacji technologicznych i metod sterowania przepływem produkcji

Uogólniając, wraz ze wzrostem średniej liczby części w wyrobach zastosowanie metod pull typu supermarket oraz pull mieszany powoduje pogorszenie wartości kryteriów oceny. Natomiast metody pull sekwencyjny i werbel-bufor-lina pozwalają na ich poprawę. W przypadku pozostałych metod nie występują jednoznaczne relacje (rys. 2.2.9).

Zapotrzebowanie na wyroby

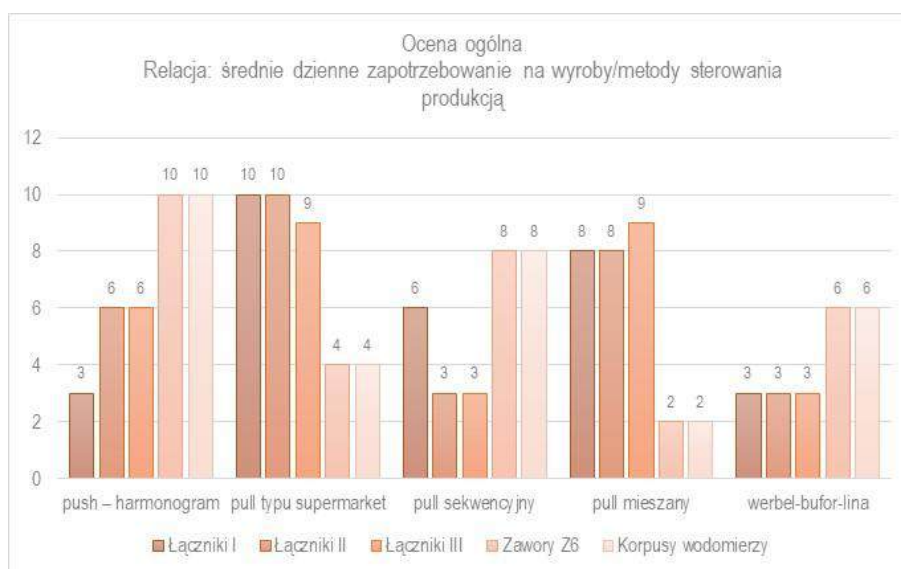
Wzrost średniego dziennego zapotrzebowania na wyroby wpływa na (tab. 2.2.10):

- wzrost zapasów międzyoperacyjnych i dłuższy czas przejścia materiałów w przypadku metody push-harmonogram,
- krótszy czas przejścia materiałów oraz mniejsze zapasy międzyoperacyjne w przypadku metod pull typu supermarket oraz pull mieszany.

Tabela 2.2.10. Zależności między metodami sterowania produkcją a średnim dziennym zapotrzebowaniem na wyroby

Wskaźnik	Metoda sterowania przepływem produkcji	Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III	Zawory Z6	Korpusy wodomierzy
		Czynnik				
		Średnie dzienne zapotrzebowanie na wyroby [szt.]				
		1	10	120	4000	7500
Zapasy	push – harmonogram	1	3	3	5	5
	pull typu supermarket	5	5	5	2	2
	pull sekwencyjny	3	2	2	4	4
	pull mieszany	4	4	4	1	1
	werbel-bufor-lina	2	1	1	3	3
Czas przejścia	push – harmonogram	2	3	3	5	5
	pull typu supermarket	5	5	4	2	2
	pull sekwencyjny	3	1	1	4	4
	pull mieszany	4	4	5	1	1
	werbel-bufor-lina	1	2	2	3	3
Ogólna ocena	push – harmonogram	3	6	6	10	10
	pull typu supermarket	10	10	9	4	4
	pull sekwencyjny	6	3	3	8	8
	pull mieszany	8	8	9	2	2
	werbel-bufor-lina	3	3	3	6	6

Uogólniając, wraz ze wzrostem średniej liczby części w wyrobach zastosowanie metody push-harmonogram oraz werbel-bufor-lina powoduje pogorszenie wartości kryteriów oceny. Natomiast metoda pull typu supermarket pozwala na ich poprawę. W przypadku pozostałych metod nie występują jednoznaczne relacje (rys. 2.2.10).



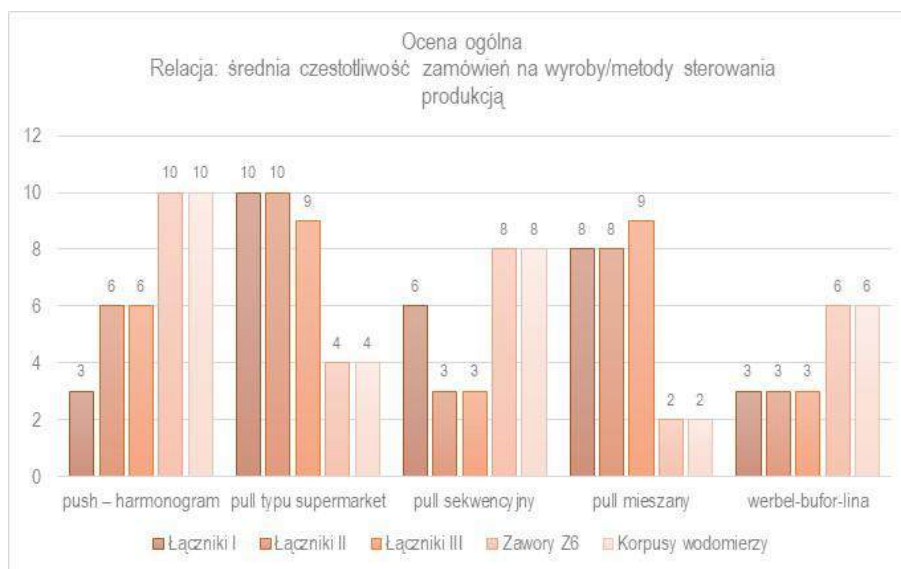
Rys. 2.2.10. Ocena ogólna relacji średnie dzienne zapotrzebowanie i metod sterowania przepływem produkcji

Wzrost średniej częstotliwości zamówień na wyroby wpływa na (tab. 2.2.11):

- wzrost zapasów międzyoperacyjnych i dłuższy czas przejścia materiałów w przypadku metody push-harmonogram,
- krótszy czas przejścia materiałów oraz mniejsze zapasy międzyoperacyjne w przypadku metod pull typu supermarket oraz pull mieszany.

Tabela 2.2.11. Zależności między metodami sterowania produkcją a częstotliwością zamówień na wyroby.

Wskaźnik	Metoda sterowania przepływem produkcji	Łączniki I	Łączniki II	Łączniki III	Zawory Z6	Korpusy wodomierzy
		Czynnik				
		Średnia częstotliwość zamówień [dni]				
		10	15	28	60	65
Zapasy	push – harmonogram	1	3	3	5	5
	pull typu supermarket	5	5	5	2	2
	pull sekwencyjny	3	2	2	4	4
	pull mieszany	4	4	4	1	1
	werbel-bufor-lina	2	1	1	3	3
Czas przejścia	push – harmonogram	2	3	3	5	5
	pull typu supermarket	5	5	4	2	2
	pull sekwencyjny	3	1	1	4	4
	pull mieszany	4	4	5	1	1
	werbel-bufor-lina	1	2	2	3	3
Ogólna ocena	push – harmonogram	3	6	6	10	10
	pull typu supermarket	10	10	9	4	4
	pull sekwencyjny	6	3	3	8	8
	pull mieszany	8	8	9	2	2
	werbel-bufor-lina	3	3	3	6	6



Rys. 2.2.11. Ocena ogólna relacji średnia częstotliwość zamówień i metod sterowania przepływem produkcji

Ocena ogólna wskazuje, że wraz ze wzrostem średniej liczby części w wyrobach zastosowanie metody push-harmonogram oraz werbel-bufor-lina powoduje pogorszenie wartości kryteriów oceny. Natomiast metoda pull typu supermarket pozwala na ich poprawę. W przypadku pozostałych metod nie występują jednoznaczne relacje (rys. 2.2.11).

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonej analizy podjęto próbę uogólnienia wyników. W tabeli 2.2.12 zestawiono i wskazano występujące relacje związane ze wzrostem wartości danego czynnika UWPZ. Strzałka „w górę” (↑) oznacza, że wraz ze wzrostem wartości czynnika dana metoda sterowania przepływem produkcji pozwala uzyskać wyższą wartość wskaźników oceny. Strzałka „w dół” (↓) oznacza relację przeciwną. W przypadku braku jednoznacznej relacji oznaczono symbolem „–”

Tabela 2.2.12. Podsumowanie wyników analizy wskazujące zależności i ich trendy.

Czynniki		Push - harmonogram	Pull typu supermarket	Pull sekwencyjny	Pull mieszany	Werbel- bufor- lina
Liczba części	Srednia	–	↓	↑	↓	↑
	Rozpiętość	↑	↓	–	↓	↑
Liczba stanowisk współdzielonych		–	↓	↑	↓	↑
Czas jednostkowy	Srednia	–	↓	↑	↓	↑
	Rozpiętość	–	↓	↑	↓	↑
	Czas technologiczny	–	↓	↑	↓	↑
Liczba operacji		–	↓	↑	↓	↑
Średnie dzienne zapotrzebowanie		↓	↑	↓	↑	↓
Średnia częstotliwość zamówień		↓	↑	↓	↑	↓

Dla przeprowadzonej analizy można wskazać wnioski ogólne, przyjmując poziomy wartości czynników UWPZ jako niskie i wysokie:

- metoda werbel-bufor-lina jest najbardziej elastyczna i pozwala uzyskać akceptowalne poziomy wartości kryteriów oceny (czas przejścia, zapasy międzyoperacyjne) dla analizowanych czynników UWPZ – najgorsze miejsce w rankingach metody to 3; pozostałe metody wykazują relacje o większym stopniu „czułość”,
- dla czynników o wysokim poziomie wartości najbardziej adekwatną metodą jest pull sekwencyjny; dla prawie wszystkich rosnących wartości czynników metoda ta przejawia coraz lepszą efektywność.

Uzyskanie sprawnego i efektywnego przepływu produkcji wymaga przede wszystkim przyjęcia odpowiedniej metody sterowania przepływem produkcji. Z uwagi na różnorodną charakterystykę procesów produkcyjnych dana metoda nie sprawdzi się w każdych warunkach techniczno-organizacyjnych systemu produkcyjnego. Wybór odpowiedniej/akceptowalnej metody sterowania, która przyczyni się do poprawy efektywności przepływu produkcji najczęściej wymaga opracowania kilku jej wariantów. W tym celu należy przeprowadzić analizę wielu czynników związanych ze specyfiką realizowanych procesów produkcyjnych, np.: popyt, posiadane zasoby i realizowane procesy technologiczne. Jest to proces pracochłonny, który wymaga także

Przedstawione wyniki badań wskazują reguły występujące pomiędzy czynnikami UWPZ i metodami sterowania przepływem produkcji. Mogą one stanowić podstawę przy

podejmowaniu działań doskonalących przepływu produkcji poprzez wdrożenie najbardziej skutecznej metody sterowania.

Wskazane relacje wskazują także na wpływ decyzji podejmowanych w procesie przygotowania produkcji. Konstrukcja wyrobu i struktura procesu technologicznego są istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność przepływu materiałów i informacji w procesach produkcyjnych.

Wyniki analizy były stosowane wielokrotnie w różnych projektach i zleceniach przedsiębiorstw, w których habilitant kierował zadaniami badawczymi. Zastosowanie wyników pozwoliło na skrócenia czasu analizy oraz opracowania i wdrożenia nowych rozwiązań sterowanie przepływem produkcji.

Poniżej przedstawiono główne informacje dotyczące realizacji kolejnych etapów prac badawczych wskazanych projektów naukowych.

2.3. Projekt: Opracowanie i wdrożenie systemu organizacyjnego produkcji w nowym zakładzie produkcyjnym

2.3.1. Cel i zakres projektu

Projekt dotyczył opracowania i wdrożenia do praktyki przemysłowej systemu organizacyjnego sterowania przepływem produkcji dedykowanego dla przedsiębiorstwa Fabryka Armatur „Swarzędz” sp. z o.o. System uwzględniał charakterystykę produkcyjną związaną ze strukturą zamówień i procesami produkcyjnymi. Głównym celem była poprawa efektywności produkcji poprzez zmianę sterowania przepływem produkcji. Projekt był częścią przedsięwzięcia związanego z inwestycją budowy nowej siedziby przedsiębiorstwa. Fabryka Armatur „Swarzędz” sp. z o.o. specjalizuje się w produkcji elementów kutech, odkuwek matrycowych wykonywanych z metali kolorowych i stali. Do głównych grup asortymentu firmy należą:

- pierścienie synchronizatora skrzyni biegów,
- odkuvki matrycowe z mosiądzu, brązu i stali,
- zawory do butli gazowych,
- kurki kulowe i zawory do wody.

Projektu został zrealizowany w ramach badań przemysłowych, prac rozwojowych oraz prac wdrożeniowych. Badania przemysłowe obejmowały prace analityczne dotyczące stanu przed inwestycją oraz możliwych wariantów organizacji i sterowania przepływem produkcji realizowanego. Na tej podstawie opracowano w ramach prac rozwojowych nowy model systemu sterowania produkcją. Prace wdrożeniowe dotyczące uruchomienia nowego systemu sterowania przepływem produkcji polegały na uruchomieniu oraz wprowadzeniu modelu w działalności przedsiębiorstwa oraz przeprowadzeniu badań weryfikacyjnych.

2.3.2. Analiza przepływu materiałów i informacji w systemie produkcyjnym

Celem tego etapu było przeprowadzenie badań dotyczących stanu obecnego funkcjonowania systemu produkcyjnego w obszarze przepływu produkcji.

Wydzielenie rodzin wyrobów

Dla potrzeb realizacji zadania opracowano metodę pozwalającą na grupowanie dużej liczby indeksów/wyrobów a tym samym wydzielenie ich potencjalnych rodzin. Należy jednak podkreślić, że metoda pozwala na uzyskanie wstępnych wyników na podstawie obliczeń matematycznych. Uzyskane wyniki podlegały weryfikacji uwzględniającej wewnętrzne uwarunkowania w procesach wytwórczych. Na podstawie analizy macierzy podobieństwa technologicznego finalnie wyodrębniono piętnaście rodzin wyrobów (tab. 2.3.1).

Indeks/branżowa	HM 25 polski nazwa	300MP polski nazwa	A115 polski nazwa	RTD 61 polski nazwa	B52 polski nazwa	HC 59 polski nazwa	B5 500 polski nazwa	C46 10 polski	CN 010101 polski	ADGE	DCC 010101 polski	EE 27010101 polski	EE 7 010101 polski	PM 1 010101 polski	PM 32 010101 polski	PM 010101 polski	PM 25 010101 polski	PM 40 010101 polski	PM 50 010101 polski	PM 60 010101 polski	PM 70 010101 polski	PM 80 010101 polski	PM 90 010101 polski	PM 100 010101 polski	PM 110 010101 polski	PM 120 010101 polski	PM 130 010101 polski	PM 140 010101 polski	PM 150 010101 polski	PM 160 010101 polski	PM 170 010101 polski	PM 180 010101 polski	PM 190 010101 polski	PM 200 010101 polski	PM 210 010101 polski	PM 220 010101 polski	PM 230 010101 polski	PM 240 010101 polski	PM 250 010101 polski	PM 260 010101 polski	PM 270 010101 polski	PM 280 010101 polski	PM 290 010101 polski	PM 300 010101 polski	PM 310 010101 polski	PM 320 010101 polski	PM 330 010101 polski	PM 340 010101 polski	PM 350 010101 polski	PM 360 010101 polski	PM 370 010101 polski	PM 380 010101 polski	PM 390 010101 polski	PM 400 010101 polski	PM 410 010101 polski	PM 420 010101 polski	PM 430 010101 polski	PM 440 010101 polski	PM 450 010101 polski	PM 460 010101 polski	PM 470 010101 polski	PM 480 010101 polski	PM 490 010101 polski	PM 500 010101 polski	PM 510 010101 polski	PM 520 010101 polski	PM 530 010101 polski	PM 540 010101 polski	PM 550 010101 polski	PM 560 010101 polski	PM 570 010101 polski	PM 580 010101 polski	PM 590 010101 polski	PM 600 010101 polski	PM 610 010101 polski	PM 620 010101 polski	PM 630 010101 polski	PM 640 010101 polski	PM 650 010101 polski	PM 660 010101 polski	PM 670 010101 polski	PM 680 010101 polski	PM 690 010101 polski	PM 700 010101 polski	PM 710 010101 polski	PM 720 010101 polski	PM 730 010101 polski	PM 740 010101 polski	PM 750 010101 polski	PM 760 010101 polski	PM 770 010101 polski	PM 780 010101 polski	PM 790 010101 polski	PM 800 010101 polski	PM 810 010101 polski	PM 820 010101 polski	PM 830 010101 polski	PM 840 010101 polski	PM 850 010101 polski	PM 860 010101 polski	PM 870 010101 polski	PM 880 010101 polski	PM 890 010101 polski	PM 900 010101 polski	PM 910 010101 polski	PM 920 010101 polski	PM 930 010101 polski	PM 940 010101 polski	PM 950 010101 polski	PM 960 010101 polski	PM 970 010101 polski	PM 980 010101 polski	PM 990 010101 polski	PM 1000 010101 polski	PM 1010 010101 polski	PM 1020 010101 polski	PM 1030 010101 polski	PM 1040 010101 polski	PM 1050 010101 polski	PM 1060 010101 polski	PM 1070 010101 polski	PM 1080 010101 polski	PM 1090 010101 polski	PM 1100 010101 polski	PM 1110 010101 polski	PM 1120 010101 polski	PM 1130 010101 polski	PM 1140 010101 polski	PM 1150 010101 polski	PM 1160 010101 polski	PM 1170 010101 polski	PM 1180 010101 polski	PM 1190 010101 polski	PM 1200 010101 polski	PM 1210 010101 polski	PM 1220 010101 polski	PM 1230 010101 polski	PM 1240 010101 polski	PM 1250 010101 polski	PM 1260 010101 polski	PM 1270 010101 polski	PM 1280 010101 polski	PM 1290 010101 polski	PM 1300 010101 polski	PM 1310 010101 polski	PM 1320 010101 polski	PM 1330 010101 polski	PM 1340 010101 polski	PM 1350 010101 polski	PM 1360 010101 polski	PM 1370 010101 polski	PM 1380 010101 polski	PM 1390 010101 polski	PM 1400 010101 polski	PM 1410 010101 polski	PM 1420 010101 polski	PM 1430 010101 polski	PM 1440 010101 polski	PM 1450 010101 polski	PM 1460 010101 polski	PM 1470 010101 polski	PM 1480 010101 polski	PM 1490 010101 polski	PM 1500 010101 polski	PM 1510 010101 polski	PM 1520 010101 polski	PM 1530 010101 polski	PM 1540 010101 polski	PM 1550 010101 polski	PM 1560 010101 polski	PM 1570 010101 polski	PM 1580 010101 polski	PM 1590 010101 polski	PM 1600 010101 polski	PM 1610 010101 polski	PM 1620 010101 polski	PM 1630 010101 polski	PM 1640 010101 polski	PM 1650 010101 polski	PM 1660 010101 polski	PM 1670 010101 polski	PM 1680 010101 polski	PM 1690 010101 polski	PM 1700 010101 polski	PM 1710 010101 polski	PM 1720 010101 polski	PM 1730 010101 polski	PM 1740 010101 polski	PM 1750 010101 polski	PM 1760 010101 polski	PM 1770 010101 polski	PM 1780 010101 polski	PM 1790 010101 polski	PM 1800 010101 polski	PM 1810
-----------------	-----------------------	-----------------------	----------------------	------------------------	---------------------	-----------------------	------------------------	------------------	---------------------	------	----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	------------------------	---------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------

str. 61

Analiza zapotrzebowania na wyroby

Dla każdej rodziny wyrobów na podstawie danych historycznych sprzedaży dokonano klasyfikacji wyrobów według dwóch analiz. Pierwsza jest związana z rotacyjnością sprzedaży, gdzie wyroby podzielono na trzy kategorie: szybkorotujące, średniorotujące i wolnorotujące. Druga klasyfikacja to tzw. *Sito Glendaya*, gdzie wyroby podzielono na cztery kategorie według kryterium wielkości sprzedaży. Poniżej przedstawiono przykład analizy sito Glendaya dla rodziny Korpusy wodomierzy (tab. 2.3.2).

Tabela. 2.3.2. Wyniki Sita Glendaya dla rodziny korpusów wodomierzy.

Sprzedaż narastająco [%]	Liczba wyrobów [szt.]	Liczba wyrobów [%]	Liczba wyrobów narastająco [%]	Grupa
50%	2	18%	18%	1
95%	5	45%	63%	2
99%	2	18%	81%	3
ostatni 1%	2	18%	100%	4

Analiza wskazała, że zaledwie dwa z jedenastu typów wyrobów (czyli 18%) należy do grupy zielonej i decydują o prawie 50% sprzedaży. Te typy korpusu wodomierza były najważniejsze przy projektowaniu rozwiązań sterowania przepływem produkcji. Najliczniejszą grupę wyrobów stanowi grupa żółta. Kolejną analizą związaną ze sprzedażą wyrobów był ich podział ze względu na rotacyjność sprzedaży (Tabela 2.3.3)

Tabela 2.3.3. Wyniki analizy rotacyjności dla rodziny korpusów wodomierzy.

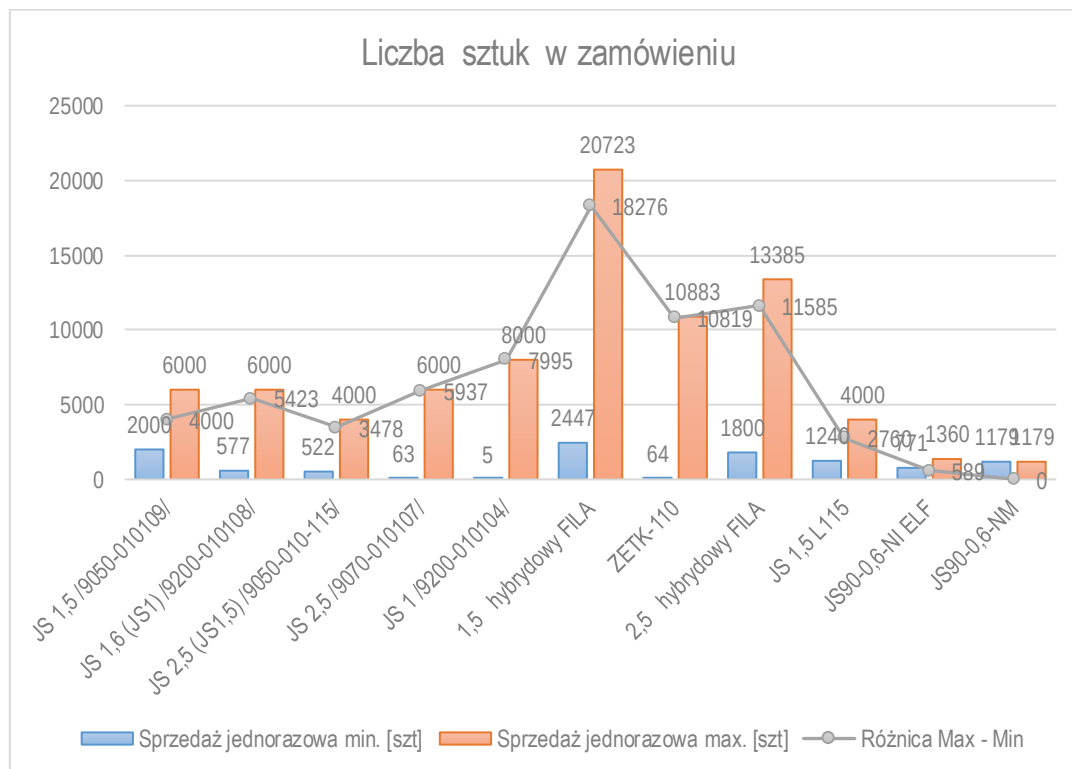
Sprzedaż narastająco [%]	Liczba wyrobów [szt.]	Liczba wyrobów [%]	Liczba wyrobów narastająco [%]	Grupa	
60%	3	27%	27%	A	szybkorotujące
90%	3	27%	54%	B	średniorotujące
ostatnie 10%	5	45%	100%	C	wolnorotujące

Przeprowadzona analiza została uwzględniona przy projektowaniu rozwiązań sterowania przepływem produkcji. Dla każdej z grup były rozważane różne metody sterowania.

Kolejnym elementem analizy było określenie podstawowej charakterystyki związanej ze sprzedażą wyrobów:

- średniej sprzedaży miesięcznej,
- średniej sprzedaży dziennej,
- średniej częstotliwości sprzedaży,
- minimalnej partii wysyłki,
- maksymalnej partii wysyłki.

Poniżej przedstawiono przykład analizy dotyczącej kształtowania się liczby sztuk wyrobów w pojedynczych zamówieniach na wyroby (rys. 2.3.2)



Rys. 2.3.2. Analiza liczby sztuk w zamówieniu – korpusy wodomierza.

Dane te zostały uwzględnione przy projektowaniu nowych zasad zlecania produkcji wyrobów - liczba sztuk i częstotliwość zlecania oraz ustalaniu wielkości parametrów przepływu produkcji, np. wielkość partii transportowej.

Analiza dostaw materiałów

Analiza miała na celu określenie parametrów dostaw materiałów dla poszczególnych rodzin wyrobów na podstawie danych historycznych. Przedmiotem analizy było określenie:

- średnich ilości dostaw miesięcznych,
- średnich częstotliwości dostaw,
- minimalnych partii dostaw,
- maksymalnych partii dostaw.

Poniżej w tabeli 2.3.4 przedstawiono fragment wyników analizy dla wybranych materiałów.

Tabela 2.3.4. Analiza dostaw według największej średniej miesięcznej dostawy.

Material	Suma dostaw [kg.]	Średnie dostawy miesięczne [kg]	Częstotliwość dostaw [dni]	Minimalna partia dostaw [kg]	Maksymalna partia dostaw [kg]
Pręt mosiężny wyciskany fi 40	328685	27391	8	33	23680
Korek Z-6 T-27	220000	18334	182	100000	120000
Pręt mosiężny wyciskany fi 20	193864	16156	13	951	13498
Pręt mosiężny wyciskany fi 55	113768	9481	28	2182	19406
Uszczelka króćca Z-6	100000	8334	365	100000	100000
Pręt mosiężny wyciskany fi 25	99480	8290	15	1060	12380
Pręt mosiężny wyciskany fi 36	90104	7509	14	668	31080
Pręt mosiężny ciągniony fi 16	51680	4307	20	504	4344
Pręt mosiężny wyciskany fi 23	43724	3644	30	959	6353
Pręt mosiężny wyciskany fi 30	41285	3441	22	1008	6311
Pręt mosiężny fi 55	10495	875	365	10495	10495

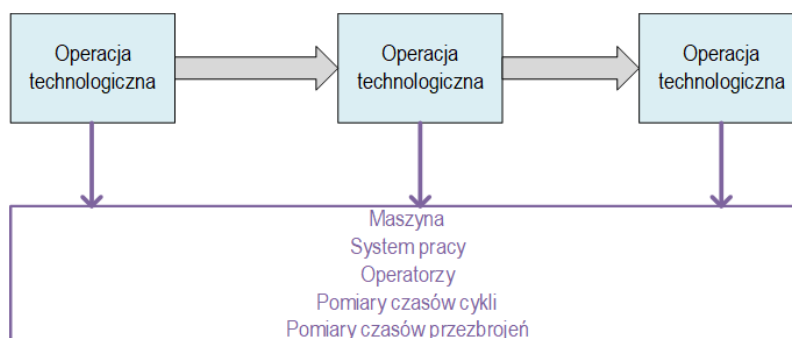
Analiza była podstawą do określenia parametrów dostaw materiałów z uwagi na wymagania realizacji procesów produkcyjnych. Stanowiły one także podstawę do rozmów z dostawcami na temat zmian realizacji zamówień zakupowych materiałów.

Analiza procesów technologicznych

Zakres prac obejmował charakterystykę i pomiary podstawowych parametrów związanych z realizacją kolejnych operacji technologicznych. Zakres prac obejmował wszystkie procesy technologiczne dla wyodrębnionych rodzin wyrobów. Dla danej operacji technologicznej dokonano pomiarów:

- czasu cyklu (C/T),
- czasu przebrojenia (C/O).

Zebrano także informacje dotyczące systemu pracy i liczbie zaangażowanych operatorów (rys. 2.3.3).



Rys. 2.3.3. Zakres analizy procesów technologicznych.

Poniżej przedstawiono przykładową charakterystykę operacji technologicznej – Grzanie i kucie korpusu zaworu Z6M (tab. 2.3.5).

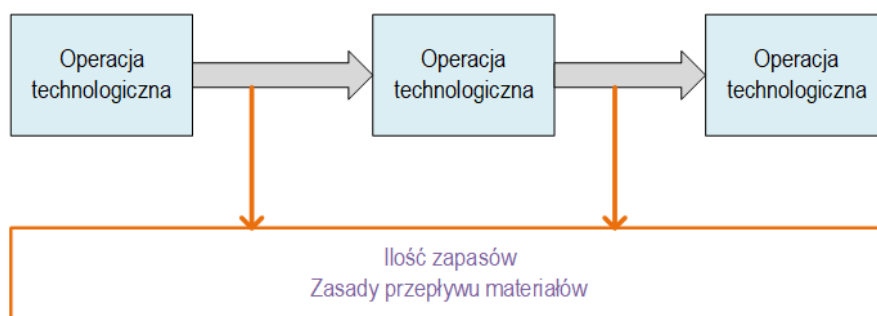
Tabela 2.3.5. Charakterystyka operacji technologicznej – Grzanie i kucie korpusu zaworu Z6M.

Grzanie i kucie Operacja wykonywana jest na prasie korbowej o nacisku 250T. Prasa pracuje w cyklu automatycznym. Dostarczone wstępniaki umieszczane są w odpowiedniej ilości w zasobniku, z którego następnie są pobierane i dalej nagrzewane do temperatury umożliwiającej kucie matrycowe na gorąco. Nagrzane elementy przenoszone są za pomocą podajnika na matryce i następuje kucie. Wykonana odkuwka jest wydmuchiwana przez sprężone powietrze. Następuje powtórzenie cyklu.	Pomiar czasu cyklu dla operacji kucia korpusu zaworu <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr pomiaru</th><th>Czas cyklu [s]</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.</td><td>7,74</td></tr> <tr><td>2.</td><td>7,82</td></tr> <tr><td>3.</td><td>7,58</td></tr> <tr><td>4.</td><td>7,42</td></tr> <tr><td>5.</td><td>7,77</td></tr> <tr><td>6.</td><td>7,67</td></tr> <tr><td>7.</td><td>7,71</td></tr> <tr><td>8.</td><td>7,85</td></tr> <tr><td>9.</td><td>7,89</td></tr> <tr><td>10.</td><td>7,50</td></tr> <tr> <td>Sredni czas cyklu</td><td>7,70</td></tr> </tbody> </table>	Nr pomiaru	Czas cyklu [s]	1.	7,74	2.	7,82	3.	7,58	4.	7,42	5.	7,77	6.	7,67	7.	7,71	8.	7,85	9.	7,89	10.	7,50	Sredni czas cyklu	7,70
Nr pomiaru	Czas cyklu [s]																								
1.	7,74																								
2.	7,82																								
3.	7,58																								
4.	7,42																								
5.	7,77																								
6.	7,67																								
7.	7,71																								
8.	7,85																								
9.	7,89																								
10.	7,50																								
Sredni czas cyklu	7,70																								

Analiza pozwoliła na ustalenie niezbędnych parametrów procesów technologicznych mających wpływ na przepływ produkcji.

Analiza przepływu materiałów

Celem prac była identyfikacja miejsc i przyczyn powstawania zapasów międzyoperacyjnych oraz charakter zasad przepływu materiałów w procesie produkcyjnym. W tym celu dokonano pomiarów ilościowych zapasów oraz poprzez wywiad z pracownikami ustalono występujące zasady związane z przekazywaniem materiałów i wyrobów pomiędzy kolejnymi etapami procesu (rys. 2.3.5).



Rys. 2.3.5. Zakres analizy przepływu materiałów w procesie produkcyjnym

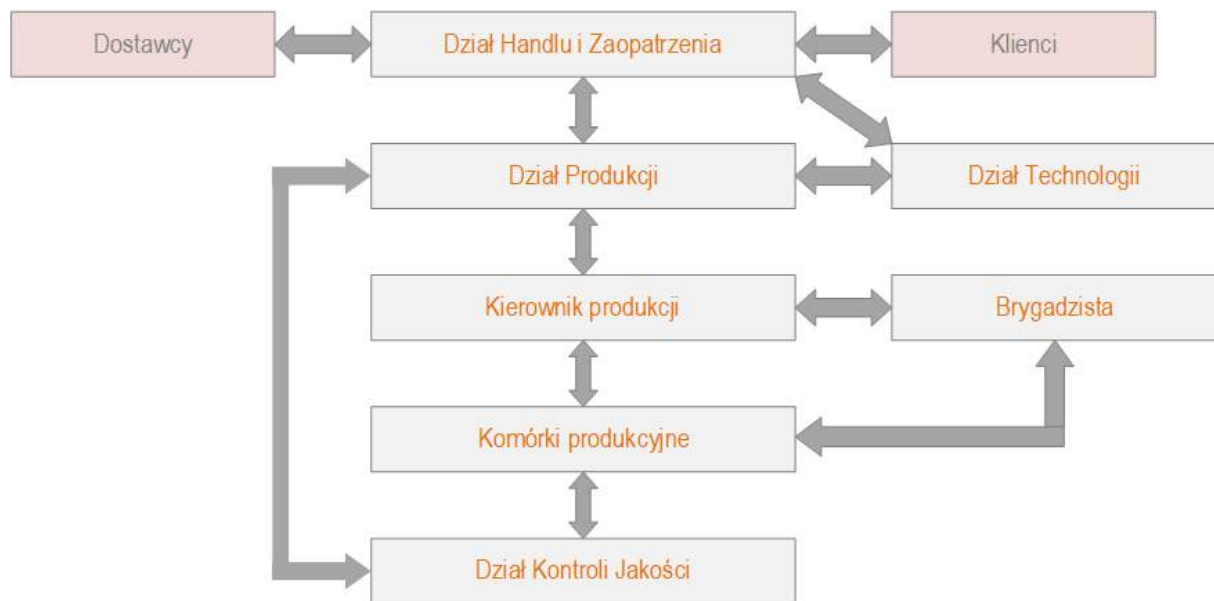
Analiza przepływu informacji

W ramach zadania dokonano analizy kanałów przepływu informacji w obszarach:

- relacji z klientami – zamówienia,
- relacji z dostawcami – zamówienia zakupowe,
- wymiany informacji pomiędzy komórkami organizacyjnymi w przedsiębiorstwie.

Zasady i metody związane w przepływie informacji w systemie produkcyjnym dotyczyły (rys. 2.3.6):

- planowania produkcji,
- przekazywania informacji do komórek produkcyjnych,
- raportowania i nadzorowania realizacji zleceń produkcyjnych.



Rys. 2.3.6. Schemat przepływu informacji w systemie produkcyjnym

Analiza pozwoliła na poznanie zasad przepływu informacji, które w powiązaniu z zasadami przepływu materiału wpływały na uzyskane efekty funkcjonowania systemu produkcyjnego.

Mapy strumienia wartości – stan obecny (przed zmianami)

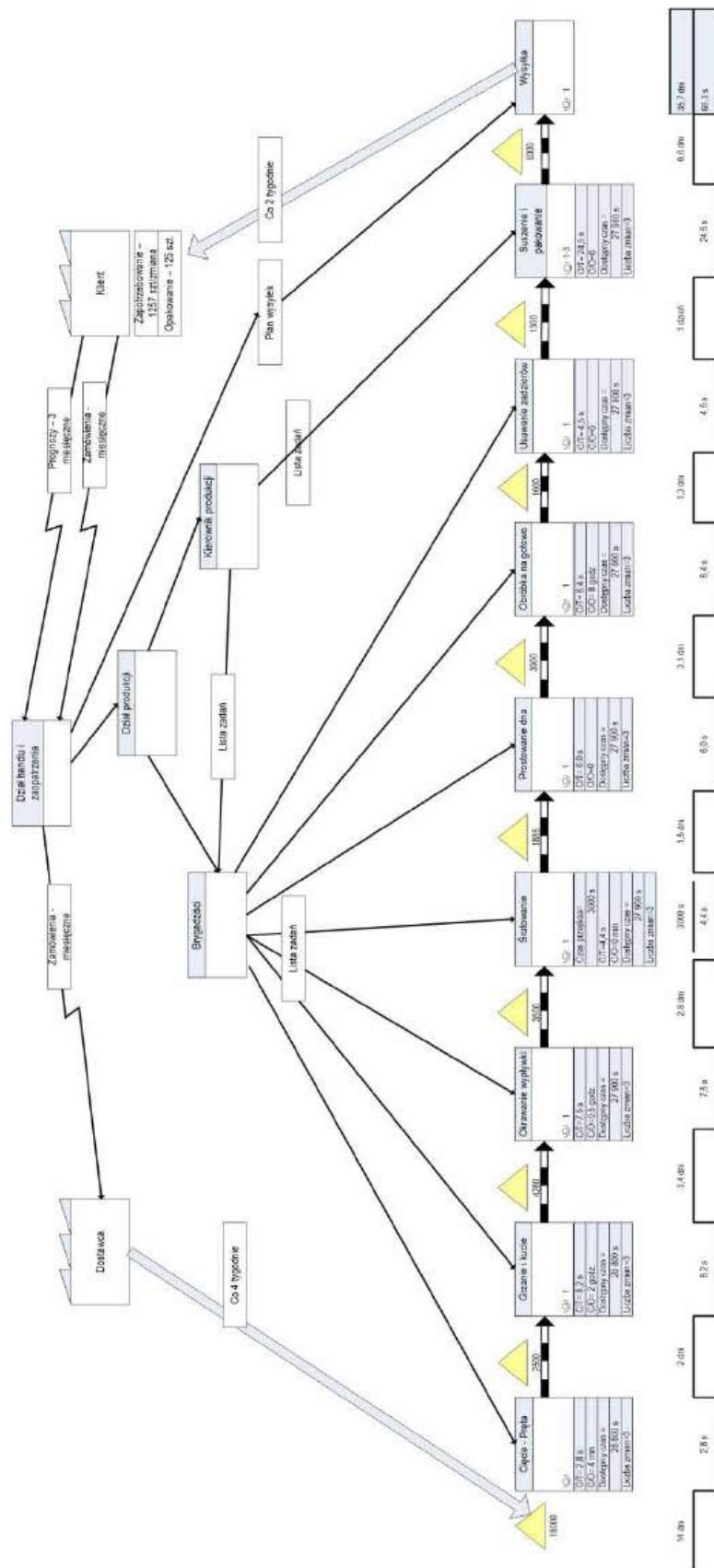
W ramach zadania opracowano mapy stanu obecnego przepływu materiałów i informacji w procesach produkcyjnych dla wydzielonych rodzin wyrobów. Podstawą były zadania zrealizowane we wcześniejszych etapach projektu (przedstawione we wcześniejszych punktach opracowania). W tym celu zastosowano narzędzie ang. Value Stream Mapping (mapowanie strumienia wartości) będące podstawowym narzędziem koncepcji lean manufacturing. Mapy stanu obecnego zawierały informacje:

- wymagania klientów,
- charakterystykę dostaw materiałów,
- charakterystykę procesów technologicznych
- zasady przepływu materiałów,
- kanały i zasady przepływu informacji.

Dla tak opracowanych map stanu obecnego wyznaczono wskaźniki:

- czas przejścia materiału w procesie produkcyjnym,
- średni czas realizacji zbioru zleceń produkcyjnych,
- średnia wielkość zapasów międzyoperacyjnych.

Poniżej przedstawiono wybrane mapy strumienia wartości stanu obecnego dla dwóch rodzin wyrobów: korpusy wodomierza oraz zaworów do butli gazowych (rys. 2.3.7 i 2.3.8).



Rys. 2.3.8. Mapa stanu obecnego strumienia wartości dla rodziny wyrobów „Korpusy wodomierza”.

Opracowane mapy były podstawą określenia głównych czynników wpływających na stan przepływu produkcji. Następnie kierując się zasadami kierując się zasadami różnych koncepcji (lean manufacturing, teoria ograniczeń) w obszarze organizacji i sterowania przepływem produkcji opracowano plan działań doskonalących.

Analiza stanu obecnego wskazała główne problemy wpływające na efektywność przepływu produkcji:

- przepływ materiałów realizowany według zasady „pchania” (ang. push) – zlecenia produkcyjne są realizowane według indywidualnego harmonogramu produkcji przez poszczególne komórki produkcyjne co powoduje brak synchronizacji produkcji,
- realizacji zleceń odbywa się w dużych partiach produkcyjnych, co w połączeniu z brakiem synchronizacji na poziomie harmonogramów produkcji wpływa na duży i niekontrolowany poziom zapasów międzyoperacyjnych,
- częste zmiany planu produkcji z uwagi na pilne zamówienia oraz z powodu dużych partii produkcyjnych,
- brak synchronizacji przepływu materiałów pomiędzy kolejnymi etapami w procesie produkcji – nie uwzględnienie w pełni wymagań klientów,
- brak zasad dotyczących logistyki produkcji – zaangażowanie operatorów w proces kompletacji i transportu materiałów,
- nie skuteczny system identyfikacji materiałów w procesie produkcji – konieczność poszukiwania i problemy z interpretacją oznaczeń partii wyrobów,
- brak standardów i zasad związanych z przepływem informacji – brak aktualnych danych pozwalających na podejmowanie skutecznych decyzji operacyjnych,
- brak kontroli realizacji procesów produkcyjnych w „czasie rzeczywistym” - stan zaawansowania realizacji zleceń produkcyjnych można zasadniczo sprawdzić tylko na ostatnich operacjach procesu wytwarzania.

Na podstawie analizy map wskazano także obszary przepływu materiałów i informacji, które mają krytyczne znaczenie dla osiągniętych wartości wskaźników produkcji.

2.3.3. Opracowanie nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji

W ramach prac badawczych opracowano warianty systemu sterowania przepływem produkcji. Analizę i badania przeprowadzono na podstawie danych uzyskanych w poprzednich zadaniach projektu.

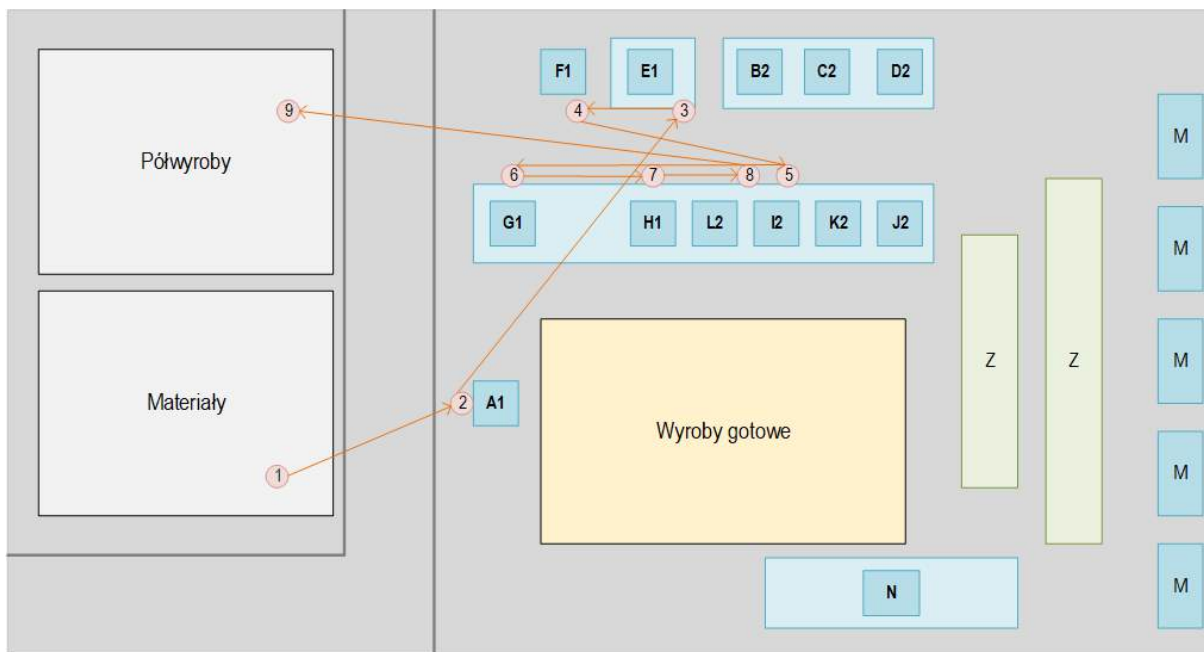
Opracowano także działania doskonalące dotyczące:

- zadań realizowanych na stanowiskach produkcyjnych,
- organizacji przepływu materiałów w komórkach produkcyjnych,

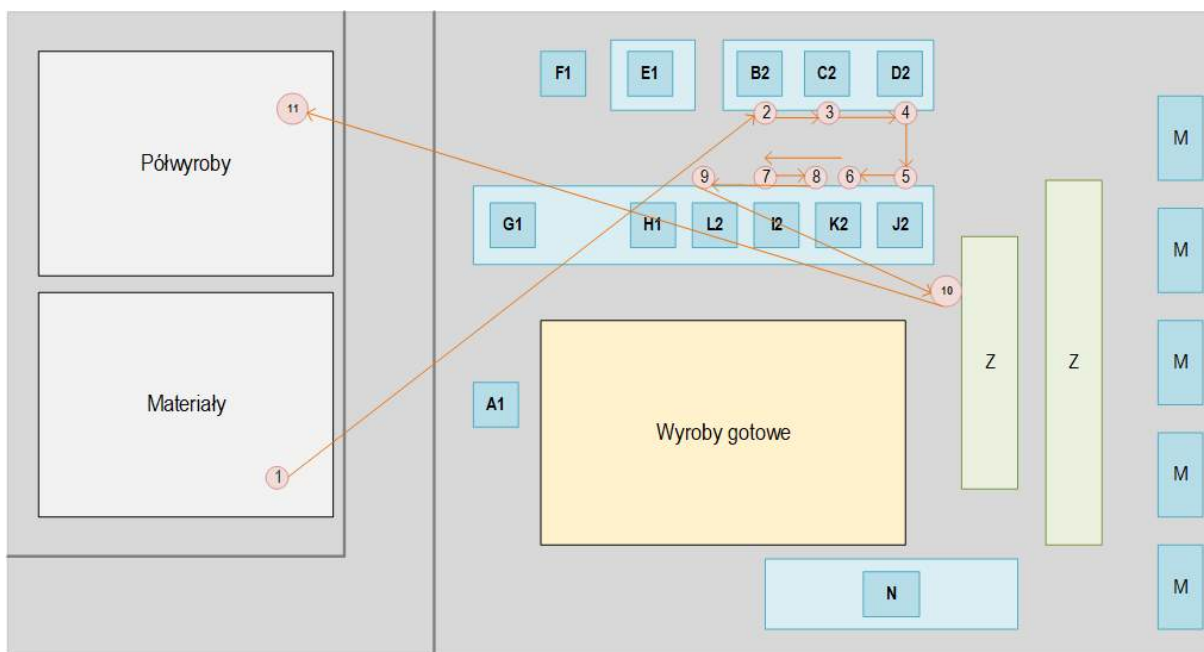
których celem było skrócenie czasów realizacji operacji technologicznych i procesów wytwórczych.

Poniżej przedstawiono przykład proponowanych działań doskonalących dla gniazda montażu zaworów do butli gazowych.

Analiza stanu obecnego przepływu materiałów i organizacji pracy w gnieździe wykazała podział realizacji procesu montażu zaworów na dwóch operatorów (rys. 2.3.9 i 2.3.10). Praca ich nie była zsynchronizowana a przepływ materiałów odbywał się z dużych partii. W wyniku czego powstawały duże zapasy produkcyjne. Dodatkowo ze względu na zmienne zapotrzebowanie realizacja zleceń produkcyjnych nie była realizowana w sposób ciągły.

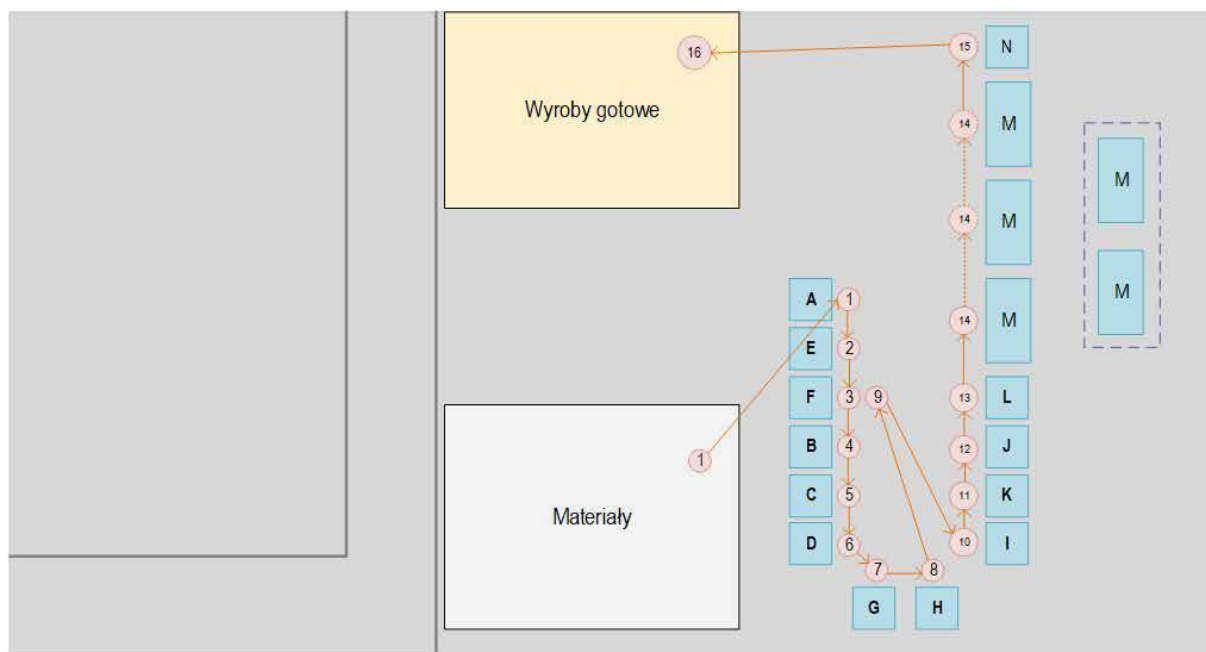


Rys. 2.3.9. Schemat drogi pokonywanej przez pierwszego pracownika podczas wykonywania operacji montażowych.



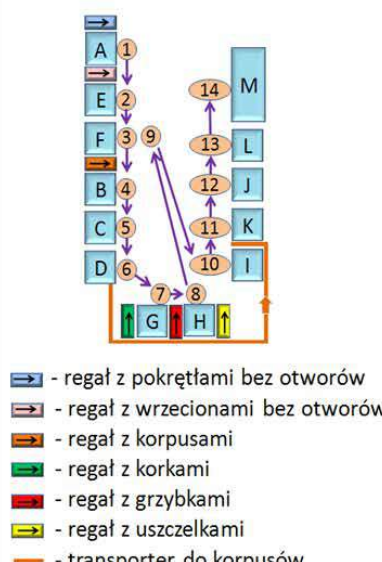
Rys. 2.3.10. Schemat drogi pokonywanej przez drugiego pracownika podczas wykonywania operacji montażowych.

Propozycja dotyczyła wprowadzenia przepływu ciągłego – przepływ 1 sztuki gdzie produkcja została zsynchronizowana czasem taktu. Zmieniono rozmieszczenie przestrzenne stanowisk produkcyjnych oraz zaproponowano nowy standard pracy operatorów w gnieździe (rys. 2.3.11).



Rys. 2.3.11. Propozycja zmiany rozmieszczenia stanowisk i schemat przepływu materiału w gnieździe montażu zaworów butli gazowych

Rozwiązanie to stworzyło warunki stabilnego i powtarzalnego przepływu materiału oraz pozwoliło na elastyczne reagowanie na zmiany zapotrzebowania poprzez sterowanie liczbą operatorów. Opracowano także instrukcje w postaci kart pracy standardowej operatorów, które były elementem działań szkoleniowych oraz kontroli realizacji poszczególnych zadań produkcyjnych (rys. 2.3.12).

KARTA STANDARDYZACJI PRACY			Proces: Montaż	Wyrób: Zawór Z6M	Strona: 1/8
Czas taktu: 28,32 sek.	Liczba operatorów: 1	Sztuk na zmianę: 985	Czynność	Czas realizacji	Uwagi
Plan realizacji		A – Wiercenie otworu w pokrętło	Pobrać pokrętło		Pojemnik na regale pochylnym w zasięgu ręki operatora
 ➡ - regał z pokrętłami bez otworów ➡ - regał z wrzecionami bez otworów ➡ - regał z korpusami ➡ - regał z korkami ➡ - regał z grzybkami ➡ - regał z uszczelkami ➡ - transporter do korpusów		Umieścić pokrętło na stole wiertarki		W czasie wiercenia trzymać pokrętło ręką. Zachować ostrożność!	
		Włączyć wiertarkę			
		Wykonać otwór		Używać okulary ochronne	
		Wylączyć wiertarkę			
		Odłożyć pokrętło		Na wydzielone miejsce	
			Σ = 2,61 sek.		
		Przejść na następne stanowisko			
		E – Łączenie pokrętła z wrzecionem	Pobrać pokrętło		
	Pobrać wrzeciono			Z pojemnika na regale pochyłym	
	Umieścić wrzeciono w otworze pokrętła				
	Umieścić zesp. wrzeciono-pokrętło na stole wiertarki			Przytrzymywać ręką. Zachować ostrożność!	

Rys. 2.3.12. Fragment Kart pracy standaryzowanej dla gniazda montażu zaworów butli gazowych.

Strategia realizacji produkcji

Projektując rozwiązania sterowania przepływem produkcji w pierwszym kroku określono strategię realizacji zamówień klientów. Podstawą była analiza zamówień oraz ich charakterystyka rotacyjności. Warianty te odnosiły się do wydzielonych rodzin wyrobów i danej grupy rotacyjności sprzedaży. Określono, które z wyrobów będą produkowane do magazynu, a które na konkretne zamówienie klientów (tab. 2.3.6).

Tabela. 2.3.6. Charakterystyka wariantów strategii produkcji.

Lp.	Wariant strategii produkcji	Za (+)	Przeciw (-)	Ryzyko
1	Zapasy wyrobów gotowych wszystkich grup (A, B, C), produkcja na magazyn	Wszystkie typy wyrobów są gotowe do wysyłki natychmiast po zamówieniu	Konieczne zapasy dla każdego typu wyrobu; wymagana duża przestrzeń magazynowa	Małe
2	Wykonywać wszystko na zamówienie klienta – nie utrzymywać zapasów wyrobów gotowych	Koszt magazynowania mały. Mała powierzchnia magazynowa.	Wymagana duża stabilność procesu; konieczny krótki czas przejścia	Srednie
3	Utrzymywanie zapasów wyrobów grupy C, wyroby grupy A i B produkowane zgodnie z zamówieniami klientów	Mniej zapasów	Wymagana duża stabilność procesu; konieczny krótki czas przejścia	Srednie
4	Utrzymywanie zapasu wyrobów grupy A i B, wyroby grupy C produkowane na zamówienie	100 % wysyłek w terminie dla klientów na wyroby A i B	Duży koszt zapasów. Duża powierzchnia ,magazynowa.	Małe

Dla każdego przyjętego wariantu określono czynniki przemawiające za przyjęciem oraz czynniki negatywne związane z wdrożeniem danego wariantu. Określono także ryzyko związane z nie terminową realizacją zamówień klientów. Dokonano także analizy

uwarunkowań zewnętrznych i wewnętrznych mających wpływ na dobór systemu sterowanie przepływem produkcji.

Przeprowadzone analizy dla rodzin wyrobów stały się podstawą określenia strategii produkcji dla każdej z nich (tab. 2.3.7). Głównym czynnikiem wpływającym na wybór strategii była forma współpracy z klientami w zakresie zamówień na wyroby. Wszystkie zamówienia miały charakter kontraktowy obejmujący sprecyzowaną liczbę wyrobów i terminy dostaw. Z tego względu zrezygnowano ze strategii produkcji na zapas.

Tabela. 2.3.7. Wybór strategii produkcji dla rodzin wyrobów

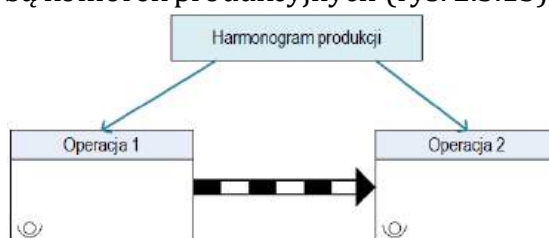
Rodzina wyrobów	Strategia realizacji zamówień klientów
Czwórnik	2
Dławik	2
Kamień	2
Kolanko	2
Korek	2
Korpusy	2
Kurek	2
Nakrętka	2
Oslona	2
Pierścienie	2
Pokrywa	2
Trójknik	2
Zawór Z6	2
Zawór RBA	2

Wybrany rodzaj strategii produkcji opiera się na zasadzie produkcji na zamówienie klienta. Produkcja jest uruchamiana po potwierdzeniu zamówienia. W tym przypadku nie występują zapasy wyrobów gotowych.

Modele sterowania przepływem produkcji

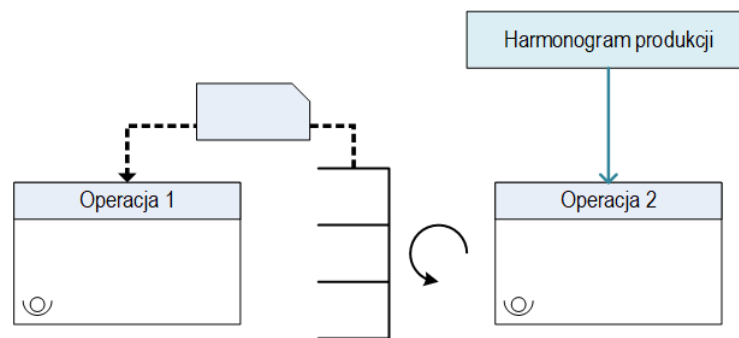
Do zaprojektowania wariantów nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji zastosowano kilka metod związanych z różnymi koncepcjami:

1. Push – harmonogram – przepływ materiałów jest realizowany na podstawie harmonogramów produkcji bez uwzględniania rzeczywistych wymagań kooperujących ze sobą komórek produkcyjnych (rys. 2.3.13).



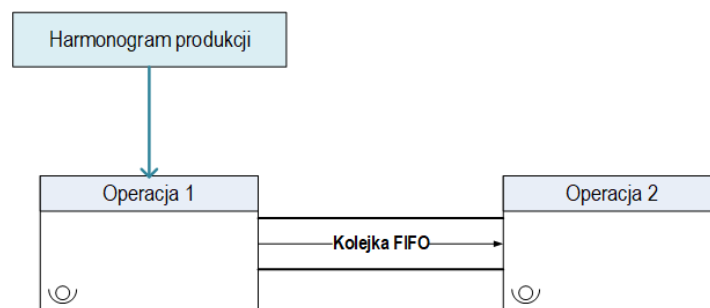
Rys. 2.3.13. Zasada metody push sterowania przepływem produkcji

2. Pull typu supermarket – przepływ materiałów odbywa się na podstawie rzeczywistego zużycia materiałów, części i wyrobów w supermarkecie stanowiący zapas pomiędzy kooperującymi komórkami produkcyjnymi (rys. 2.3.14).



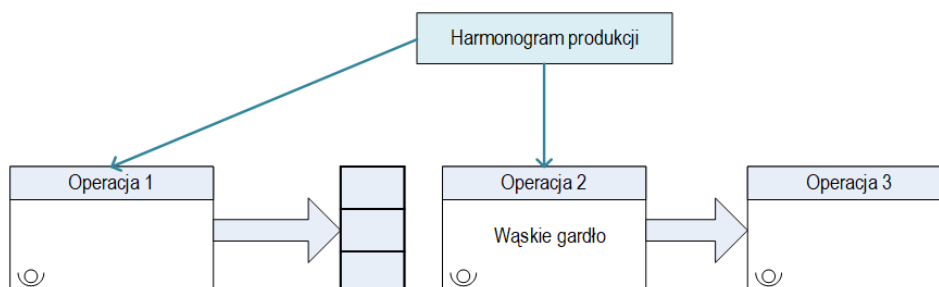
Rys. 2.3.14. Zasada metody pull typu supermarket sterowania przepływem produkcji

3. Pull sekwencyjny – przepływ odbywa się według ustalonej sekwencji produkcji ale z kontrolą ilości części pomiędzy komórkami produkcyjnymi (rys. 2.3.15).



Rys. 2.3.15. Zasada metody pull sekwencyjny sterowania przepływem produkcji.

4. Werber-bufor-lina – przepływ jest regulowany pracą wąskiego gardła w procesie produkcyjnym (rys. 2.3.16).



Rys. 2.3.16. Zasada metody WBL sterowania przepływem produkcji.

Metody te były podstawą opracowania wariantów sterowania przepływem produkcji dla wyodrębnionych rodzin wyrobów.

Wskazane metody były podstawą do opracowania nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji dla wydzielonych rodzin wyrobów. Opracowano kilka ich

wariantów, które stały się przedmiotem analizy pod kątem możliwości i zasadności ich wdrożenia.

Celem było wprowadzenie metod, które zapewnią synchronizację przepływu materiałów w procesie produkcyjnym przy jednoczesnym zmniejszeniu zapasów międzyoperacyjnych oraz pozwolą na kontrolowanie realizacji zleceń produkcyjnych. Konieczne było także uwzględnienie wymagań klientów ilościowych, czasowych oraz np. związanych z wielkościami opakowań zbiorczych. Do projektowania nowych rozwiązań zastosowano jak w przypadku analizy stanu obecnego narzędzie VSM (Mapowanie strumienia wartości). Poniżej przedstawiono wybrane mapy strumienia wartości stanu przeszłego (rys. 2.3.17 i 2.3.18).

Opracowane warianty podlegały analizie w celu wyboru dla każdej rodziny wyrobów rozwiązania akceptowalnego. Podstawą wyboru były planowane wskaźniki przepływu produkcji w systemie produkcyjnym ale także przyjęta strategii produkcji.

Poniżej w tabeli 2.3.8 przedstawiono zestawienie wybranych rozwiązań sterowania przepływem produkcji oraz strategii realizacji zamówień klientów.

Tabela. 2.3.8. Wybór strategii produkcji dla rodzin wyrobów.

Rodzina wyrobów	Metoda sterowania przepływem produkcji	Strategia realizacji zamówień klientów
Czwórnik	Pull sekwencyjny	2
Dławik	Pull sekwencyjny	2
Kamień	Pull sekwencyjny	2
Kolanko	Pull sekwencyjny	2
Korek	Pull sekwencyjny	2
Korpusy	Pull sekwencyjny	2
Kurek	Pull sekwencyjny	2
Nakrętka	Pull sekwencyjny	2
Oslona	Pull sekwencyjny	2
Pierścienie	Pull sekwencyjny	2
Pokrywa	Pull sekwencyjny	2
Trójnik	Pull sekwencyjny	2
Zawór Z6	Pull sekwencyjny	2
Zawór RBA	Pull sekwencyjny	2

Dla przyjętych rozwiązań zostały opracowane procedury i narzędzia wspomagające sterowania przepływem produkcji, które następnie zostały wdrożone w systemie produkcyjnym.

2.3.4. Efekty wdrożenia nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji

W ramach zadań weryfikacyjnych przeprowadzono badania funkcjonowania nowych rozwiązań w warunkach rzeczywistych. Zakres badań obejmował:

- funkcjonowanie standardów i związanych z przepływem materiałów łącznie z wykorzystaniem systemu informatycznego,
- pomiar wskaźników związanych z przepływem produkcji.

Przyjęto następujące wskaźniki oceny:

- czas przejścia materiału w procesie produkcyjnym,
- średni czas realizacji zleceń produkcyjnych,
- średni zapas produkcji w toku.

Czas przejścia materiału w procesie produkcyjnym

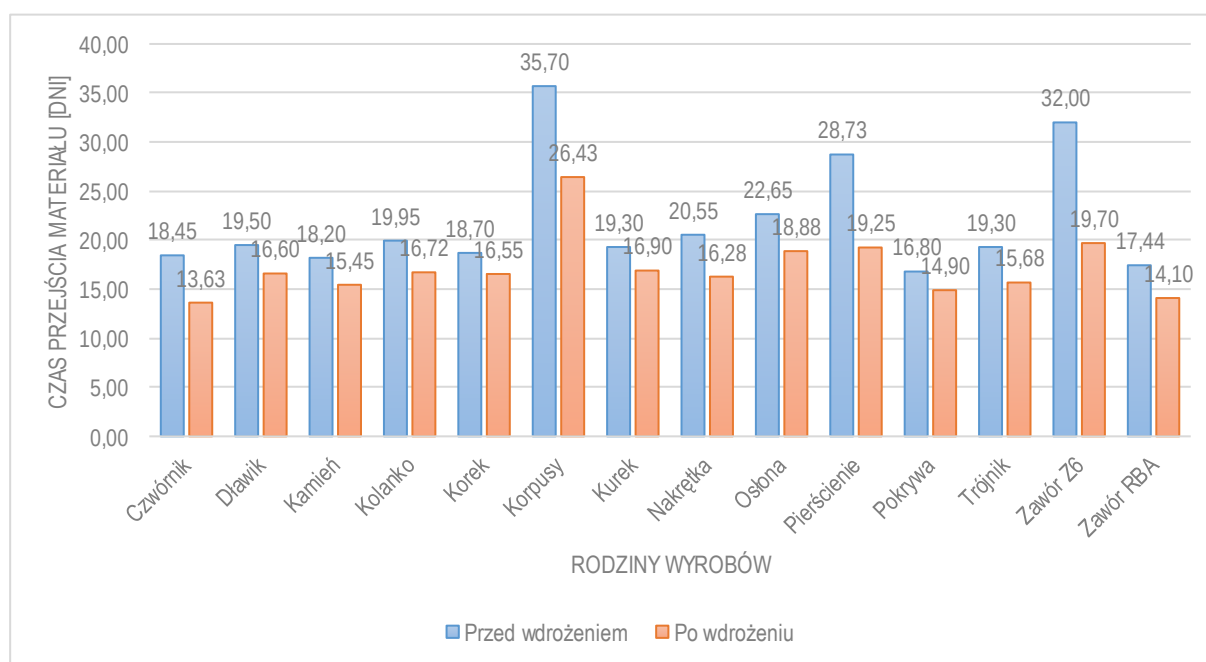
Kolejnym wskaźnikiem na podstawie, którego dokonano oceny nowych rozwiązań był czas przejścia materiału (ang. Lead time). Określa on czas „pobytu” materiałów

w systemie produkcyjnym – „jak długo płynie materiał”. Analizę przeprowadzono na podstawie rzeczywistych pomiarów na hali produkcyjnej.

Wyniki przeprowadzonej analizy dla rodzin wyrobów przedstawiono w tabeli 2.3.9 oraz wykresie na rys. 2.3.19.

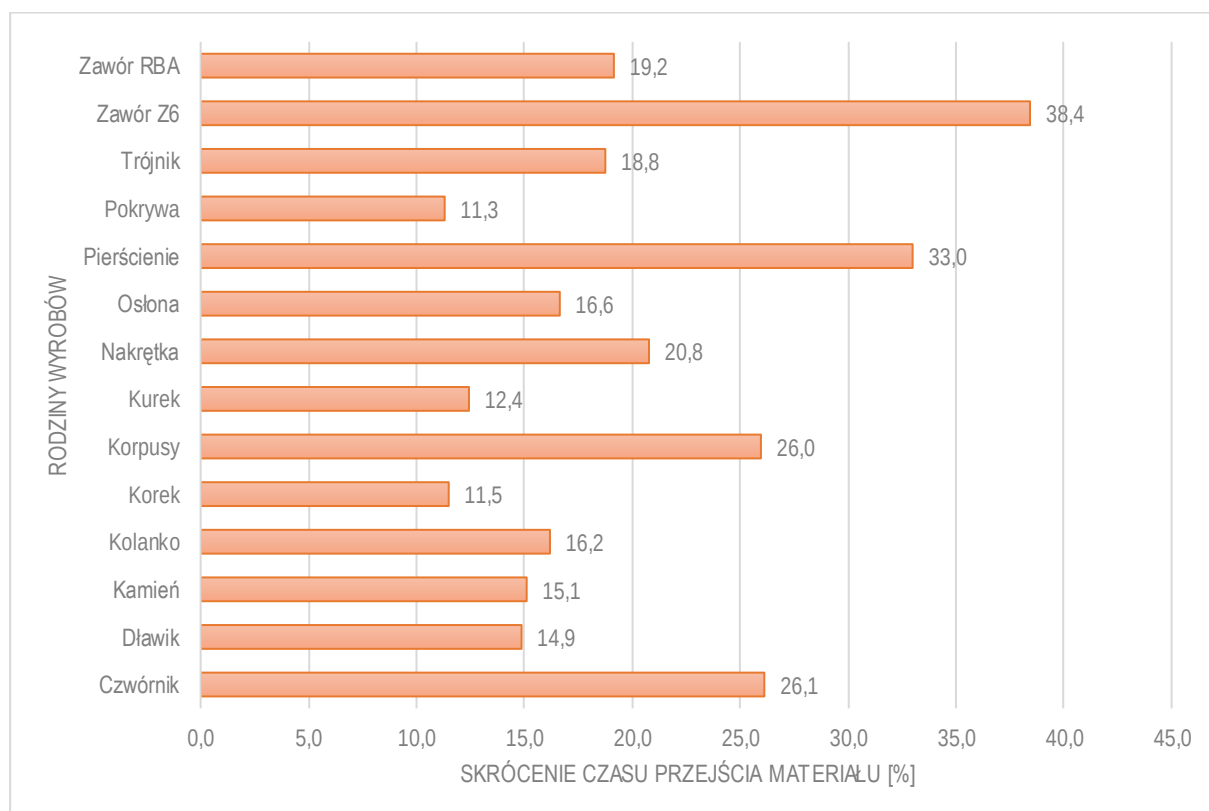
Tabela. 2.3.9. Porównanie czasów przejścia materiałów w procesie produkcyjnym przed i po wdrożeniu nowych rozwiązań

Rodzina wyrobów	Czas przejścia materiału przed wdrożeniem [dni]	Czas przejścia materiału po wdrożeniu [dni]	Różnica [dni]
Czwórnik	18,45	13,63	4,82
Dławik	19,50	16,60	2,90
Kamień	18,20	15,45	2,75
Kolanko	19,95	16,72	3,23
Korek	18,70	16,55	2,15
Korpusy	35,70	26,43	9,27
Kurek	19,30	16,90	2,40
Nakrętka	20,55	16,28	4,27
Oslona	22,65	18,88	3,77
Pierścienie	28,73	19,25	9,48
Pokrywa	16,80	14,90	1,90
Trójkąt	19,30	15,68	3,62
Zawór Z6	32,00	19,70	12,30
Zawór RBA	17,44	14,10	3,34



Rys. 2.3.19. Czas przejścia materiału w procesie produkcyjnym .

Wdrożenie nowych rozwiązań miało bezpośredni wpływ na zmniejszenie czasu przejścia materiału w procesie produkcyjnym dla wszystkich rodzin wyrobów. Dla poszczególnych rodzin wyrobów wartość ta wynosi od 16,7 % do 37,5% (rys. 2.3.20).



Rys. 2.3.20. Skrócenie czasu przejścia materiału w procesie produkcyjnym.

Nowe rozwiązania sterowania przepływem produkcji w największym stopniu miały wpływ na skrócenie czasu przejścia dla rodziny wyrobów Zawór Z6 (38,4%) oraz Pierścienie synchronizatora (33%).

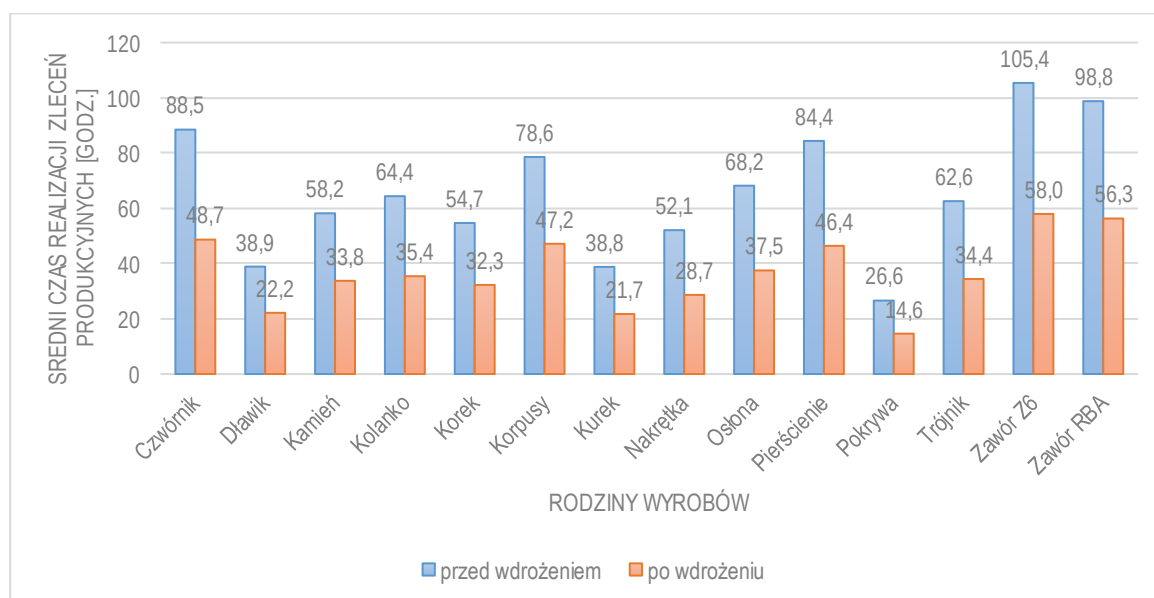
Średni czas realizacji zleceń produkcyjnych

Pomiarów dokonano na podstawie ewidencji czasów uruchomienia i zakończenia realizacji testowych zleceń produkcyjnych. W celu weryfikacji danych porównano je z wynikami otrzymanymi przed wprowadzeniem nowych rozwiązań. Analizę wyników przeprowadzono dla każdej rodziny wyrobów (tab. 2.3.9).

Tabela. 2.3.9. Porównanie czasów średnich czasów realizacji zleceń produkcyjnych przed i po wdrożeniu nowych rozwiązań

Rodzina wyrobów	Średni czas realizacji zleceń produkcyjnych – przed wdrożeniem [godz.]	Średni czas realizacji zleceń produkcyjnych – po wdrożeniu [godz.]	Różnica [%]
Czwórnik	88,5	48,7	45
Dławik	38,9	22,2	43
Kamień	58,2	33,8	42
Kolanko	64,4	35,4	45
Korek	54,7	32,3	41
Korpusy	78,6	47,2	40
Kurek	38,8	21,7	44
Nakrętka	52,1	28,7	45
Oslona	68,2	37,5	45
Pierścienie	84,4	46,4	45
Pokrywa	26,6	14,6	45
Trójnik	62,6	34,4	45
Zawór Z6	105,4	58,0	45
Zawór RBA	98,8	56	45

Wyniki wskazują, że średnie czasy realizacji zleceń produkcyjnych dla rodzin wyrobów po wdrożeniu nowych rozwiązań uległy zmniejszeniu w porównaniu do okresu przed wdrożeniem (rys. 2.3.19).



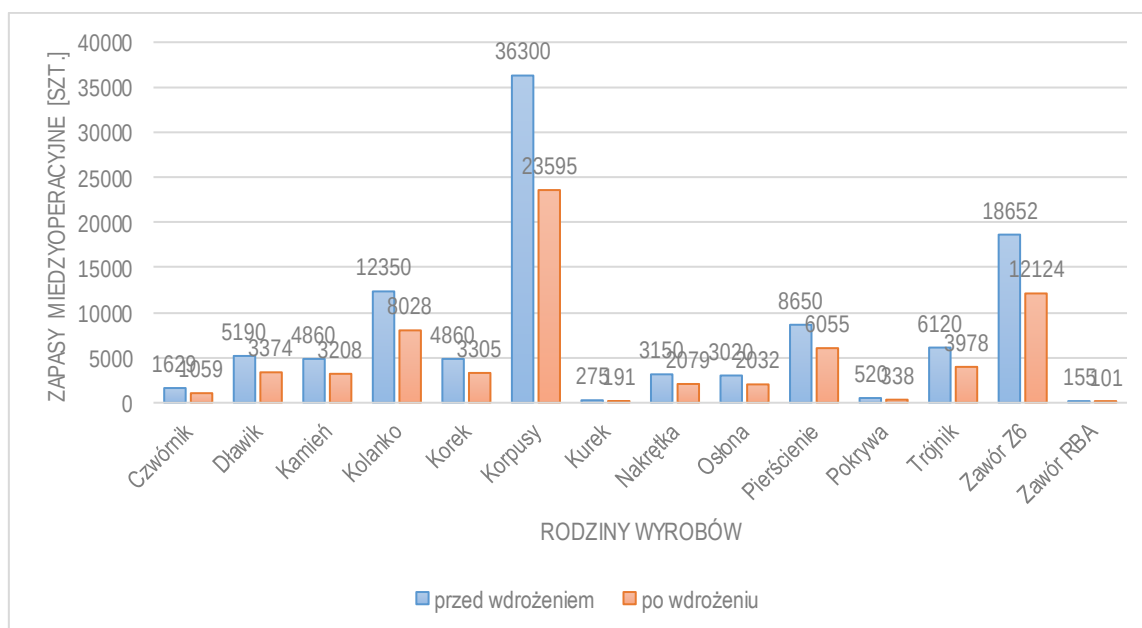
Rys. 2.3.19. Porównanie średnich czasów realizacji zleceń produkcyjnych.

Zapasy międzyoperacyjne

W ramach testów weryfikacyjnych dokonano także pomiarów zapasów międzyoperacyjnych występujący pomiędzy kolejnymi etapami procesu produkcyjnego. Analizę przeprowadzono na podstawie rzeczywistych pomiarów na hali produkcyjnej. Wyniki przeprowadzonej analizy dla rodzin wyrobów przedstawiono w tabeli 2.3.10 oraz na rys. 2.3.20.

Tabela 2.3.10. Zapasy międzyoperacyjne przed i po wdrożeniu nowych rozwiązań.

Rodzina wyrobów	Zapasy międzyoperacyjne przed wdrożeniem [szt.]	Zapasy międzyoperacyjne po wdrożeniu [szt.]	Różnica [%]
Czwórnik	1629	1059	35
Dławik	5190	3374	35
Kamień	4860	3208	34
Kolanko	12350	8028	35
Korek	4860	3305	32
Korpusy	36300	23595	35
Kurek	275	191	31
Nakrętka	3150	2079	34
Ośłona	3020	2032	33
Pierścienie	8650	6055	30
Pokrywa	520	338	35
Trójkąt	6120	3978	35
Zawór Z6	18652	12124	35
Zawór RBA	155	101	35



Rys. 2.3.20. Średnie zapasy międzyoperacyjne.

2.3.5. Wnioski

W ramach projektu opracowano i wdrożono nowy system sterowania przepływem produkcji dedykowanego dla przedsiębiorstwa Fabryka Armatur „Swarzędz” sp. z o.o. , który pozwolił uzyskać wzrost efektywności produkcji.

W wyniku realizacji projektu i wdrożenia nowego sposobu sterowania przepływem produkcji:

- zmniejszono czasy realizacji zleceń produkcyjnych,
- zmniejszono poziom zapasów produkcji w toku,
- wprowadzono nowoczesne koncepcje zarządzania przepływem materiałów,
- wyeliminowano problemy w wymianie informacji pomiędzy różnymi działami przedsiębiorstwa,
- uzyskano dostęp do aktualnych danych związanych z realizowaną produkcją,
- wyeliminowano nieefektywny sposób planowania i sterowania produkcją (ręczne sterowanie),
- wprowadzono synchronizację przepływu materiałów pomiędzy kolejnymi etapami procesów produkcyjnych.

Uzyskane efekty przyniosły wymierne korzyści finansowe i pozwoliły na poprawę konkurencyjności przedsiębiorstwa.

2.4. Projekt: Opracowanie i wdrożenie systemu sterowania produkcją wielowariantową

2.4.1. Cel i zakres projektu

Projekt dotyczył opracowania i wdrożenia do praktyki przemysłowej systemu sterowania produkcją dedykowanego dla przedsiębiorstwa DOMEX sp. z o.o. Opracowany i wdrożony system uwzględniał specyfikę produkcyjną przedsiębiorstwa. System zawiera rozwiązania dotyczące planowania i sterowania przepływem produkcji dla produkcji wieloasortymentowej.

Przedsiębiorstwo Domex sp. z o.o. jest producentem armatury wodociągowej, kanalizacyjnej i gazowej. Głównymi wyrobami są:

- łączniki rurowe, rurowo-kołnierzowe, redukcyjne,
- nasuwki,
- hydranty naziemne, podziemne,
- doszczelniacze,
- opaski naprawcze,
- nasady,
- źródła,
- kompensatory,
- obudowy do zasuw.

Klientami są indywidualni odbiorcy, przedsiębiorstwa instalacyjne ale przede wszystkim przedsiębiorstwa wodociągowe i gazownicze.

Głównym celem głównym projektu było opracowanie i wdrożenie rozwiązań, które pozwolą osiągnąć wzrost efektywności przepływu produkcji, a tym samym podnieść konkurencyjności przedsiębiorstwa.

Przedmiot projektu został zrealizowany w ramach badań przemysłowych, prac rozwojowych oraz prac wdrożeniowych. Badania przemysłowe obejmowały analizę i badania przebiegu produkcji (schemat postępowania związanego z realizacją zamówień, procesy technologiczne, przepływ materiałów i informacji) realizowanego w obecnym układzie organizacyjnym. Pozwoliło to na opracowanie w ramach prac rozwojowych nowego modelu systemu sterowania produkcją (procedury, instrukcje), oraz przyjęcia rozwiązań technicznych w zakresie nadzorowania produkcji. Prace wdrożeniowe dotyczyły uruchomienia nowego systemu sterowania produkcją w systemie produkcyjnym oraz przeprowadzeniu testów weryfikacyjnych.

2.4.2. Analiza przepływu materiałów i informacji w systemie produkcyjnym

Celem tego etapu było przeprowadzenie badań związanych z przepływem materiałów i informacji w procesach produkcyjnych dla rodzin wyrobów w obecnym środowisku produkcyjnym.

Przeprowadzono analizę procesów technologicznych pod kątem możliwości wydzielenia rodzin wyrobów. Jako kryterium przyjęto podobieństwo technologiczne (wyroby charakteryzujące się tymi samymi lub podobnymi operacjami technologicznymi wykonywanymi na tych samych urządzeniach).

Przeprowadzono także analizę przepływu materiałów związaną z realizacją procesów technologicznych. Dokonano pomiarów parametrów związanych z realizowanymi operacjami technologicznymi: czas cyklu, czas przebrojenia i porównano je z danymi w dokumentacji technologicznej. W związku z analizą przepływu materiałów prześledzono realizację procesów wytwórczych w zakresie przemieszczania materiałów, zapasu robót w toku, powiązań pomiędzy komórkami produkcyjnymi. W wyniki zrealizowanego zadania opracowano mapy przepływu materiałów i informacji stanu obecnego (mapy strumienia wartości).

Wydzielenie rodzin wyrobów

Przedmiotem tego etapu zadania było określenie czy w asortymencie wyrobów produkowanych w przedsiębiorstwie można wydzielić grupy, dla których będzie można opracować organizację przepływu produkcji.

Jako kryterium wydzielenia rodzin wyrobów przyjęto podobieństwo technologiczne (wyroby charakteryzujące się tymi samymi lub podobnymi operacjami technologicznymi wykonywanymi na tych samych stanowiskach produkcyjnych). W tym celu przeanalizowano dane o procesach technologicznych w aspekcie wykorzystywanych stanowisk na potrzeby realizacji poszczególnych operacji. Analizie podlegało 822 wyrobów. Realizacja zadania wymagała jednak w pierwszym rzędzie opracowania struktury wyrobów oraz ujednolicenia danych dotyczących operacji technologicznych oraz ich podstawowych parametrów czasowych. Było to spowodowane tym iż

w przedsiębiorstwie nie było sformalizowanych danych dotyczących w tych obszarach. Dane były rozproszone i uniemożliwiały przeprowadzenie rzetelnej analizy procesów technologicznych.

Na podstawie opracowanej dokumentacji opracowano macierz podobieństwa technologicznego wyrobów. Fragment macierzy przedstawiono na rys. 2.4.1.

			Kabina malarska	Oczyszczarka "Maglac"	MAG STER 350C	MIG/MAG "EWI"	Przećniarka Siłoma	Prasa 40 T	WKA-40	Frezarka pionowa uniwersalna	TUR-630M	"KOR 400"	TUR-50 S	Tarnów SNA 630x2000	Szifierka tarczowa 250	Walcarka fi 300/ L=2000	Zwijarka MC4P4311	Kłeszcze MKV 140	1531 M	Przećniarka taśmowa "PILOUS"	Nożyce gilotynowe	Opaski	Montaż hydrantów	Próba szczelności	Montaż	Uszczelki	WRA 50/2	MC-524	350 tarcza	WSD - 16 A2	FLOTT EL	CTX 510 eco	DMC 55 h eco
ŁĄCZNIKI																																	
Łącznik rurowy	RR																								X								
	Korpus	RR	X	X																													
	Uszczelka	RR																								X							
	Pokrywka	RR	X	X																													
Łącznik rurowo-kołnierzowy	RK																								X								
	Korpus	RK	X	X						X	X																	X					
	Uszczelka	RK																								X							
	Pokrywka	RK	X	X																													
Łącznik rurowy z zabezpieczeniem	RR-E																								X								
	Tuleja	RR-E	X	X																													
	Obręcz	RR-E																															
	Pierścień	RR-E	X	X																													X
	Uszczelka	RR-E																								X							
Łącznik rurowo-kołnierzowy z zabezpieczeniem	RK-E																								X								
	Pokrywka	RK-E																															
	Pierścień	RK-E	X	X																							X						X
	Korpus	RK-E	X	X																								X					X
Łącznik rurowy uniwersalny	RU																								X								
	Pokrywka	RU	X	X																													
	Korpus	RU	X	X																													
	Uszczelka	RU																								X							
Łącznik rurowo-kołnierzowy uniwersalny	RKU																								X								
	Pokrywka	RKU	X	X																													
	Korpus	RKU	X	X									X																				
	Uszczelka	RKU																								X							
Łącznik rurowo stalowy	RRS, RRS-R																								X								
	Tuleja	RRS, RRS-R	X	X	X	X										X		X															
	Szpilka	RRS, RRS-R				X																											
	Obręcz	RRS, RRS-R	X	X	X	X	X											X															
	Uszczelka	RRS, RRS-R																								X							
Łącznik rurowo-kołnierzowy stalowy	RKS, RKS-E																								X								
	Tuleja		X	X	X	X										X		X															
	Kołnierz		X	X		X																											
	Szpilka					X																											

Rys. 2.4.1. Fragment macierzy podobieństwa technologicznego.

Na podstawie analizy macierzy podobieństwa technologicznego wyodrębniono siedemnaście rodzin wyrobów:

1) Łączniki A, w skład których wchodzi następujące wyroby:

- łącznik rurowy,
- łącznik rurowo-kołnierzowy,
- łącznik rurowy z zabezpieczeniem,
- łącznik rurowo kołnierzowy z zabezpieczeniem,

- łącznik rurowy uniwersalny,
 - łącznik rurowo-kołnierzowy uniwersalny.
- 2) Łączniki B, w skład których wchodzi następujące wyroby:
- łącznik rurowy stalowy,
 - łącznik rurowo-kołnierzowy stalowy.
- 3) Łączniki C, w skład których wchodzi następujące wyroby:
- łącznik rurowy stalowy z zabezpieczeniem,
 - łącznik rurowo-kołnierzowy stalowy z zabezpieczeniem.
- 4) Nasuwki A, w skład których wchodzi następujące wyroby:
- nasuwka pełna uniwersalna,
 - nasuwka pełna z uszczelniaczem gumowym.
- 5) Nasuwki B, w skład których wchodzi następujące wyroby:
- nasuwka dwudzielna uniwersalna,
 - nasuwka naprawcza,
 - nasuwka trójdzielna.
- 6) Opaski naprawcze.
- 7) Nasady, w skład których wchodzi następujące wyroby:
- nasada rurowa gwintowa,
 - nasada rurowa kołnierzowa,
 - nasada kołnierzowa.
- 8) Hydranty A, w skład których wchodzi następujące wyroby:
- hydrant podziemny z podwójnym zabezpieczeniem,
 - hydrant podziemny żeliwny z podwójnym zabezpieczeniem,
 - hydrant podziemny z pojedynczym zabezpieczeniem.
- 9) Hydranty B, w skład których wchodzi następujące wyroby:
- hydrant nadziemny z pojedynczym zabezpieczeniem,
 - hydrant nadziemny z podwójnym zabezpieczeniem.
- 10) Hydranty C, w skład których wchodzi następujące wyroby:
- hydrant nadziemny łamany z pojedynczym zabezpieczeniem,
 - hydrant nadziemny łamany z podwójnym zabezpieczeniem,
 - hydrant nadziemny żeliwny łamany z podwójnym zabezpieczeniem.
- 11) Zdrój uliczny (z zabezpieczeniem przed zamarzaniem).
- 12) Kompensatory.
- 13) Wstawki, w skład których wchodzi następujące wyroby:
- wstawka montażowa kompensacyjna typ F2,
 - wstawka montażowa kompensacyjna typ F3.
- 14) Doszczelniacze:
- doszczelniacz,
 - kołnierz zaciskowy,
 - kołnierz przejściowy.

- 15)Konsola do wodomierza.
- 16)Kołnierze
- 17)Wkład do rur.

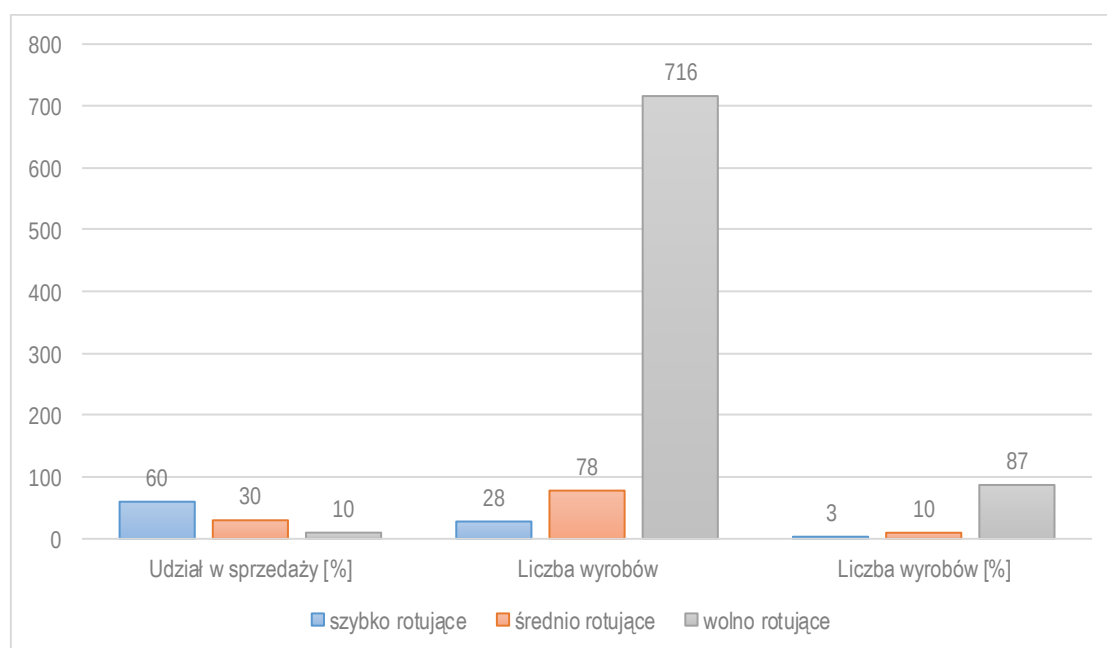
Wydzielone rodziny wyrobów były podstawą do przeprowadzenia dalszych analiz związanych z określeniem stanu obecnego i wymagań koniecznych do spełnienia przez nowe rozwiązania.

Analiza rotacyjności sprzedaży asortymentu produkcji

Celem analizy było poznanie charakterystyki zamówień na produkowane wyroby głównie ze względu na wielkości i częstotliwości sprzedaży. Przyjęte zasady wydzielenia grup wyrobów ze względu na rotacyjność sprzedaży zakładały ich podział na trzy grupy. Grupa pierwsza obejmuje wyroby, których skumulowana liczba sprzedaży wnosi 60%, dla drugiej grupy wynosi ona kolejne 30%, pozostałe wyroby należą do grupy 3. W tabeli 2.4.1. oraz na rys. 2.4.2 przedstawiono liczby wyrobów w procentach odpowiedzialne na poszczególne wartości sprzedaży.

Tab. 2.4.1. Podsumowanie analizy rotacyjności sprzedaży wszystkich wyrobów.

Grupa	Sprzedaż narastająco [%]	Liczba wyrobów	Liczba wyrobów narastająco [%]
1 – szybko rotujące	60	28	3
2 – średnio rotujące	90	78	10
3 – wolno rotujące	100	716	87



Rys. 2.4.1. Wykres podsumowania analizy rotacyjności sprzedaży wszystkich wyrobów.

Na podstawie analizy można stwierdzić, że pod względem liczby sprzedanych sztuk 28 typów wyrobów opowiada aż za 60 % ilości sprzedaży co stanowi 3 % wszystkich wyrobów. Natomiast największą grupę stanowią wyroby wolnorotujące – 716 odpowiadające za 10 % wartości sprzedaży.

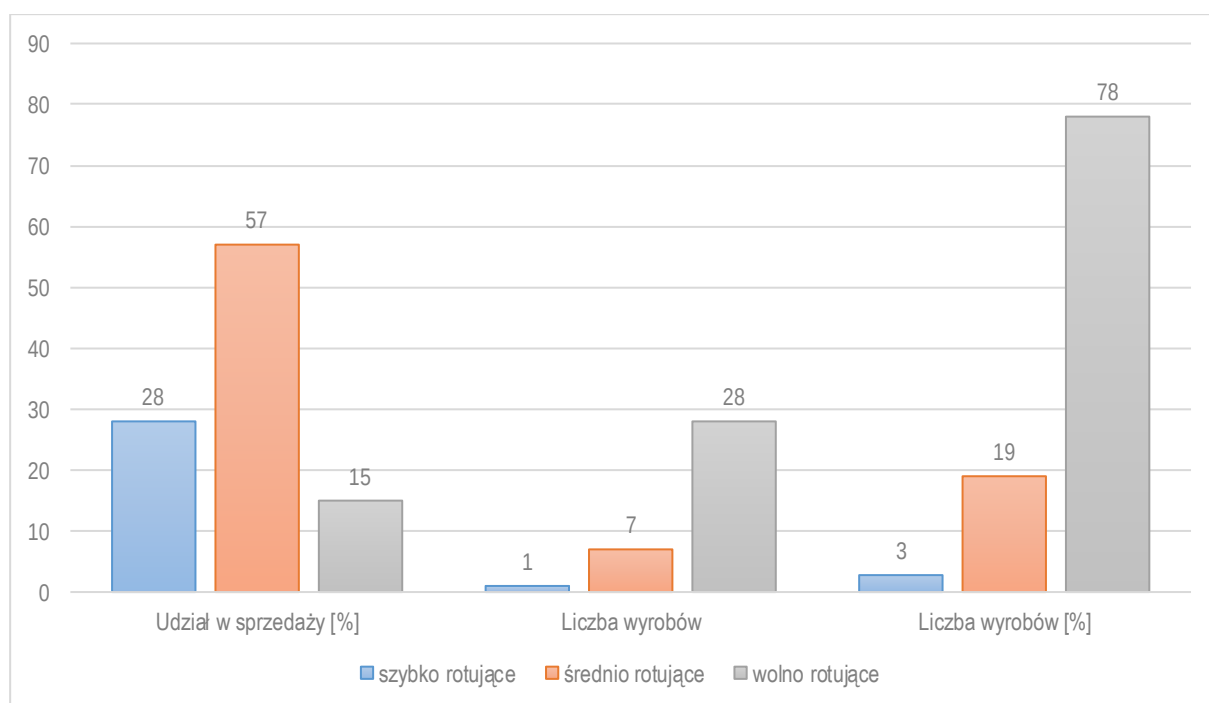
Poniżej przedstawiono wyniki analizy dla wybranych rodzin wyrobów.

Doszczelniacz - analiza rotacyjności sprzedaży

W tabeli 2.4.2. i na wykresie (rys. 2.4.2) przedstawiono wyniki analizy rotacyjności sprzedaży rodziny Doszczelniacz.

Tab. 2.4.2. Analiza rotacyjności – rodzina Doszczelniacz.

Grupa	Udział w sprzedaży [%]	Liczba wyrobów	Liczba wyrobów [%]
szybko rotujące	28	1	3
średnio rotujące	57	7	19
wolno rotujące	15	28	78



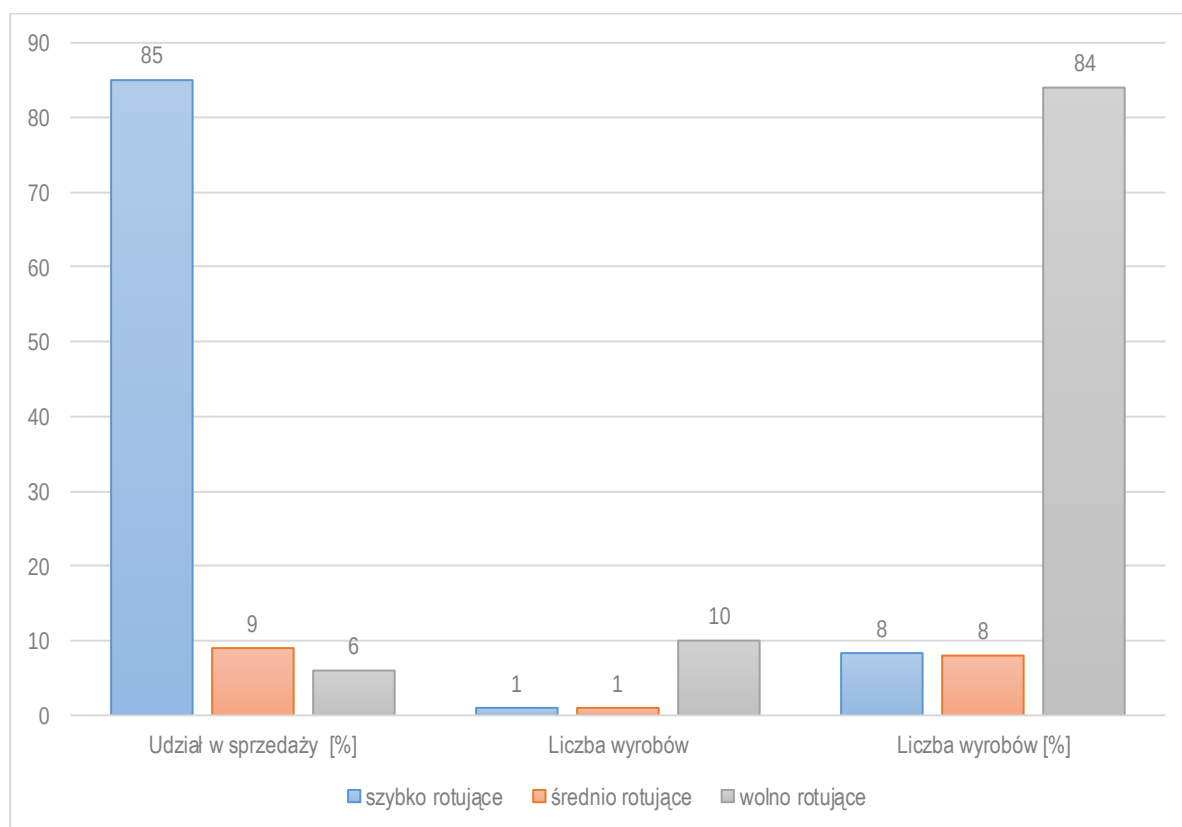
Rys. 2.4.2. Analiza rotacyjności sprzedaży wyrobów – rodzina Doszczelniacz.

Hydrant B - analiza rotacyjności sprzedaży

W tabeli 2.4.3. i na wykresie (rys. 2.4.3) przedstawiono wyniki analizy rotacyjności sprzedaży rodziny Hydrant B.

Tabela. 2.4.3. Analiza rotacyjności – rodzina Hydrant B.

Grupa	Udział w sprzedaży [%]	Liczba wyrobów	Liczba wyrobów [%]
szybko rotujące	85	1	8
średnio rotujące	9	1	8
wolno rotujące	6	10	84



Rys. 2.4.3. Analiza rotacyjności sprzedaży wyrobów – rodzina Hydrant B.

Przeprowadzone analizy rotacyjności sprzedaży wyrobów miały na celu określenie charakterystyki i danych niezbędnych do przyjęcia odpowiedniej strategii realizacji zamówień klientów.

2.4.3. Analiza przepływu materiałów i informacji w systemie produkcyjnym

Celem prac badawczych było przeprowadzenie badań związanych z przepływem materiałów i informacji w procesach produkcyjnych dla rodzin wyrobów w obecnym środowisku produkcyjnym.

Przeprowadzono także analizę przepływu materiałów związaną z realizacją procesów technologicznych. Dokonano pomiarów parametrów związanych z realizowanymi operacjami technologicznymi: czas cyklu, czas przebrojenia i porównano je z danymi w dokumentacji technologicznej. W związku z analizą przepływu materiałów prześledzono realizację procesów wytwórczych w zakresie przemieszczania materiałów, zapasu robót w toku, powiązań pomiędzy komórkami produkcyjnymi. W wyniki zrealizowanego zadania opracowano mapy przepływu materiałów i informacji stanu obecnego (mapy strumienia wartości).

W ramach prac przeprowadzono pomiary podstawowych parametrów związanych z realizacją kolejnych operacji technologicznych. Zakres prac obejmował wszystkie procesy technologiczne dla wyodrębnionych rodzin wyrobów. Dla danej operacji technologicznej dokonano pomiarów:

- czasu cyklu (C/T),
- czasu przebrojenia (C/O).

Zebrano także informacje dotyczące systemu pracy i liczbie zaangażowanych operatorów.

Poniżej przedstawiono dane pomiarowe dotyczące pomiarów dla rodziny wyrobów Nasuwki A. Elementami wyrobu podlegającymi produkcji są: korpus, pokrywki oraz uszczelka gumowa. Schemat procesów technologicznych dla tych elementów przedstawiono na rys. 2.4.4.

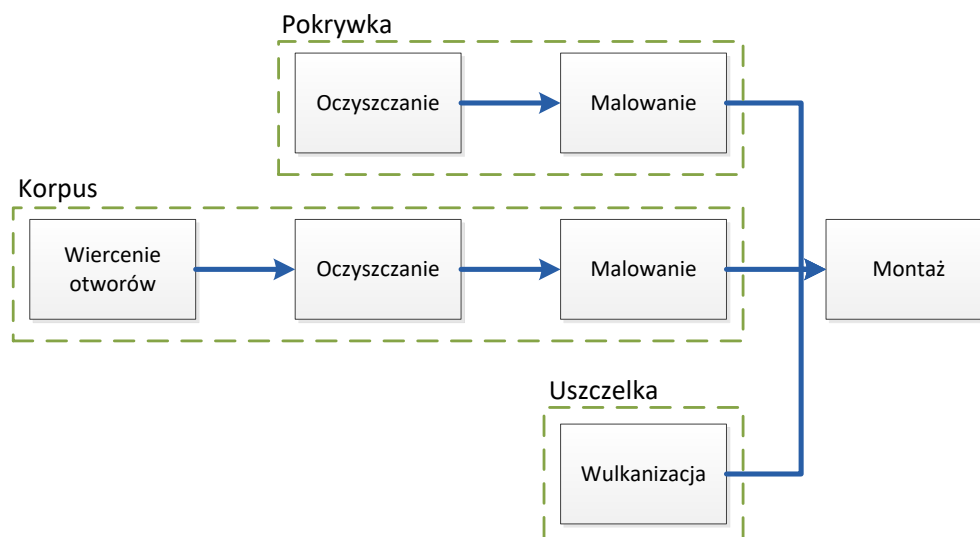
Proces technologiczny pokrywki obejmuje:

- oczyszczanie,
- malowanie.

Proces technologiczny korpusu składa się z:

- wiercenia otworów,
- oczyszczania,
- malowania.

Uszczelka jest wykonywana w procesie wulkanizacji.



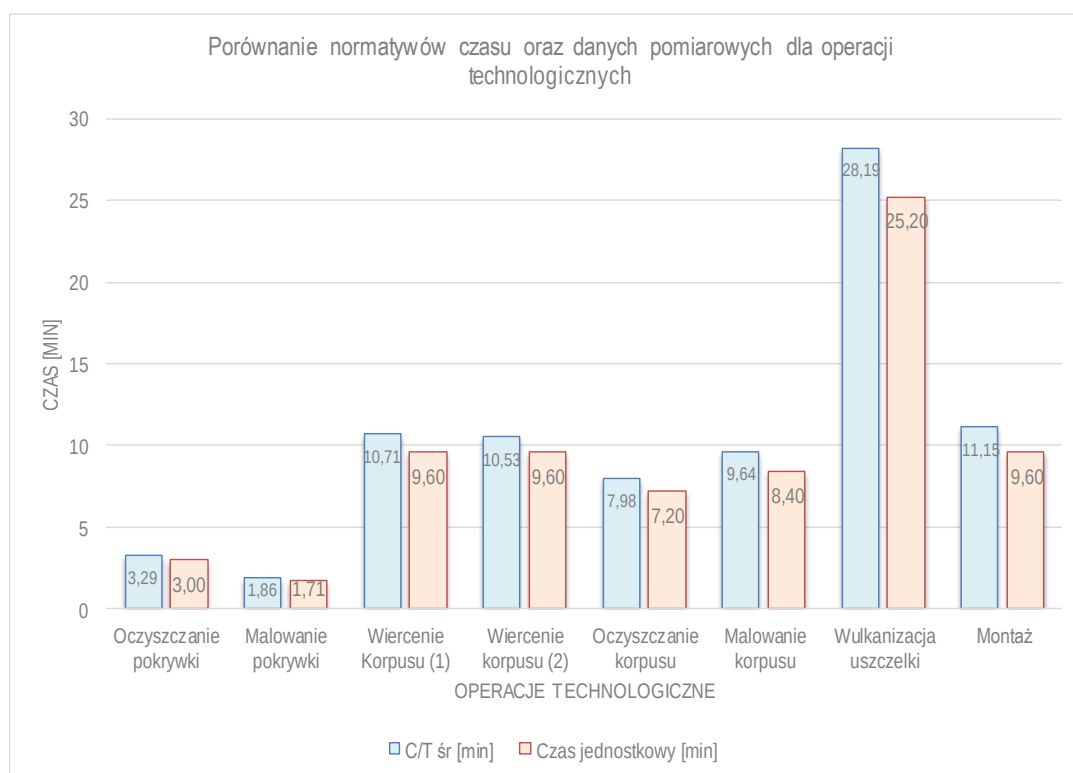
Rys. 2.4.4. Schemat procesu technologicznego rodziny wyrobów Nasuwki A.

Dla każdej operacji procesu technologicznego elementów struktury wyrobu gotowego dokonano pomiarów czasów cykli (czas pomiędzy wykonaniem dwóch kolejnych wyrobów). Pomiarów dokonano bezpośrednio na hali produkcyjnej. Wyniki pomiarów dla reprezentanta tej rodziny wyrobów przedstawiono w tabeli 2.4.1.

Tabela 2.4.4. Pomiary czasu cyklu reprezentanta rodziny wyrobów.

Część	Operacja	Pomiary C/T [min]					C/T śr [min]
		1	2	3	4	5	
Pokrywka	Oczyszczanie pokrywki	3.14	3.03	3.47	3.38	3.45	3.29
	Malowanie pokrywki	1.83	1.87	1.76	1.89	1.95	1.86
Korpus	Wiercenie Korpusu WRA 50/2	10.45	10.41	11.56	10.71	10.42	10.71
	Wiercenie korpusu MC-524	10.49	10.36	10.17	11.06	10.56	10.53
	Oczyszczanie korpusu	7.82	7.99	8.19	7.78	8.1	7.98
	Malowanie korpusu	9.19	9.56	10.41	9.89	9.16	9.64
Uszczelka	Wulkanizacja uszczelki	27.96	25.67	29.86	28.56	28.89	28.19
	Montaż	11.46	10.12	12.61	10.89	10.67	11.15

Celem przeprowadzonych pomiarów było także dokonanie weryfikacji norm zakładowych wyrażonej czasem jednostkowym (rys. 2.4.5).



Rys. 2.4.5. Porównanie czasu cyklu operacji i czasu jednostkowego rodziny wyrobów Nasuwki A.

Pomiary wykazały niedoszacowanie normatywów technologicznych na podstawie, których podejmowane były decyzje związane ze sterowaniem przepływem produkcji.

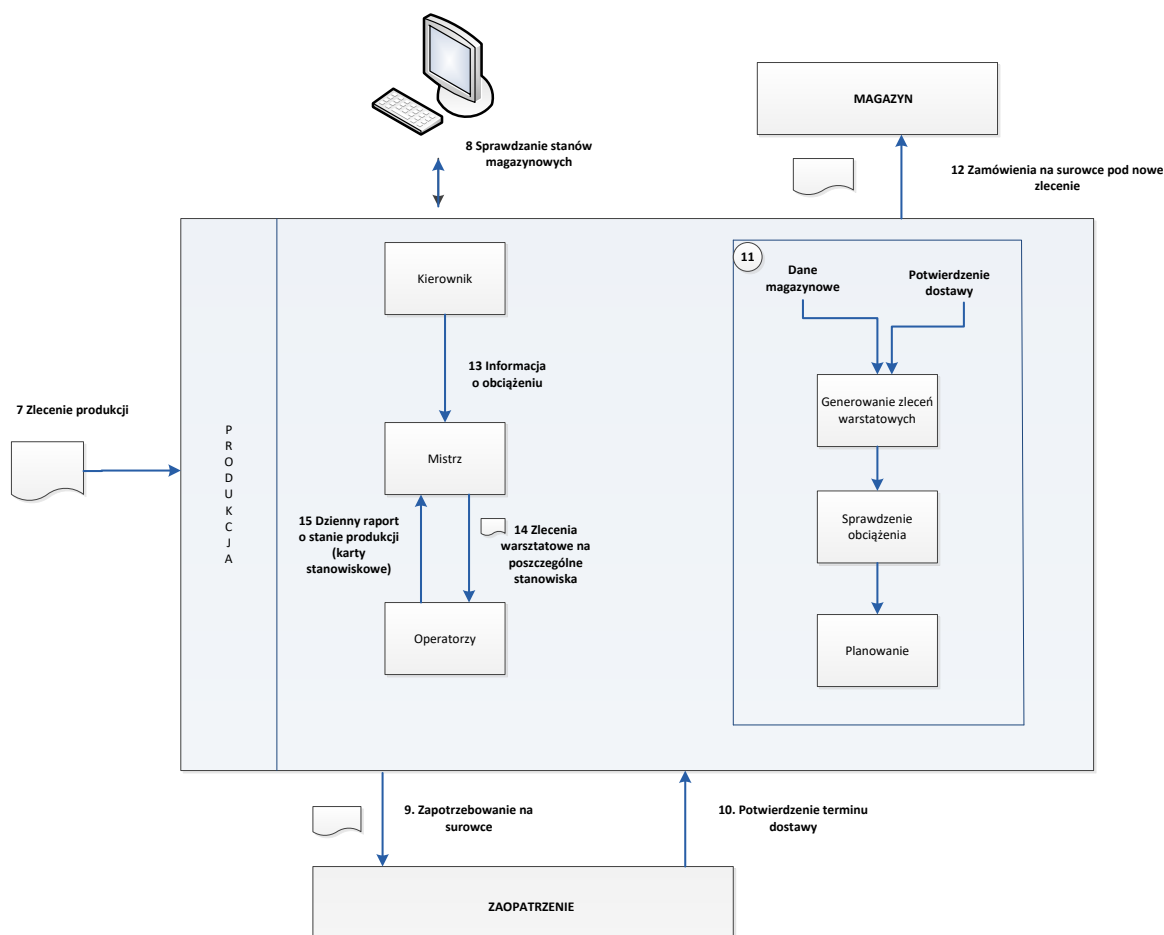
Analiza przepływu materiałów polegała na identyfikacji miejsc, ilości i przyczyn powstawania zapasów międzyoperacyjnych oraz charakter zasad przepływu materiałów w procesie produkcyjnym. W tym celu dokonano pomiarów ilościowych zapasów oraz

poprzez wywiad z pracownikami ustalono występujące zasady związane z przekazywaniem materiałów i wyrobów pomiędzy kolejnymi etapami procesu

Kolejnym obszarem podlegającym analizie był przepływ informacji związany z realizacją zamówień. Obszar analizy obejmował kanały przepływu informacji:

- przyjęcia zamówień od klientów,
- realizacji produkcji,
- zaopatrzenia materiałowego.

Badanie obiegu w zakresie przyjęć zamówień dotyczyło danych związanych z kontaktem z klientem (jego wymagań), kontaktów działu sprzedaży z działem produkcji na temat możliwych terminów realizacji zamówień, podejmowanych decyzji o zlecaniu produkcji. Obszar produkcji został poddany analizie pod kątem planowania i harmonogramowania produkcji (jak odbywa się planowanie i harmonogramowanie produkcji, jak pozyskiwane są informacje o możliwościach produkcyjnych i czasie realizacji zamówień); przekazywania informacji do i ze stanowisk oraz operatorów produkcyjnych (jak dostarczane są informacje, co i w jakiej kolejności produkować na danym stanowisku; w jaki sposób przekazywane są informacje o wykonanej produkcji); informacji o zapasach materiałów do produkcji (w jaki sposób są kontrolowane stany magazynowe, jak odbywa się uruchamianie zleceń) (rys. 2.4.6). Analiza w zakresie zaopatrzenia materiałowego dotyczyła identyfikacji danych na bazie, których są podejmowane decyzje o dostawie zakupów materiałów do produkcji.



Rys. 2.4.6. Ogólny schemat przepływu informacji w obszarze realizacji produkcji.

W wyniku przeprowadzonych analiz opracowano mapy przepływu materiałów i informacji stanu obecnego.

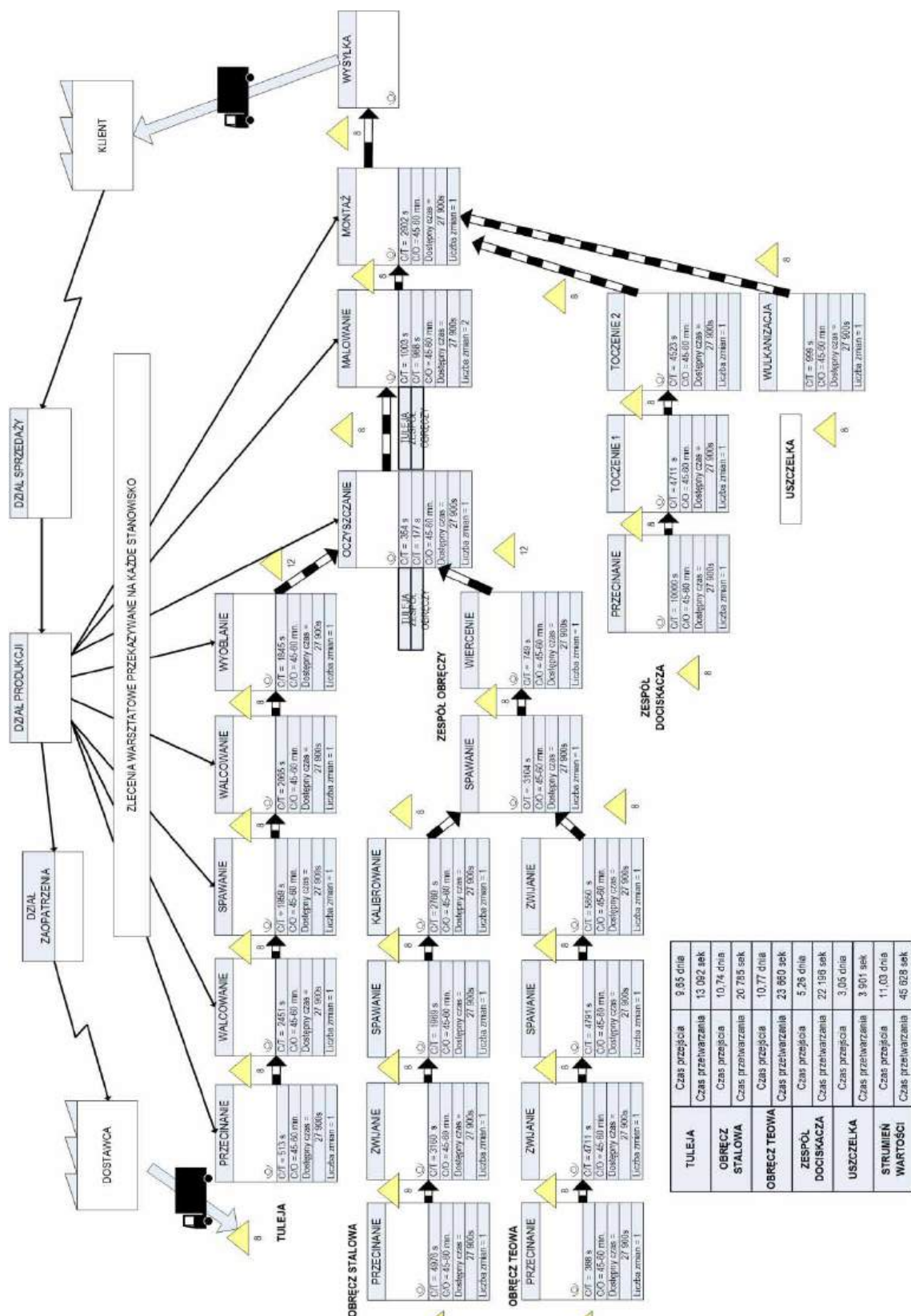
W tym celu zastosowano narzędzie ang. Value Stream Mapping (mapowanie strumienia wartości) będące podstawowym narzędziem koncepcji lean manufacturing. Mapy stanu obecnego zawierały informacje:

- wymagania klientów,
- charakterystykę dostaw materiałów,
- charakterystykę procesów technologicznych
- zasady przepływu materiałów,
- kanały i zasady przepływu informacji.

Dla tak opracowanych map stanu obecnego wyznaczono wskaźniki:

- czas przejścia materiału w procesie produkcyjnym,
- średni czas realizacji zbioru zleceń produkcyjnych,
- średnia wielkość zapasu robót w toku.

Poniżej przedstawiono wybrane mapy strumienia wartości dla dwóch rodzin wyrobów – łączniki B (rys. 2.4.7) oraz łączniki C (rys. 2.4.8).



Rys. 2.4.8. Mapa strumienia wartości stanu obecnego – rodzina wyrobów Łączniki C.

Analiza stanu obecnego wskazała główne problemy wpływające na efektywność przepływu produkcji:

- przepływ materiałów realizowany według zasady „pchania” (ang. push) – zlecenia produkcyjne są realizowane według indywidualnego harmonogramu produkcji komórek produkcyjnych co powoduje brak synchronizacji produkcji,
- częste zmiany planu produkcji z uwagi na pilne zamówienia oraz z powodu dużych partii produkcyjnych,
- brak synchronizacji przepływu materiałów pomiędzy kolejnymi etapami w procesie produkcji – nie uwzględnienie w pełni wymagań klientów,
- brak zasad dotyczących logistyki produkcji – zaangażowanie operatorów w proces kompletacji i transportu materiałów,
- nie skuteczny system identyfikacji materiałów w procesie produkcji – konieczność poszukiwania i problemy z interpretacją oznaczeń partii wyrobów,
- brak standardów i zasad związanych z przepływem informacji – brak aktualnych danych pozwalających na podejmowanie skutecznych decyzji operacyjnych,
- brak kontroli realizacji procesów produkcyjnych w „czasie rzeczywistym” - stan zaawansowania realizacji zleceń produkcyjnych można zasadniczo sprawdzić tylko na ostatnich operacjach procesu wytwarzania.

2.4.4. Opracowanie nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji

Głównym celem dla nowo projektowanych rozwiązań sterowania przepływem produkcji było zwiększenie synchronizacji przepływu materiałów w procesie produkcyjnym przy jednoczesnym spełnieniu wymagań klientów. Podstawą były analizy i badania przeprowadzone na podstawie danych uzyskanych w poprzednich zadaniach projektu. W pierwszym kroku określono strategię produkcji biorąc pod uwagę rotacyjność sprzedaży wyrobów oraz inne uwarunkowania determinujące realizację zamówień klientów (wyroby szybko rotujące – A, średnio rotujące – B, wolno rotujące – C). Na potrzeby określenia strategii realizacji produkcji przyjęto cztery warianty. Przy definiowaniu strategii produkcji wyrobów określono także potencjalne wady i zalety oraz ryzyko związane z niezrealizowaniem zamówień klientów (tab. 2.4.9).

Tabela. 2.4.9. Warianty strategii produkcji wyrobów.

Lp.	Wariant strategii produkcji	Za (+)	Przeciw (-)	Ryzyko
1	Zapasy wyrobów gotowych wszystkich grup (A, B, C), produkcja na magazyn	Wszystkie typy wyrobów są gotowe do wysyłki natychmiast po zamówieniu	Konieczne zapasy dla każdego typu wyrobu; wymagane duża przestrzeń magazynowa	Małe
2	Wykonywać wszystko na zamówienie klienta – nie utrzymywać zapasów wyrobów gotowych	Koszt magazynowania mały. Mała powierzchnia magazynowa.	Wymagana duża stabilność procesu; konieczny krótki czas przejścia materiału	Średnie
3	Utrzymywanie zapasów wyrobów grupy A, wyroby grupy C i B produkowane zgodnie z zamówieniami klientów	Mniej zapasów	Wymagana duża stabilność procesu; konieczny krótki czas przejścia materiału	Średnie
4	Utrzymywanie zapasu wyrobów grupy A i B, wyroby grupy C produkowane na zamówienie	100 % wysyłek w terminie dla klientów na wyroby A i B	Duży koszt zapasów. Duża powierzchnia magazynowa.	Małe

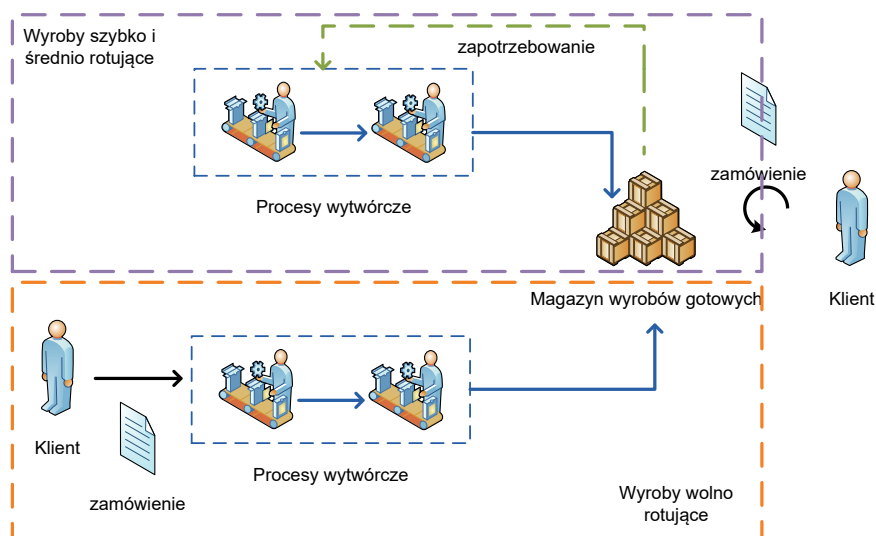
Dla każdego przyjętego wariantu określono czynniki przemawiające za przyjęciem oraz czynniki negatywne związane z wdrożeniem danego wariantu. Określono także ryzyko związane z nie terminową realizacją zamówień klientów. Przeprowadzone analizy dla rodzin wyrobów stały się podstawą określenia strategii produkcji dla każdej z nich (tab. 2.4.10.)

Tabela. 2.4.10. Określenie strategii produkcji dla rodzin wyrobów.

Rodzina wyrobów	Liczba wyrobów w grupie			Wariant strategii produkcji
	Szybko rotujące	Średnio rotujące	Wolno rotujące	
Doszczelniacze	1	7	28	4
Hydranty A		2	7	2
Hydranty B	1	1	10	4
Hydranty C		1	2	2
Kołnierze	1	8	35	4
Kompensatory		2	8	2
Łącznik A	4	14	74	4
Łącznik B			110	2
Łącznik C			29	2
Nasada	2	2	42	4
Nasułka A		2	16	2
Nasułka B	4	10	16	4
Opaski	4	17	185	4
Konsola do wodomierza			1	2
Wstawki			4	2
Zdrój			1	2
Wkład do rur	4	3	11	4

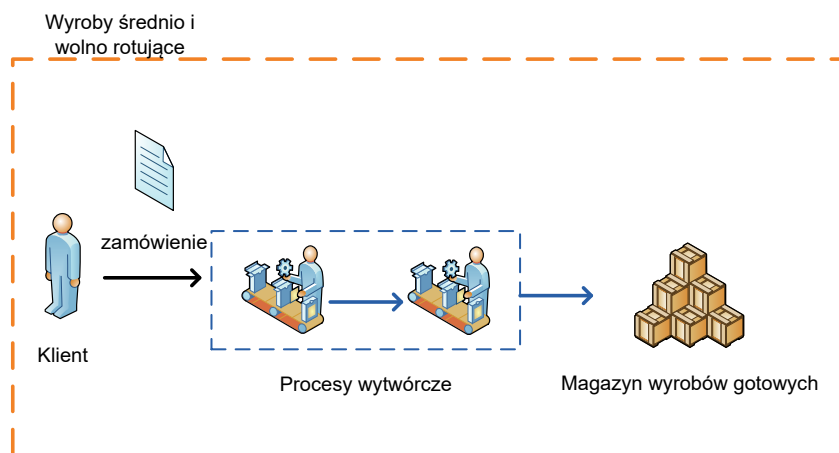
Wybrano dwa warianty realizacji produkcji związane ze spełnieniem wymagań klientów. Głównymi czynnikami były wielkości i częstotliwości zamawianych wyrobów oraz charakter współpracy z klientami.

Wariant 4 opiera się na zasadzie uzupełniania stanu zapasów wyrobów gotowych w magazynie w przypadku wyrobów szybko i średnio rotujących. Natomiast wyroby wolno rotujące są produkowane na zamówienie klienta. Jest to typowy przykład mieszanego systemu ssącego, w którym to klient poprzez swoje zamówienia decyduje jaki wyrób należy produkować: aby uzupełnić stany magazynowe danego wyrobu oraz poprzez swoje bezpośrednie zamówienie (rys. 2.4.9). Strategia ta została wybrana dla rodzin wyrobów, w których występują wyroby szybko, średnio i wolno rotujące.



Rys. 2.4.9. Schemat funkcjonowania strategii produkcji w wariancie 4.

Drugi rodzaj strategii produkcji opiera się na zasadzie produkcji na zamówienie klienta. Produkcja jest uruchamiana po potwierdzeniu zamówienia. W tym przypadku nie występują zapasy wyrobów gotowych (rys. 2.4.10). Strategia ta została wybrana dla rodzin wyrobów, w których występują głównie wyroby średnio i wolno rotujące.



Rys. 2. 4.10. Schemat funkcjonowania strategii produkcji w wariancie 2.

Kolejnym etapem zadania było przyjęcie założeń związanych z przepływem materiałów i informacji w procesach produkcyjnych dla każdej rodziny wyrobów. Do zaprojektowania rozwiązań sterowania przepływem produkcji zastosowano kilka metod:

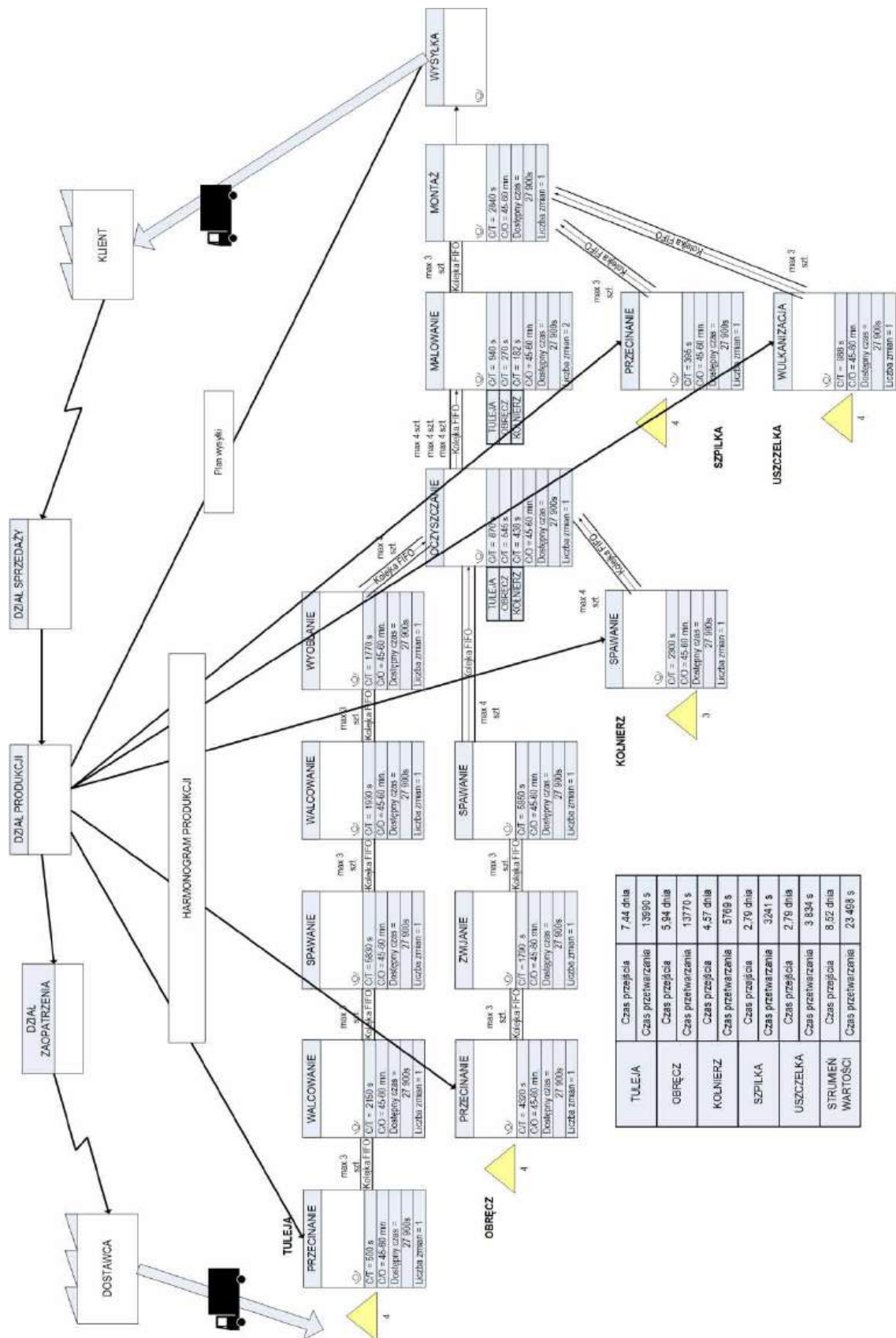
- push – harmonogram – przepływ materiałów jest realizowany na podstawie harmonogramów produkcji bez uwzględniania rzeczywistych wymagań kooperujących ze sobą komórek produkcyjnych,
- pull typu supermarket – przepływ materiałów odbywa się na podstawie rzeczywistego zużycia materiałów, części i wyrobów w supermarkecie stanowiący zapas pomiędzy kooperującymi komórkami produkcyjnymi,

- pull sekwencyjny – przepływ odbywa się według ustalonej sekwencji produkcji ale z kontrolą ilości części pomiędzy komórkami produkcyjnymi,
- werber-bufor-lina – przepływ jest regulowany pracą wąskiego gardła w procesie produkcyjnym.

Metody te były przedmiotem analiz pod kątem opracowania nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji dla wydzielonych rodzin wyrobów oraz możliwości i zasadności ich wdrożenia.

Celem było opracowanie metod, które zapewnią synchronizację przepływu materiałów w procesie produkcyjnym przy jednoczesnej kontroli zapasów międzyoperacyjnych oraz realizacji zleceń produkcyjnych. Do projektowania nowych rozwiązań zastosowano jak w przypadku analizy stanu obecnego narzędzie - Mapowanie strumienia wartości.

Poniżej przedstawiono przykłady wariantów zaproponowanych metod sterowania przepływem materiałów i informacji w procesach produkcyjnych.



Rys. 2. 4.12. Schemat funkcjonowania strategii produkcji w wariancie 2.

2.4.5. Efekty wdrożenia nowych metod sterowania przepływem produkcji

Zakres badań weryfikacyjnych obejmował funkcjonowanie nowych metod sterowania przepływem materiałów i informacji. W celu wykazania skuteczności przyjętych rozwiązań dokonano pomiarów przyjętych wskaźników oceny i porównano je z wartościami przed wprowadzeniem zmian.

Analiza obejmowała pomiary:

- czasów realizacji zleceń produkcyjnych,
- zapasów międzyoperacyjnych,
- czasu przejścia materiału w procesie.

Czas realizacji zleceń produkcyjnych

W ramach weryfikacji wprowadzonych rozwiązań dokonano ewidencji przebiegu zleceń produkcyjnych:

- data uruchamiania zleceń produkcyjnych,
- data zakończenia zleceń produkcyjnych.

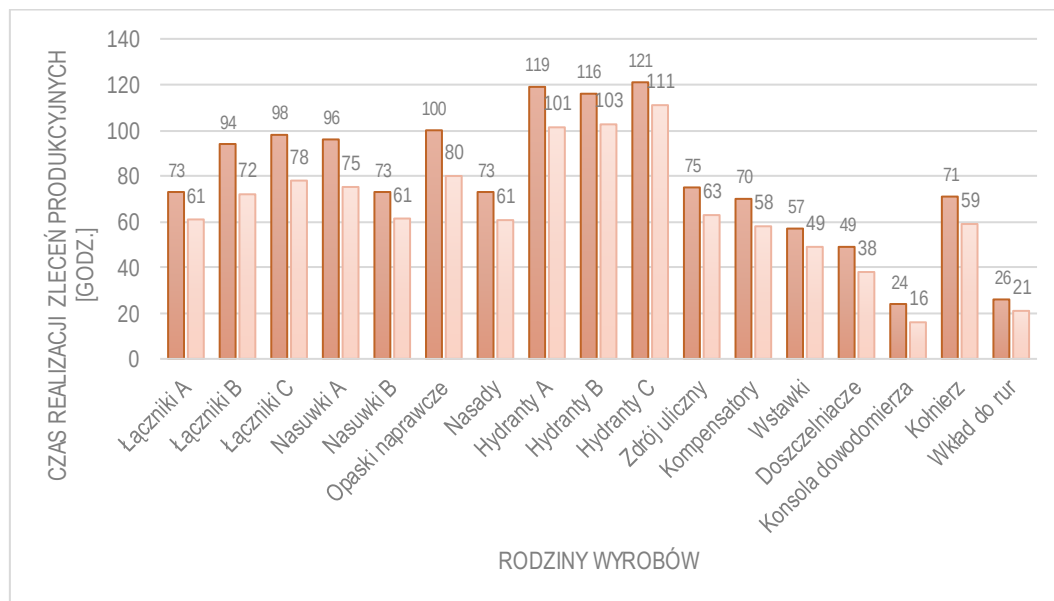
Kontrola realizacji zleceń przebiegała na podstawie danych pozyskanych z wykonania bieżących zadań produkcyjnych przez operatorów, które potwierdzano na hali produkcyjnej. W analizowanym okresie przewidzianych do realizacji było 182 zlecenia produkcyjne obejmujące wyroby gotowe z 17 rodzin o łącznej liczbie 1334 sztuk.

Następnie w celu weryfikacji danych porównano je z wynikami otrzymanymi podczas analizy stanu obecnego (stan przed wdrożeniem) realizowanych procesów produkcyjnych. (tab. 2.4.11).

Tabela 2.4.11. Porównanie czasów realizacji zleceń produkcyjnych przed i po wprowadzeniu nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji.

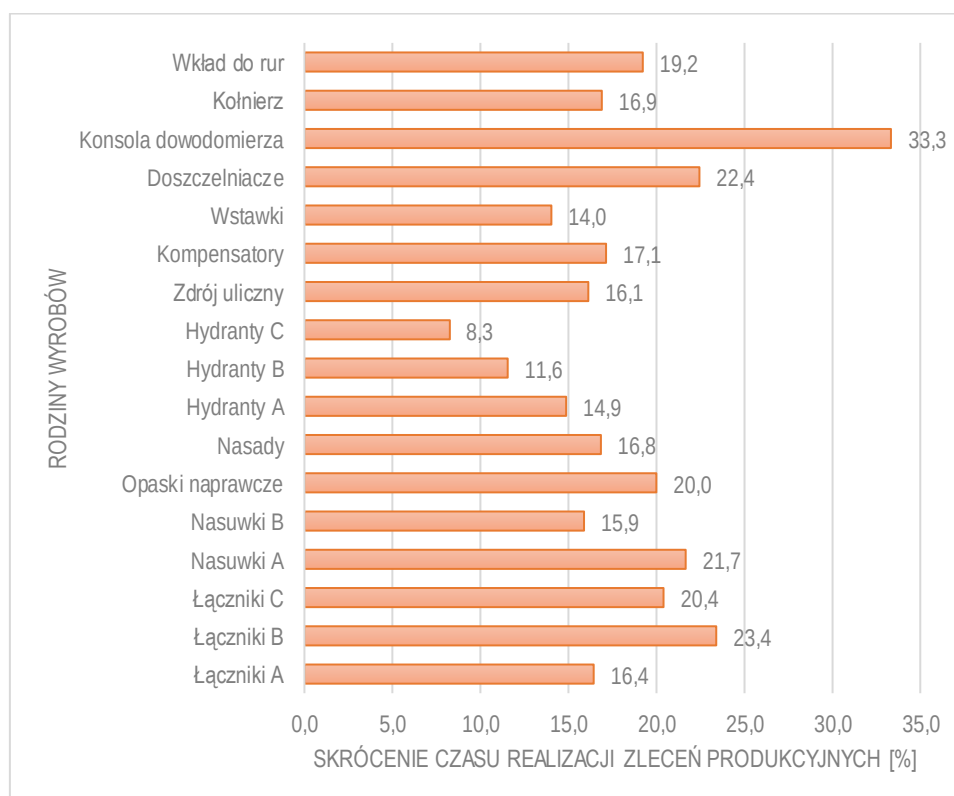
Rodzina wyrobów	Średni czas realizacji zleceń przed wdrożeniem [godz.]	Średni czas realizacji zleceń po wdrożeniu [godz.]	Różnica [godz.]	Różnica [%]
Łączniki A	73	61	12.0	16,4
Łączniki B	94	72	22.0	23,4
Łączniki C	98	78	20.0	20,4
Nasuwiki A	96	75	20.8	21,9
Nasuwiki B	73	61	11.6	16,4
Opaski naprawcze	100	80	20.0	20,0
Nasady	73	61	12.3	16,4
Hydranty A	119	101	17.7	15,1
Hydranty B	116	103	13.4	11,2
Hydranty C	121	111	10.0	8,3
Zdrój uliczny	75	63	12.1	16,0
Kompensatory	70	58	12.0	17,1
Wstawki	57	49	8.0	14,0
Doszczelniacze	49	38	11.0	22,4
Konsola do wodomierza	24	16	8.0	33,3
Kołnierz	71	59	12.0	16,9
Wkład do rur	26	21	5.0	19,2

Średnie czasy realizacji zleceń produkcyjnych dla rodzin wyrobów po wdrożeniu nowych rozwiązań uległy zmniejszeniu w porównaniu do okresu przed wdrożeniem (rys. 2.4.13).



Rys. 2.4.13. Porównanie czasów realizacji zleceń produkcyjnych przed i po wdrożeniu nowych rozwiązań sterowania przepływem produkcji.

Porównując dane z okresu przed wdrożeniem i po wdrożeniu przedmiotu projektu największe skrócenie czasu realizacji zleceń produkcyjnych uzyskano dla rodziny Konsola wodomierza i Łączniki B – odpowiednio o 33,3 % i 23,4 % (rys. 2.4.14).



Rys. 2.4.14. Skrócenie czasów realizacji zleceń produkcyjnych przed i po wdrożeniu dla rodzin wyrobów [%].

Szczególnie istotnie jest skrócenie czasów dla rodziny Łącznik B ponieważ miała ona znaczny udział w sprzedaży wyrobów.

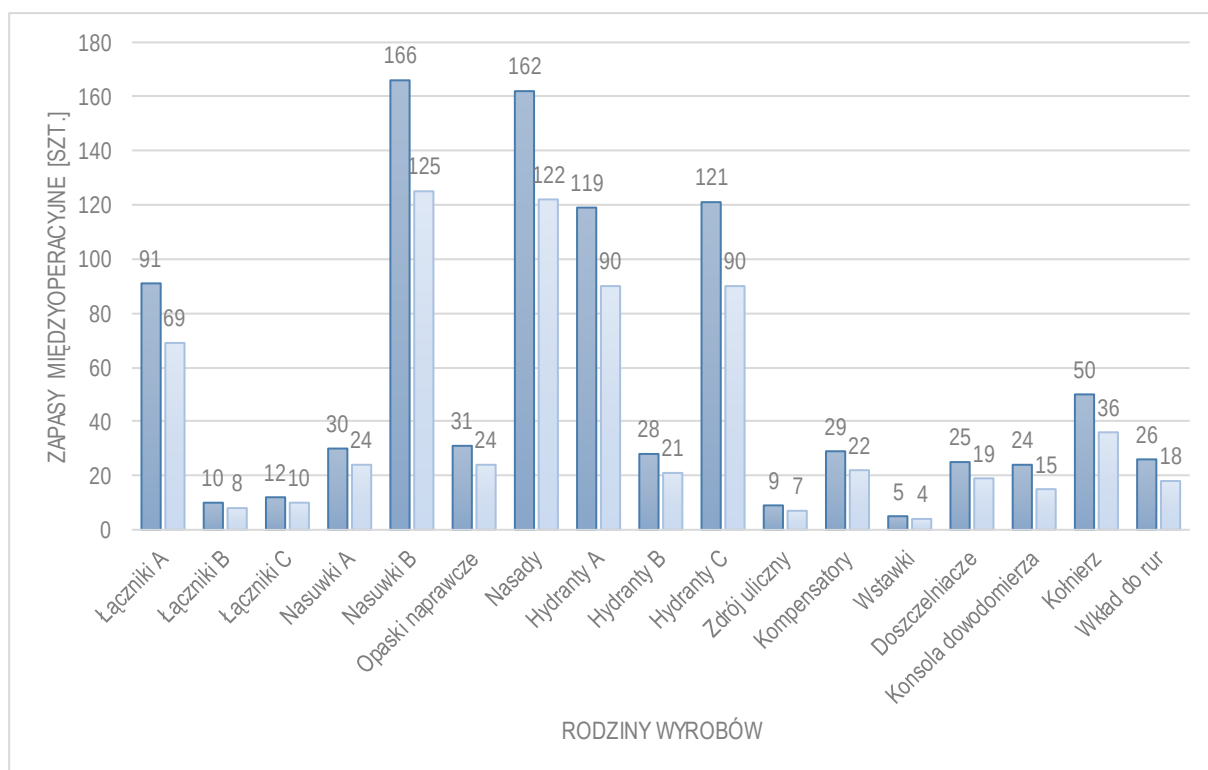
Zapasy międzyoperacyjne

W ramach weryfikacji dokonano także pomiarów zapasu robót w toku występujący pomiędzy kolejnymi etapami realizowanych procesów produkcyjnych. Analizę przeprowadzono na podstawie rzeczywistych pomiarów na hali produkcyjnej.

Wyniki przeprowadzonej analizy dla rodzin wyrobów przedstawiono w tabeli 2.4.12 oraz wykresie na rys. 2.4.15.

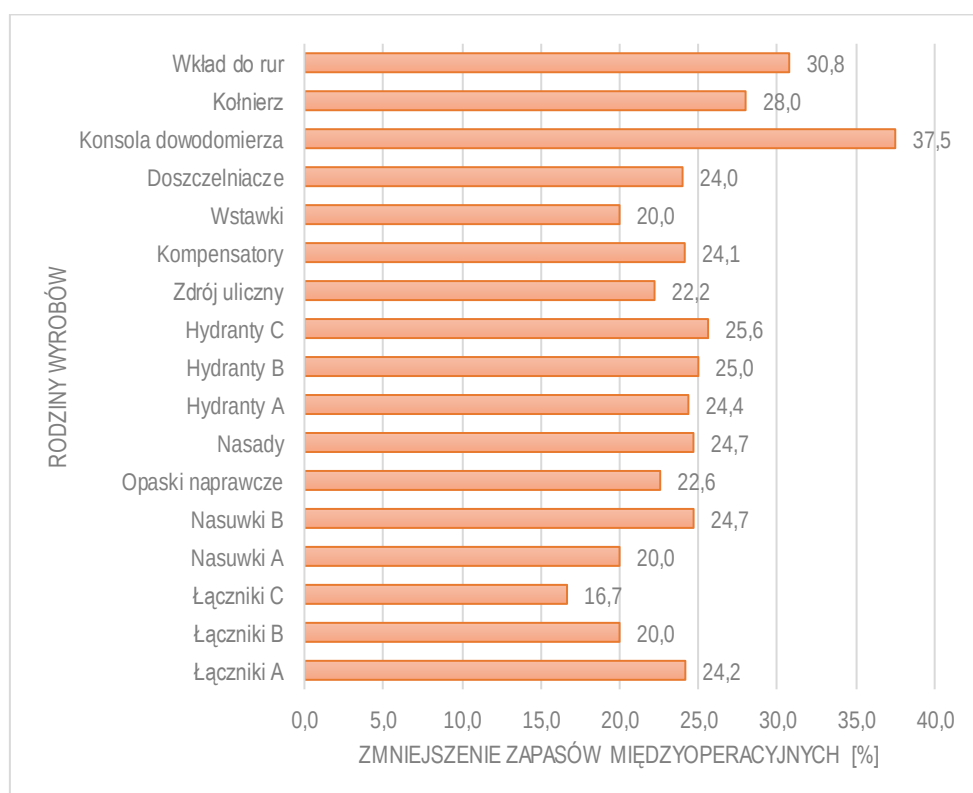
Tabela 2.4.12. Wielkości zapasów międzyoperacyjnych przed i po wdrożeniu.

Rodzina wyrobów	Zapasy produkcji w toku przed wdrożeniem [szt.] -	Zapasy produkcji w toku po wdrożeniu [szt.] -	Różnica [%]
Łączniki A	91	69	24.2
Łączniki B	10	8	20.0
Łączniki C	12	10	16.7
Nasuwiki A	30	24	20.0
Nasuwiki B	166	125	24.7
Opaski naprawcze	31	24	22.6
Nasady	162	122	24.7
Hydranty A	119	90	24.4
Hydranty B	28	21	25.0
Hydranty C	121	90	25.6
Zdrój uliczny	9	7	22.2
Kompensatory	29	22	24.1
Wstawki	5	4	20.0
Doszczelniacze	25	19	24.0
Konsola do wodomierza	24	15	37.5
Kołnierz	50	36	28.0
Wkład do rur	26	18	30.8



Rys. 2.4.15. Średnie wielkości zapasów międzyoperacyjnych.

Wdrożenie nowych rozwiązań miało bezpośredni wpływ na zmniejszenie stanu zapasów międzyoperacyjnych dla wszystkich rodzin wyrobów. Zmniejszenie zapasów międzyoperacyjnych wyniosło od 16,7 % do 37,5% (rys. 2.4.16).



Rys. 2.4.16. Zmniejszenie wielkości zapasów międzyoperacyjnych dla rodzin wyrobów.

Nowe rozwiązania sterowania przepływem produkcji w największym stopniu miały wpływ na zmniejszenie zapasów dla rodziny wyrobów Konsola do wodomierza (37,5%) oraz Wkład do rur (30,8%).

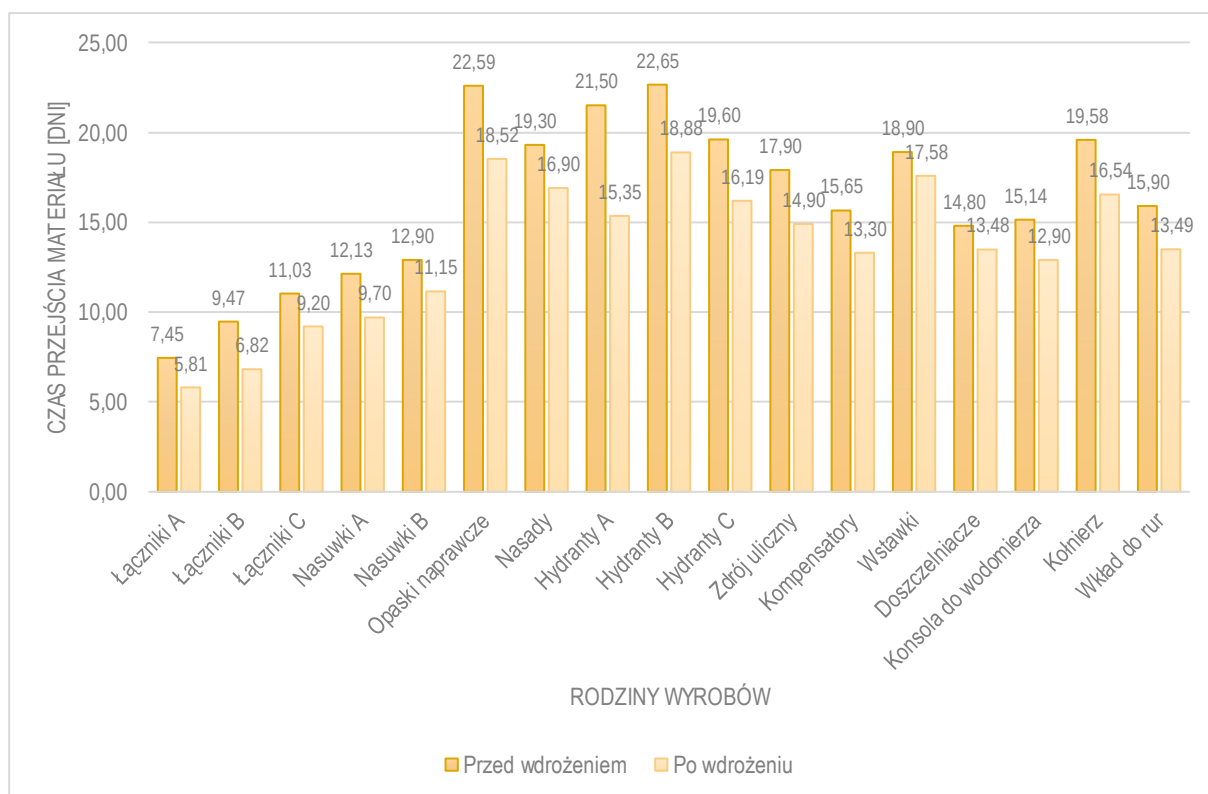
Czas przejścia materiału w procesie produkcyjnym

Kolejnym wskaźnikiem na podstawie, którego dokonano oceny nowych rozwiązań był czas przejścia materiału (ang. Lead time). Określa on czas „pobytu” materiałów w systemie produkcyjnym – „jak długo płynie materiał”. Analizę przeprowadzono na podstawie rzeczywistych pomiarów na hali produkcyjnej.

Wyniki przeprowadzonej analizy dla rodzin wyrobów przedstawiono w tabeli 2.4.13 oraz wykresie na rys. 2.4.16.

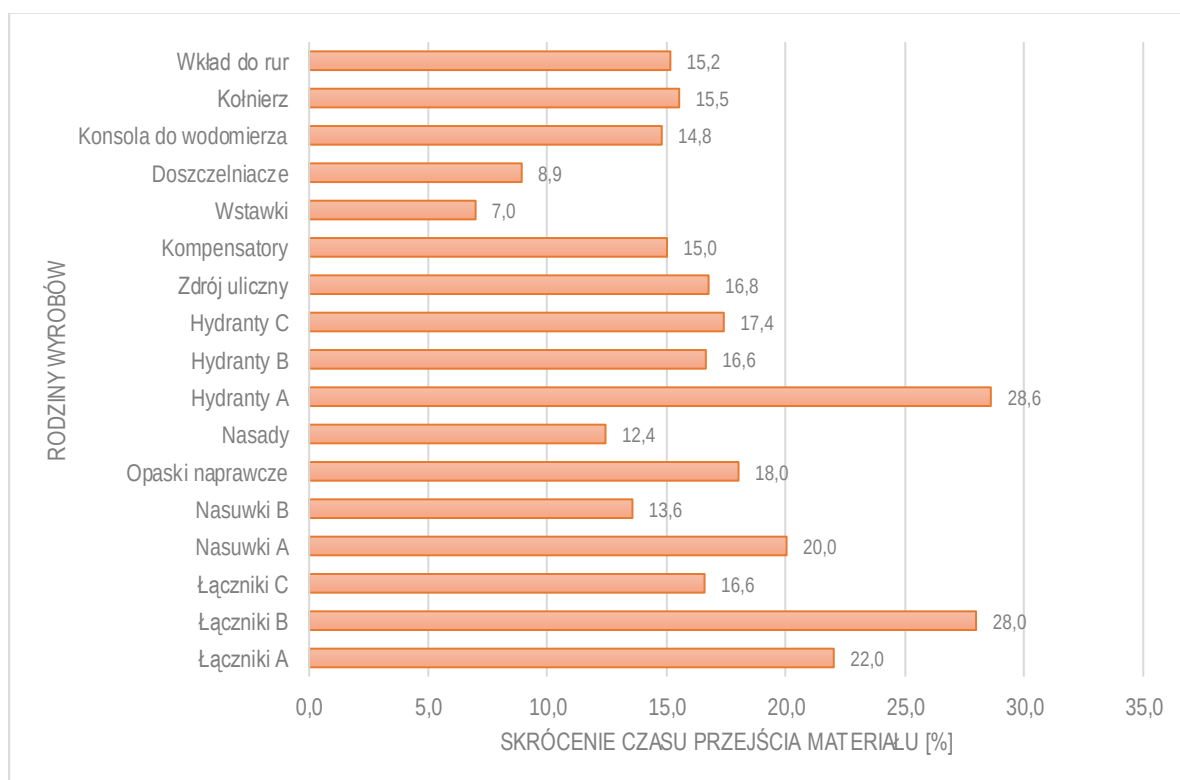
Tabela 2.4.12. Czas przejścia materiału w procesie produkcyjnym przed i po wdrożeniu.

Rodzina wyrobów	Czas przejścia materiału przed wdrożeniem [dni]	Czas przejścia materiału po wdrożeniu [dni]	Różnica [dni]
Łączniki A	7,45	5,81	1,64
Łączniki B	9,47	6,82	2,65
Łączniki C	11,03	9,20	1,83
Nasuwiki A	12,13	9,70	2,43
Nasuwiki B	12,90	11,15	1,75
Opaski naprawcze	22,59	18,52	4,07
Nasady	19,30	16,90	2,40
Hydranty A	21,50	15,35	6,15
Hydranty B	22,65	18,88	3,77
Hydranty C	19,60	16,19	3,41
Zdrój uliczny	17,90	14,90	3,00
Kompensatory	15,65	13,30	2,35
Wstawki	18,90	17,58	1,32
Doszczelniacze	14,80	13,48	1,32
Konsola do wodomierza	15,14	12,90	2,24
Kołnierz	19,58	16,54	3,04
Wkład do rur	15,90	13,49	2,41



Rys. 2.4.17. Czas przejścia materiału w procesie produkcyjnym.

Wdrożenie nowych rozwiązań miało bezpośredni wpływ na zmniejszenie czasu przejścia materiału w procesie produkcyjnym dla wszystkich rodzin wyrobów. Dla poszczególnych rodzin wyrobów wartość ta wynosi od 16,7 % do 37,5% (rys. 2.4.18).



Rys. 2.4.18. Skrócenie czasu przejścia materiału w procesie produkcyjnym dla rodzin wyrobów.

Nowe rozwiązania sterowania przepływem produkcji w największym stopniu miały wpływ na skrócenie czasu przejścia dla rodziny wyrobów Hydranty A (28,6%) oraz Łączniki B (28%).

2.4.6. Wnioski

W ramach realizacji projektu wykonano i wdrożono system sterowania przepływem produkcji dedykowanego dla przedsiębiorstwa DOMEX sp. z o.o. Na podstawie przeprowadzonej analizy parametrów realizacji produkcji można stwierdzić, że funkcjonowanie nowego systemu sterowania przepływem produkcji miało bezpośredni wpływ na wzrost efektywności produkcji. Wyniki parametrów weryfikacyjnych wskazują przede wszystkim na skrócenie czasu realizacji zleceń produkcyjnych co miało wpływ na zmniejszenie zapasu produkcji w toku.

W wyniku realizacji projektu:

- zmniejszono czasy realizacji zleceń produkcyjnych,
- zmniejszono poziom zapasów produkcji w toku,
- wyeliminowano rozbieżności danych w funkcjonowaniu przedsiębiorstwa,
- wyeliminowano problemy w wymianie informacji pomiędzy różnymi działami przedsiębiorstwa,
- uzyskano dostęp do aktualnych danych związanych z realizowaną produkcją,
- wyeliminowano nieefektywny sposób planowania i sterowania produkcją (ręczne sterowanie),
- wprowadzono synchronizację przepływu materiałów pomiędzy kolejnymi etapami procesów wytwarzania.

3. Metody i narzędzia analizy determinantów efektywnego sterowania przepływem produkcji

3.1. Wprowadzenie

Sterowanie przepływem produkcji to działania dotyczące przebiegu materiałów i informacji w procesie produkcyjnym bezpośrednio związane z realizacją zleceń produkcyjnych. Płynny przepływ produkcji oznacza, że realizacja procesu produkcyjnego przebiega w sposób stabilny i bez zakłóceń oraz według wyznaczonych zasad i metod.

Zwiększająca się wariantowość oraz zmienne i nie stabilne zapotrzebowanie na wyroby powodują, że konieczne są zmiany spojrzeniu na organizację i sterowanie przepływem produkcji. Konieczne jest sięganie po rozwiązania pozwalające na szybkie reagowanie na zmianę czynników zewnętrznych i wewnętrznych.

Działania związane z harmonogramowaniem, zbieraniem i analizą danych oraz korygowaniem przepływu produkcji wymagają przyjęcia odpowiednich rozwiązań, zapewniających ich sprawną i skuteczną realizację. Muszą one jednak być dostosowane do specyfiki funkcjonowania danego systemu produkcyjnego. Rozwiązania te powinny obejmować działania podejmowane od przyjęcia zamówienia i określenia wymagań klienta do wysłania wyrobów gotowych zgodnie ze specyfikacją.

Kastomizacja i personalizacja wyrobów generuje dużą różnorodność procesów technologicznych a to wymaga określenia w jakim stopniu zasoby produkcyjne powinny być uniwersalne lub specjalizowane. Posiadane zasobów o określonej specjalizacji technologicznej bezpośrednio wpływa na elastyczność systemów produkcyjnych. Kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na efektywność i sprawność przepływu produkcji w zakresie sterowania jest zapewnienie wymaganych danych wejściowych. Jednym z tych kluczowych parametrów jest czas realizacji operacji technologicznych czy zleceń produkcyjnych. Zdefiniowany i przyjęty czas realizacji jest podstawą przy ustalaniu harmonogramu ale także kalkulacji kosztów produkcji.

Zmienność cech konstrukcyjnych oraz zapotrzebowania na wyroby wpływają na wzrost pracochłonności działań związanych z technicznym i organizacyjnym przygotowaniem produkcji. Z tego względu konieczne są działania, które umożliwią wprowadzenie automatyzacji i integracji wymiany danych poprzez rozwiązania informatyczne. Integracja powinna obejmować cały cykl realizacji zamówień: od określenia wymagań klienta aż do przygotowania wysyłki.

Inną istotną kwestią przy wzrastającej liczbie wariantów wyrobów jest zapewnienie sprawnych dostaw materiałów i części wymaganych do realizacji procesów technologicznych. Identyfikowalność materiałów i ich komplectacja wydają się kluczowe dla zapewnienia stabilności przepływu produkcji.

Straty materiału podczas realizacji procesów produkcyjnych są bezpośrednio związane z kosztami produkcji. Ich zmniejszenie pozytywnie wpływa na aspekt ekonomiczny ale wydaje się, że jest już obowiązkiem przedsiębiorców z uwagi na konieczność wprowadzania zasad zrównoważonego rozwoju. Wielkość strat materiału w procesie produkcyjnym bezpośrednio wpływa na efektywność przepływu produkcji.

Dlatego konieczne jest stosowanie metod i narzędzi pozwalających na identyfikację strat materiału i pozwalających na ich zmniejszenie.

Uwzględnienie wskazanych czynników powoduje, że dopiero wtedy możliwe staje się skuteczne sterowanie przepływem produkcji.

W dalszej części opracowania przedstawiono wyniki prac badawczych w zakresie metod i narzędzi pozwalających zapewnić skuteczne sterowanie przepływem produkcji. Dotyczą one następujących obszarów:

- wpływu specjalizacji stanowisk produkcyjnych na efektywność procesu produkcji,
- normatywów czasów realizacji operacji technologicznych,
- integracja technicznego przygotowania produkcji i sterowania przepływem produkcji,
- zapewnienia dostępności materiałów w realizacji procesów produkcyjnych,
- strat materiału w procesie technologicznym.

3.2. Wykaz powiązanych tematycznie artykułów

[A1] Krzysztof Żywicki, Paulina Rewers, A simulation-based approach to study the influence of different production flows on manufacturing of customized products, *Advances in Production Engineering & Management* - 2020, vol. 15, no. 4, s. 467-480.

DOI: 10.14743/apem2020.4.379 (IF: 3,38; 100 pkt.)

Wkład własny

Jestem autorem metodyki badań i koncepcji artykułu. W ramach prac badawczych opracowałem modele przepływu produkcji oraz zbiory danych wejściowych w postaci: struktury wyrobów, procesów technologicznych i zleceń produkcyjnych. Przeprowadziłem analizę uzyskanych wyników oraz opracowałem na tej podstawie wnioski. Cel i metodyka oraz wyniki badań były podstawą przygotowania artykułu. Brałem udział w opracowaniu tekstu artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

[A2] Kateryna Czerniachowska, Radosław Wichniarek, Krzysztof Żywicki, Constraint Programming for Flexible Flow Shop Scheduling Problem with Repeated Jobs and Repeated Operations, *Advances in Science and Technology Research Journal* - 2023, vol. 17, no. 3, s. 280-293. (IF :1, 100 pkt.)

Wkład własny

Jestem autorem koncepcji artykułu i metodyki badań. W ramach prac badawczych opracowałem modele przepływu produkcji oraz zbiory danych wejściowych w postaci: struktury wyrobów, procesów technologicznych i zleceń produkcyjnych. Na podstawie wyników opracowałem wnioski. Cel i metodyka oraz wyniki badań były podstawą przygotowania artykułu. Brałem udział w opracowaniu tekstu artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

- [A3] Krzysztof Żywicki, Filip Osiński, A comparison of production time calculation methods for customized products manufacturing, *Advances in Manufacturing II. Volume 2 - Production Engineering and Management*, Springer International Publishing, 2019 - s. 117-128. (20 pkt.)
DOI: 10.1007/978-3-030-18789-7_11

Wkład własny

Jestem autorem koncepcji artykułu i metodyki badań. Opracowałem model kalkulacji normatywów czasu realizacji operacji technologicznych. W ramach prac przeprowadziłem badania i na tej podstawie dokonałem analizy wyników oraz sporządziłem wnioski. Cel i metodyka oraz wyniki badań były podstawą przygotowania artykułu. Brałem udział w opracowaniu tekstu artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

- [A4] Krzysztof Żywicki, Filip Osiński, Radosław Wichniarek, *Methodology of Estimating Manufacturing Task Completion Time for Make-to-Order Production*, *Innovation, Engineering and Entrepreneurship*, Springer, 2019 - s. 377-383. (20 pkt.)
DOI: 10.1007/978-3-319-91334-6_51

Wkład własny

Jestem autorem koncepcji artykułu i metodyki badań. Opracowałem model kalkulacji normatywów czasu realizacji operacji technologicznych. Opracowałem założenia struktury oprogramowania wspomagającego kalkulację norm czasu wykonania operacji technologicznych. W ramach prac przeprowadziłem badania następnie dokonałem analizy wyników oraz sporządziłem wnioski. Cel i metodyka oraz wyniki badań były podstawą przygotowania artykułu. Brałem udział w opracowaniu tekstu artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

- [A5] Przemysław Zawadzki, Krzysztof Żywicki, *Smart product design and production control for effective mass customization in the Industry 4.0 concept*, *Management and Production Engineering Review* - 2016, vol. 7, no. 3, s. 105-112. ()
DOI: 10.1515/mper-2016-0030

Wkład własny

Autor koncepcji artykułu i metodyki badań. Przeprowadziłem przegląd literatury dotyczący obszaru sterowania przepływem produkcji. Opracowałem model integracji danych procesowych w obszarze sterowania przepływem produkcji. Wyniki badań były podstawą przygotowania artykułu. Brałem udział w opracowaniu tekstu artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

- [A6] Krzysztof Żywicki, Przemysław Zawadzki, Fulfilling Individual Requirements of Customers in Smart Factory Model, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 571. Springer, Cham, 2018, s. 185-194. (20 pkt.)
DOI: 10.1007/978-3-319-68619-6_18

Wkład własny

Autor koncepcji artykułu i metodyki badań. Przeprowadziłem przegląd literatury dotyczący obszaru sterowania przepływem produkcji. Opracowałem model integracji danych procesowych w obszarze sterowania przepływem produkcji. Wyniki badań były podstawą przygotowania artykułu. Brałem udział w opracowaniu tekstu artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

- [A7] Krzysztof Żywicki, Paweł Buń, Process of materials picking using augmented reality, *IEEE Access* - 2021, vol. 9.
DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3096915, (IF: 3,48; 100 pkt.).

Wkład własny

Autor koncepcji artykułu i metodyki badań. Przeprowadziłem przegląd literatury dotyczący obszaru przepływu produkcji. Brałem czynny udział w realizacji doświadczeń i testów zastosowań rzeczywistości rozszerzonej w kompletacji materiałów. Dokonałem analizy wyników oraz opracowałem wnioski z badań. Cel i metodyka badań oraz wyniki były podstawą przygotowania artykułu. Brałem udział w opracowaniu tekstu artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

- [A8] Kateryna Czerniachowska, Radosław Wichniarek, Krzysztof Żywicki, A Two-Step Matheuristics for Order-Picking Process Problems with One-Directional Material Flow and Buffers, *Applied Sciences* - 2023, vol. 13, iss. 18, s. 10099-1-10099-23.
DOI: 10.3390/app131810099, (IF: 2,7; 100 pkt.)

Wkład własny

Autor koncepcji artykułu. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów. Cel i metodyka badań oraz wyniki były podstawą przygotowania artykułu. Dokonałem edycji wersji roboczej artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

- [A9] Krzysztof Żywicki, Tomasz Bartkowiak, Agnieszka Kujawińska, Application of a simulation model to the prognosis of material loss in wood processing, *PLoS ONE* - 2021, vol. 16, iss. 2.
DOI: 10.1371/journal.pone.0246325, (IF: 3,75; 100 pkt.)

Wkład własny

Autor koncepcji artykułu i metodyki badań. Opracowałem modele matematyczne kalkulacji strat materiału. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów

symulacyjnych. Dokonałem analizy wyników oraz opracowałem wnioski z badań. Cel i metodyka badań oraz wyniki były podstawą przygotowania artykułu. Brałem udział w opracowaniu tekstu artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

[A10] Kateryna Czerniachowska, Krzysztof Żywicki, Radosław Wichniarek, A Method to Improve Planning of Product Placement on a Printing Sheet, Management and Production Engineering Review - 2021, vol. 12, no. 1, s. 119-128.
DOI: 10.24425/mper.2021.136877, (70 pkt.)

Wkład własny

Autor koncepcji artykułu i metodyki badań. Przygotowałem dane dla modeli realizacji produkcji. Brałem czynny udział w realizacji eksperymentów oraz sporządziłem wnioski dla uzyskanych wyników. Cel i metodyka badań oraz wyniki były podstawą przygotowania artykułu. Dokonałem edycji wersji roboczej artykułu oraz wprowadzeniu uwag recenzentów i sporządzeniu jego ostatecznej wersji.

3.3. Wpływ specjalizacji stanowisk produkcyjnych na efektywność procesu produkcji

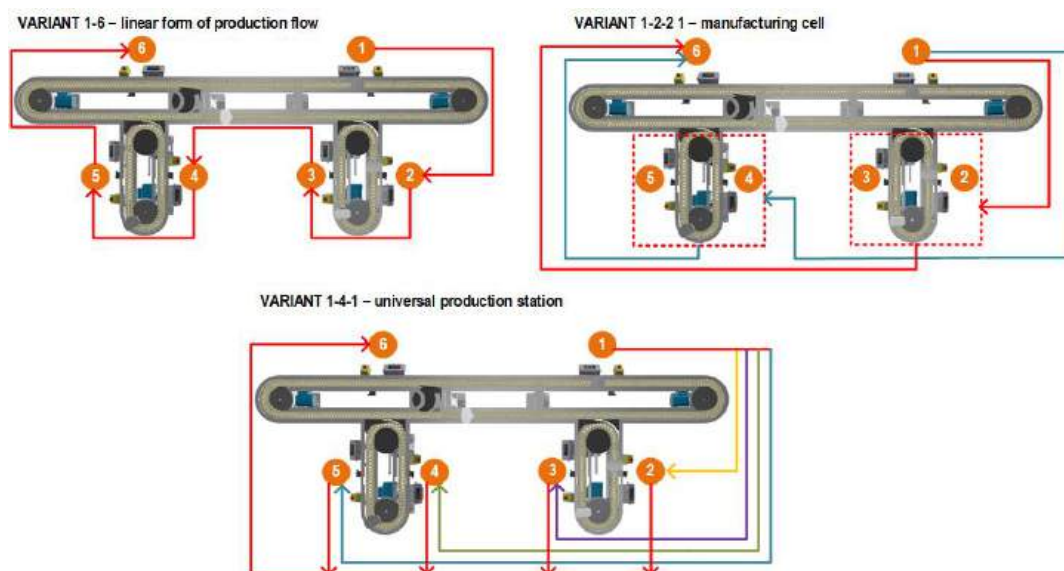
Produkcja wyrobów dostosowanych pod względem konstrukcyjnym do wymagań klienta (kastomizacja, personalizacja) wymaga przyjęcia odpowiednich form organizacji produkcji. Z jednej strony forma liniowa umożliwia uzyskanie większej efektywności w procesach produkcyjnych ale to forma gniazdowa jest bardziej elastyczna. Kolejnym istotnym zagadnieniem jest określenie w jakim stopniu zasoby systemu produkcyjnego czy formy organizacji produkcji powinny być uniwersalne a w jakim specjalizowane. Z jednej strony uniwersalność zasobów zwiększa elastyczność systemu produkcyjnego z drugiej powoduje jednak problemy związane z organizacją, planowaniem i kontrolą produkcji. Z kolei stosowanie specjalnych i wyspecjalizowanych zasobów (tj. posiadających dedykowany sprzęt do produkcji określonych rodzajów wyrobów i operacji technologicznych) niesie ze sobą ryzyko niewykorzystania dostępnych zdolności produkcyjnych. Z punktu widzenia organizacji przepływu produkcji przyjęcie adekwatnej formy i stopnia uniwersalności zasobów jest zagadnieniem podstawowym, które wpływa na efektywność procesów produkcyjnych.

Przeprowadzone badania dotyczyły wpływu struktury produkcyjnej oraz wariantowości wyrobów na realizację zleceń produkcyjnych. Badania zostały przeprowadzone w laboratorium SmartFactory Politechniki Poznańskiej z wykorzystaniem środowiska symulacyjnego FlexSim.

Celem badań było określenie wpływu formy organizacji przepływu produkcji o różnym stopniu elastyczności zasobów produkcyjnych na efektywność realizacji zbioru zleceń produkcyjnych dla wyrobów niestandardowych (o różnej strukturze konstrukcyjnej). Zakres i wyniki badań zostały przedstawione w artykule [A1].

W badaniu przyjęto trzy warianty formy przepływu produkcji (rys. 3.3.1):

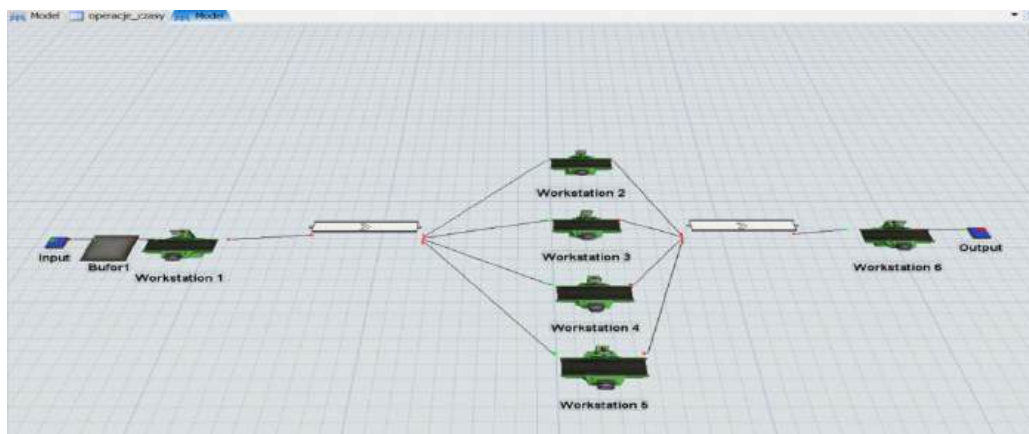
- Wariant 1 (wariant 1-6): forma liniowa - proces produkcji każdego wyrobu realizowany jest na wszystkich sześciu kolejnych stanowiskach roboczych.
- Wariant 2 (wariant 1-2-2-1): forma gniazdowa - proces produkcji danego wyrobu odbywa się na stanowisku 1, komórce produkcyjnej 1 lub 2 zawierającej dwa stanowiska oraz stanowisku 6.
- Wariant 3 (wariant 1-4-1): forma stanowiskowa - proces produkcji danego wyrobu odbywa się na stanowisku 1, następnie na jednym ze stanowisk uniwersalnych od 2 do 5 oraz na stanowisku 6.



Rys. 3.3.1. Warianty organizacji przepływu produkcji [A1].

Przyjęto trzy grupy wyrobów, różniące się pracochłonnością wykonania. Dodatkowo każdy zestaw zleceń został poddany eksperymentom uwzględniającym różne zasady szeregowania zleceń: w dowolnej kolejności, od najdłuższego do najkrótszego oraz od najkrótszego do najdłuższego. Uzyskane wyniki analizowano pod kątem czasu realizacji zleceń oraz stopnia wykorzystania dostępnego czasu pracy zasobów produkcyjnych.

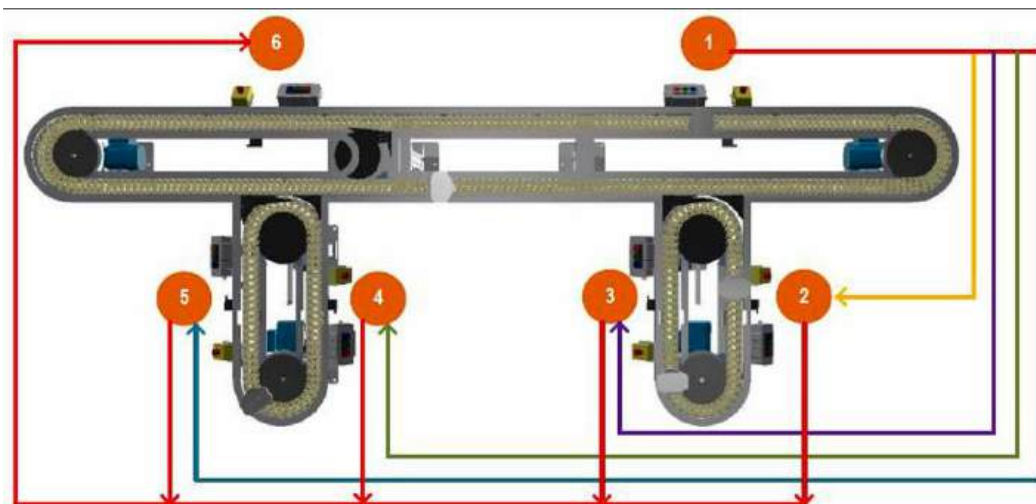
W ramach badań przeprowadzono eksperymenty symulacyjne w środowisku FlexSim, obejmujące implementację zbiorów zleceń produkcyjnych dla założonych trzech wariantów form organizacji przepływu produkcji (rys. 3.3.2). Zostały one przeprowadzone według następujących etapów: wykonanie i weryfikacja modeli symulacyjnych wariantów form przepływu produkcji, projektowanie wyrobów i ich procesów technologicznych, opracowanie zestawów zleceń produkcyjnych, przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych i analiza wyników.



Rys. 3.3.2. Widok wybranego modelu symulacyjnego w środowisku FlexSim [A1].

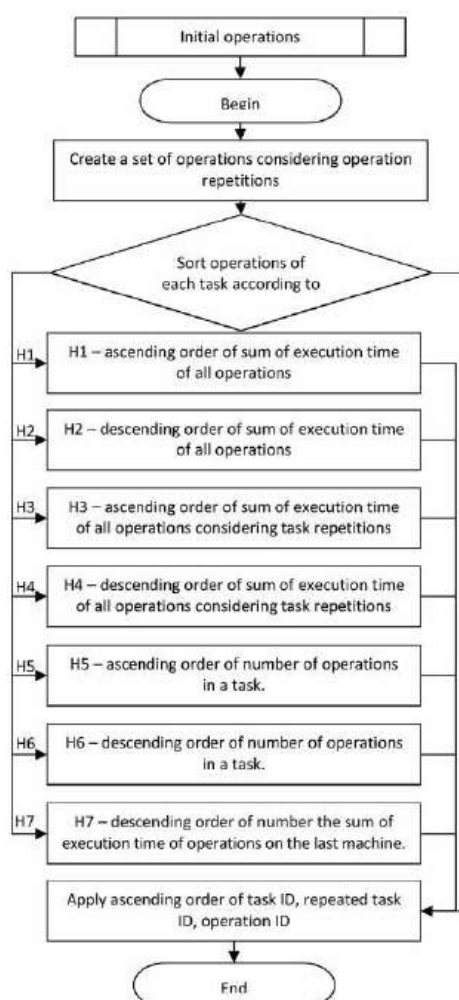
Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zastosowanie uniwersalnych stanowisk w systemie produkcyjnym (wariant 1-4-1 formy organizacji przepływu produkcji) pozwala na skrócenie czasu realizacji zleceń produkcyjnych dla wyrobów o małym i dużym planowanym czasie obciążenia zasobów. Dla takiego rozwiązania stopień wykorzystania dostępnego czasu pracy jest również najwyższy. Na uzyskane wyniki efektywności funkcjonowania systemu produkcyjnego mają wpływ zasady harmonogramowania zleceń produkcyjnych. Najlepsze wyniki uzyskano dla harmonogramu produkcji, ustalonego według zasady od zleceń o najniższym planowanym czasie obciążenia zasobów. Wariant organizacji przepływu produkcji w obejmujący uniwersalne gniazda produkcyjne (wariant 1-2-2-1) pozwala uzyskać najlepsze wyniki czasu realizacji zleceń i stopnia wykorzystania stanowisk roboczych w produkcji wyrobów o średnim czasie pracochłonności. W tym przypadku korzystne jest ustalenie kolejności realizacji zleceń od tych o największym planowanym czasie obciążenia. Zastosowanie formy liniowej okazuje się najgorszym rozwiązaniem w produkcji dla wyrobów o przyjętych w badaniach cechach konstrukcyjnych i ilościowych. Natomiast dla wyrobów o średnim czasie obciążenia zasobów uzyskane wyniki symulacji nie odbiegają znacząco od pozostałych wariantów formy organizacji przepływu produkcji.

Zasoby produkcyjne o charakterze uniwersalnym mimo, że zwiększają elastyczność systemu produkcyjnego powodują wzrost trudności w harmonogramowaniu produkcji. W artykule [A2] przedstawiono wyniki badań dotyczące porównania skuteczności metod heurystycznych i programowania matematycznego do planowania obciążenia zasobów uniwersalnych. Głównym problemem badawczym było określenie kolejności realizacji zleceń i operacji produkcyjnych i wyznaczeniu stanowisk produkcyjnych w celu zminimalizowania czasu realizacji zleceń. Obiektem badawczym była linia produkcyjna z uniwersalnymi stanowiskami produkcyjnymi (rys.3.3.3) .



Rys. 3.3.3. Model linii produkcyjnej [A2].

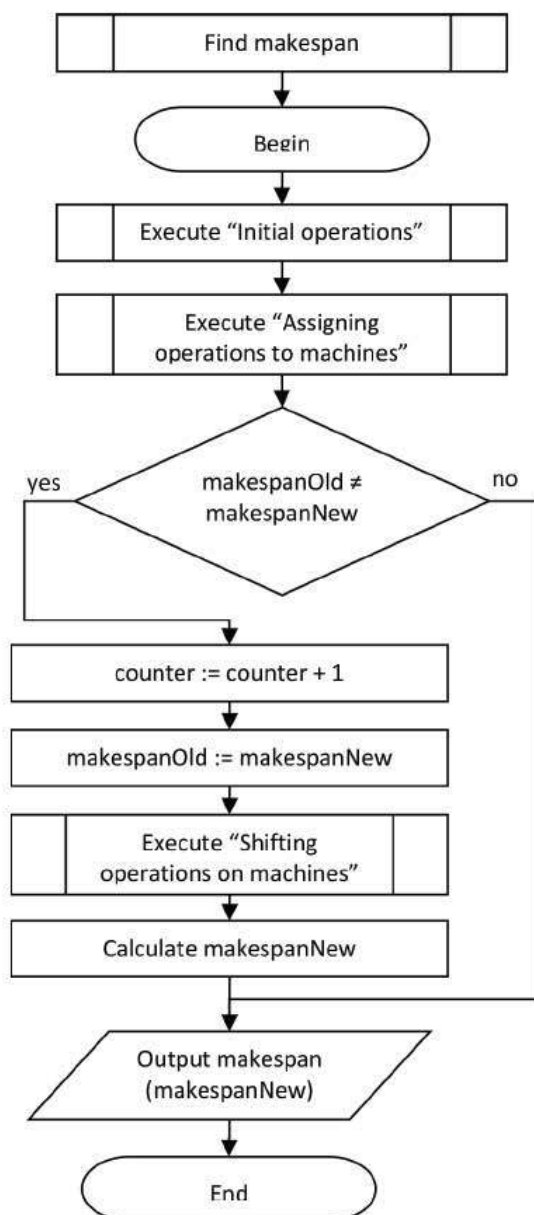
W badaniu zastosowano siedem heurystyk do opracowania harmonogramów produkcji dla zbiorów zleceń produkcyjnych (rys. 3.3.4)



Rys. 3.3.4. Procedura zastosowania metod heurystycznych [A2].

Wyniki wskazały, że Heurystyka 1 była najlepsza spośród wszystkich heurystyk, która znalazła 9 rozwiązań z minimalny czasem realizacji w 20 zbiorach danych. Heurystyki 3-5 znalazły tylko 1 najlepsze rozwiązanie. Dla innych przypadków tylko jedna heurystyka znalazła najlepsze rozwiązanie spośród wszystkich.

Tak opracowane plany obciążenia zasobów zostały porównane w wynikami uzyskanymi w wyniku zastosowania programowania matematycznego z ograniczeniami. Model matematyczny został wykonany w środowisku IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Studio Constraint Programming Optimizer (CPO) (rys. 3.3.5).



Rys. 3.3.5. Procedura modelu matematycznego [A2].

Głównymi czynnikami wpływającymi na czas przetwarzania danych była: złożoność zadania (zależności między operacjami i dodatkowymi ograniczeniami) oraz rozmiar problemu (liczba różnych zleceń i liczba dostępnych maszyn).

Wyniki badań wskazują, że dla 10 przypadków najlepsze rozwiązanie zostało wygenerowane przez model matematyczny (CPO). Wyniki badań wskazują, że średnio rozwiązanie heurystyczne było gorsze od CPO od 19,37% do 39,17%. Potwierdza to, że programowanie matematyczne z ograniczeniami jest bardziej skuteczne niż zastosowanie podejścia heurystycznego do szeregowania zleceń produkcyjnych.

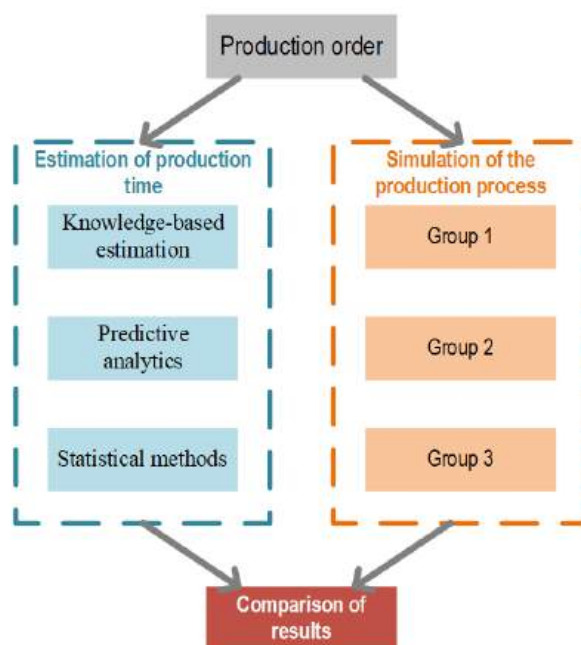
Przeprowadzone badania wskazują, że wybór stosowania zasobów uniwersalnych czy specjalizowanych jest zależny od wielu czynników. Są to m.in.: struktura wyrobów, liczba części składowych czy pracochłonność realizacji procesów technologicznych ale przede wszystkim zapotrzebowanie na wyroby.

Wyniki badań wskazują także, że problem elastycznego harmonogramowania produkcji może być rozwiązany poprzez zastosowanie programowania matematycznego z ograniczeniami. Eksperymenty obliczeniowe wykazały, że wykorzystanie programowania ograniczeń może być znacznie bardziej korzystne niż wykorzystanie heurystyki.

3.4. Kalkulacja normatywów czasu realizacji operacji technologicznych

Jedną z głównych trudności w skutecznym sterowaniu przepływem produkcji dla wyrobów zaprojektowanych według indywidualnych wymagań klienta jest ustalenie/przyjęcie czasu realizacji procesu technologicznego. Stopień dokładności w określaniu czasów przekłada się bezpośrednio na dokładność harmonogramowania produkcji. Równie istotną kwestią jest pracochłonności wyznaczania planowanych czasów realizacji, szczególnie biorąc pod uwagę stopień różnorodności i niską powtarzalność wytwarzanych wyrobów. W takim przypadku nie jest możliwe zastosowanie metod kalkulacji czasu odpowiednich dla wyrobów standardowych (np. chronometraż).

Prowadzone badania dotyczyły porównania wybranych metod szacowania czasów realizacji operacji technologicznych oraz zleceń produkcyjnych. Zakres i wyniki badań przedstawiono w [A3]. Celem było ustalenie stopnia skuteczności tych metod pod względem zgodności czasu szacowanego z czasem rzeczywistym. Badania przeprowadzono w warunkach symulowanego procesu produkcyjnego (rys. 3.3.6).



Rys. 3.3.6. Plan badań szacowania czasu realizacji operacji technologicznych [A3].

Metodami szacowania czasu operacji technologicznych, które podlegały badaniu były:

- estymacja oparta na wiedzy - wyznaczanie czasu pracy przez pracownika, który na podstawie własnego doświadczenia i wiedzy określa czas potrzebny do zakończenia danego zadania produkcyjnego,
- analiza statystyczna - wykorzystanie danych historycznych dotyczących czasów produkcji podobnych lub analogicznych wyrobów,
- metoda analityczna - wykorzystanie danych historycznych dla podobnych operacji produkcyjnych, z uwzględnieniem zmiany czasu trwania danej operacji przez charakterystyczne czynniki, np. zakres zadań produkcyjnych.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że najmniej dokładną metodą obliczeń jest metoda szacunkowa oparta na doświadczeniu operatorów (rys. 3.3.7). W kilku przypadkach można zaobserwować znaczne niedoszacowanie czasu produkcji.



Rys. 3.3.7. Stopień zgodności czasów obliczonych z czasem rzeczywistym [A3].

Można stwierdzić, że im prostsza operacja, tym tendencja do przeszacowywania wyników, natomiast im bardziej złożone zadania produkcyjne, tym wartość czasu jest niedoszacowana. Dużym problemem jest również niska powtarzalność prognozowanych wyników, zależna od doświadczenia operatora. Analityka predykcyjna charakteryzowała się znacznym przeszacowaniem uzyskiwanych wyników. Może to być spowodowane zwiększeniem tempa pracy w stosunku do przebiegów testowych. Najdokładniejszą metodą jest metoda uczenia statystycznego, która wykorzystuje wiedzę technologiczną opartą na wcześniej zrealizowanych operacjach. Wykorzystując dobrej jakości dane i poprawną analizę statystyczną, uzyskane wyniki dają wysoki stopień dokładności przewidywania czasu potrzebnego do realizacji procesu. Metody analizy predykcyjnej wskazują, że istotne jest określenie prawidłowej zależności matematycznej uwzględniającej specyfikę wykonywanych zadań i czynności produkcyjnych. W wielu przypadkach nie jest to zależność liniowa oparta na parametrze jednostki miary.

Najbardziej zbliżone wyniki do czasów rzeczywistych uzyskano dla metody statystycznej wykorzystującej dane historyczne z zakończonych już procesów produkcyjnych. Metoda ta jest również łatwa do zaimplementowania w oprogramowaniu komputerowym, dzięki czemu jest odporna na rotację pracowników. Największą wadą tej metody jest potrzeba dobrej jakości danych z dłuższego okresu. Mogą również wystąpić znaczne odchylenia od wyników obliczeń i rzeczywistego czasu produkcji w przypadkach, gdy produkt znacznie różni się od standardowej konstrukcji.

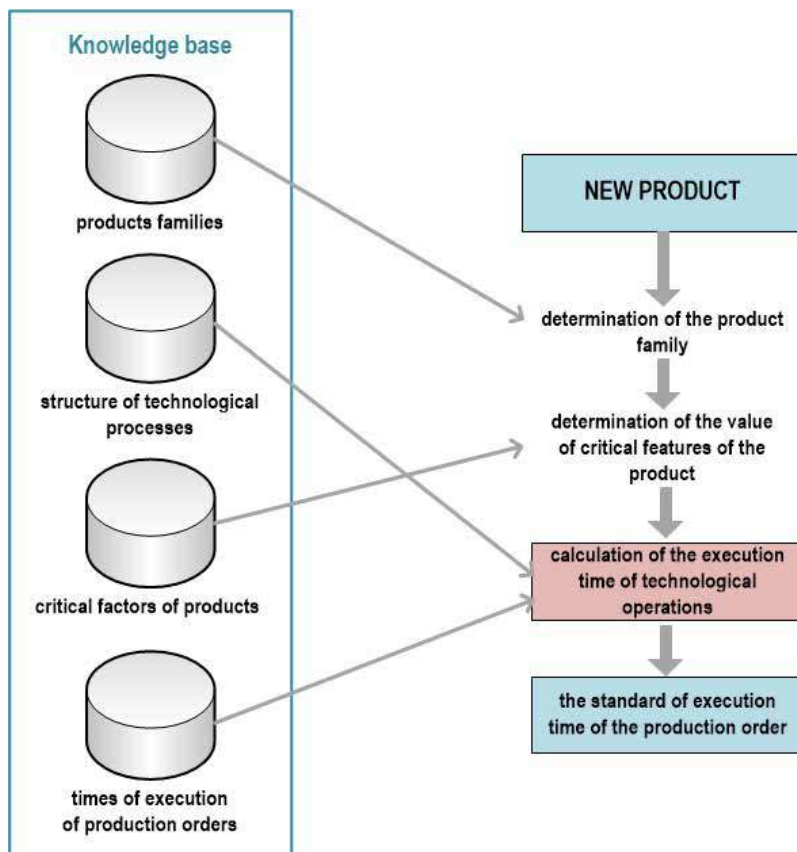
Można stwierdzić, że racjonalna decyzja dotycząca planowania systemu produkcyjnego wymaga zebrania znacznej ilości danych. W firmach, które wytwarzają unikalne, niestandardowe produkty, uzyskanie dobrej jakości danych może stanowić poważny problem, zwłaszcza gdy proces produkcyjny jest złożony i różnorodny. Niestety, gromadzenie i analiza różnorodnych danych, które mogą wskazać korelacje między cechami technologicznymi a czasem potrzebnym do wytworzenia różnych wariantów produktu, wydaje się jedynym sposobem na dokładne, niezawodne i szybkie planowanie produkcji.

Uzyskane wyniki badań stały się podstawą do opracowania autorskiej metody szacowania czasów realizacji procesów technologicznych dla wyrobów wielowariantowych (kustomizowanych). W wyniku prowadzonych prac badawczych opracowano metodę bazującą na podejściu analityczno-pomiarowym oraz porównawczym. Metodę oraz wyniki badań przedstawiono w [A4].

Założeniem metody jest szacowanie czasów normatywnych na podstawie wiedzy o już wykonanych zadaniach produkcyjnych, która obejmuje rzeczywiste czasy wykonania poszczególnych operacji technologicznych. Dla każdego nowego zadania produkcyjnego podlegającego szacowaniu czasu należy: przypisać grupę produktów, określić wariant konstrukcyjny, określić wartości cech krytycznych.

Szacowanie czasu realizacji zadań produkcyjnych dla nowego wariantu wyrobu jest realizowane na podstawie zdefiniowanych cech konstrukcyjnych wyrobów. Opracowana metoda została zaimplementowana w oprogramowaniu komputerowym. Oprogramowanie zawiera bazę wiedzy technologicznej, moduł definiowania zleceń

produkcyjnych oraz algorytmy służące do szacowania czasów potrzebnych na wykonanie zadanych operacji (rys. 3.3.8).



Rys. 3.3.8. Struktura programu do obliczania czasu realizacji zleceń produkcyjnych [A4].

Czas planowany do wykonania operacji dla jednej sztuki wyrobu obliczany jest analitycznie na podstawie danych z już wykonanych operacji w ramach innych zleceń produkcyjnych. Podstawą jest korelacja między wartościami cech krytycznych a rzeczywistym czasem wymagany do ukończenia operacji. Wykorzystanie danych historycznych w połączeniu z ich stałą aktualizacją o najnowsze czasy wykonania, pozwala również na aktualizację uzyskanych wyników, ze względu na zwiększanie wydajności procesów, a tym samym skracanie czasów produkcji

Zaproponowana metoda została zweryfikowana w rzeczywistym przedsiębiorstwie produkcyjnym wytwarzającym elektryczne elementy grzejne. Wyniki badań weryfikacyjnych przedstawiono w [A4].

Dla przygotowanych danych wejściowych zweryfikowano czasy planowane i rzeczywiste. Planowany czas potrzebny na wykonanie operacji oceniano zarówno w odniesieniu do całkowitego czasu produkcji, jak i w odniesieniu do czasu potrzebnego na wykonanie poszczególnych operacji technologicznych (czas jednostkowy). Całkowity czas produkcji szacowany z proponowaną metodą był średnio o ok. 5% dłuższy niż rzeczywisty czas produkcji. Znacznie większe różnice wystąpiły dla poszczególnych operacji technologicznych. W przypadku operacji obejmującej montaż części powstałych w różnych procesach produkcyjnych szacowany czas był o 8% dłuższy niż czas rzeczywisty.

Powodem może być zależność tej operacji od dostępności elementów składowych. W przypadku operacji wymagającej precyzyjnej pracy manualnej operatorów szacowany czas był o 20% krótszy od rzeczywistego.

3.5. Integracja technicznego przygotowania produkcji i sterowania przepływem produkcji

Kastomizacja wyrobów to duże wyzwaniem dla firm produkcyjnych, ponieważ wymaga sprawnych procesów decyzyjno-kontrolnych od projektowania wyrobów aż po ich wysyłkę do klienta. Konieczność spełnienia wymagań klientów, przyjęte metody harmonogramowania muszą uwzględniać możliwość wytwarzania wyrobów z wykorzystaniem różnych zasobów produkcyjnych. Pozwala to na szybką reakcję na nowe zamówienia lub w przypadku pojawienia się nowych czynników uniemożliwiających wykorzystanie zasobów. Wymaga to ścisłej integracji planowania i sterowania produkcją z konstrukcyjno-technologicznym przygotowaniem produkcji. Prowadzone prace dotyczyły badań związanych z modelem systemu produkcyjnego funkcjonującego z zastosowaniem rozwiązań wpisujących się koncepcję Przemysł 4.0.

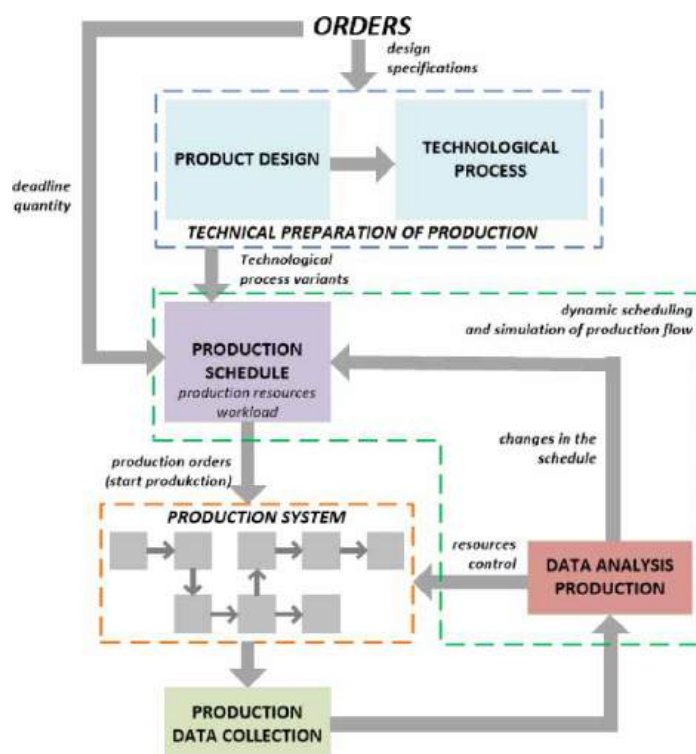
Badania dotyczące rozwoju i funkcjonowania przedsiębiorstw produkcyjnych zgodnie z koncepcją Przemysł 4.0 w zakresie założeń zintegrowanego i inteligentnego projektowania wyrobów i sterowania produkcją przedstawiono w artykule [A5]. Przedstawiono różne techniki wspomagające proces projektowania zindywidualizowanych produktów i organizację ich wytwarzania w kontekście realizacji strategii masowej personalizacji, która pozwala na skrócenie czasu opracowania nowego produktu.

Inteligentne projektowanie odnosi się do projektowania, które jest łatwe, szybkie i - co najważniejsze - poprawne w pierwszej iteracji. Projektowanie oparte na Knowledge-Based Engineering (KBE) spełnia te założenia. Rozwiązania klasy KBE zawierają wiedzę ekspercką o tym, jak, kiedy i co należy zrobić, zidentyfikowaną, zebraną i dalej przetwarzaną przez system komputerowy, co pozwala na jej łatwiejsze zastosowanie w nowych projektach. Autorzy uważają, że dalszy rozwój systemów KBE powinien skupić się na opracowaniu standardów gromadzenia i przetwarzania wiedzy, szczególnie w zwłaszcza w dziedzinie projektowania hybrydowego.

Realizacja strategii Mass Castomization (MC) wprowadza szereg ogromnych wyzwań dla procesów sterowania produkcją. Mają one bezpośredni wpływ na efektywność wykorzystania dostępnych zasobów i osiąganie celów dotyczących wydajności i kosztów produkcji. Spełnienie zmiennych wymagań klientów wymaga systemowych rozwiązań w zakresie harmonogramowania produkcji, przepływu materiałów monitorowania i analizy oraz podejmowania decyzji. W tym kontekście inteligentna produkcja będzie możliwa, jeśli przyjęte metody sterowania umożliwią dynamiczną reakcję na zewnętrzne i wewnętrzne czynniki, które mają wpływ na funkcjonowanie systemu produkcyjnego. W artykule autorzy podkreślają, że zintegrowane projektowanie i sterowanie produkcją są niezbędnymi elementami inteligentnej fabryki przyszłości, która jest w stanie zrealizować strategię MC. Tylko wtedy będzie w pełni możliwe w pełni wykorzystać

potencjał produkcyjny firmy z nowoczesnymi zasobami technicznymi i zgodnie z koncepcją Przemysłu 4.0.

Biorąc pod uwagę różnorodność wymagań klientów, stosowane metody harmonogramowania muszą uwzględniać możliwość wytwarzania produktów z wykorzystaniem różnych zasobów produkcyjnych. Pozwala to na szybką reakcję w wyniku pojawienia się nowych zleceń lub czynników uniemożliwiających ich wykorzystanie. Dlatego coraz ważniejsza staje się ścisła integracja harmonogramowania z procesami projektowania wyrobów (rys. 3.3.9).



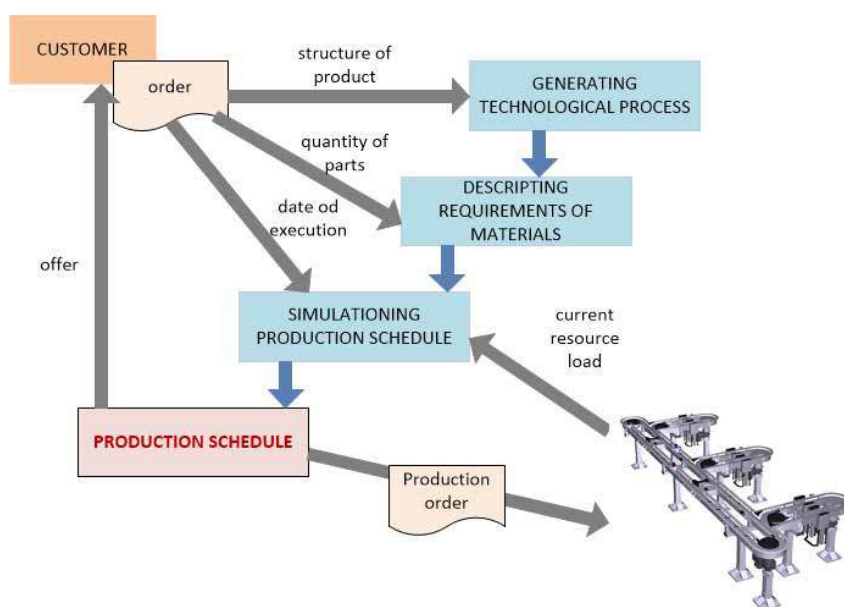
Rys. 3.3.9. Proces integracji procesów projektowania i sterowania przepływem produkcji [A5].

Różnorodność wariantów produktów jest również wyzwaniem w zakresie harmonogramowania i kontroli produkcji, przy założeniu efektywnego wykorzystania dostępnych zasobów produkcyjnych i synchronizacji przepływu materiałów w systemie produkcyjnym. Dostępne rozwiązania - metody lub systemy wspomagające procesy muszą być zdolne do przetwarzania dużych ilości danych, które będą poddawane analizie, analizie, pozwalając na podejmowanie racjonalnych decyzji z przepływem materiałów. W takim przypadku najważniejsze jest pozyskiwanie bieżących informacji z otoczenia z otoczenia systemu produkcyjnego (wymagania klienta) oraz informacji dotyczące dostępności i funkcjonowania systemu produkcyjnego. Realizację takich zadań ułatwia m.in. między innymi przez Internet rzeczy (dotyczący funkcjonowania systemu produkcyjnego) oraz sprawna wymiana danych pomiędzy systemami komputerowymi, związanymi np. z projektowaniem lub planowaniem procesów czy planowaniem procesów wytwarzania produktów oraz koordynacją dostaw materiałów i kooperacji.

Idea inteligentnej fabryki umożliwia zaspokojenie indywidualnych potrzeb klientów przy rozsądnym wykorzystaniu zasobów produkcyjnych. Planowanie realizacji zamówień musi charakteryzować się ścisłą integracją w zakresie wymiany danych dotyczących wymagań konstrukcyjnych i technologicznych. Tylko ścisła integracja tych obszarów zagwarantuje synchronizację przepływu produkcji, a tym samym przyczyni się do terminowej realizacji zamówień klientów.

W wyniku prowadzonych prac badawczych opracowany został autorski model inteligentnego systemu produkcyjnego funkcjonującego w ramach Laboratorium SmartFactory. W artykule [A6] przedstawiono rozwiązanie integracji procesów projektowania wyrobów konfigurowalnych i sterowania produkcją w ramach idei Przemysłu 4.0.

Wyroby projektowane są z wykorzystaniem dedykowanego oprogramowania, które umożliwia ich dostosowanie do indywidualnych wymagań klienta. Informacje dotyczące struktury wyrobu umożliwiają automatyczne generowanie procesów technologicznych w celu zaplanowania produkcji, a tym samym określenia czasu realizacji zamówienia (rys. 3.3.10).



Rys. 3.3.10. Ogólny model wydajności realizacji zamówień w modelu inteligentnej fabryki [A6].

Aby ułatwić konfigurację i zapewnić szeroki zakres potencjalnych wariantów, użytkownik może samodzielnie dostosowywać wyroby za pomocą dedykowanego oprogramowania. Interfejs graficzny oprogramowania pozwala użytkownikom wybierać wstępnie zdefiniowane części i wizualizować dostosowanie wyrobu.

Wyrób konfigurowany przez klienta, jest następnie analizowany pod kątem procesów technologicznych i zapotrzebowania na materiały potrzebne do wykonania komponentów produktu. Jest to realizowane automatycznie przez autorski system informatyczny 4Factory po zaimportowaniu danych z konfiguratora wyrobów.

Możliwości technologiczne systemu produkcyjnego definiowane są jako zdolność danego stanowiska produkcyjnego do dodania określonej części będącej składnikiem gotowego wyrobu. W ten sposób powstała baza wiedzy zawierająca wszystkie standardowe procesy technologiczne.

Proces technologiczny generowany jest automatycznie na podstawie struktury wyrobu i możliwości technologicznych systemu produkcyjnego. Struktura procesu technologicznego zawiera listę kolejnych operacji i zadań technologicznych oraz standardowy czas potrzebny na ich wykonanie, związany z ich realizacją na danym stanowisku produkcyjnym.

Proces technologiczny jest podstawą do opracowania harmonogramu produkcji. Wskazuje on, czy możliwe jest wykonanie zleceń produkcyjnych w terminach wymaganych przez klientów. Akceptacja przez użytkownika systemu harmonogramu produkcji pozwala na fizyczną realizację zleceń produkcyjnych.

Funkcjonowanie przedstawionego laboratoryjnego modelu systemu produkcyjnego oparte jest na zasadach inteligentnej fabryki. Systemem produkcyjnym zarządza autorskie oprogramowanie 4Factory. Zaimplementowane rozwiązania umożliwiają przeprowadzanie symulacji związanych z realizacją poszczególnych zleceń produkcyjnych. Opracowany model realizacji zamówień klientów opiera się na wymianie danych związanych z konfiguracją produktu (projekt konstrukcyjny produktu), automatycznym opracowywaniem procesów technologicznych, a następnie planów produkcyjnych.

3.6. Zapewnienie dostępności materiałów do realizacji procesów produkcyjnych

Postępująca wariantowość wyrobów powoduje, że wzrasta liczba części stanowiących ich elementy składowe. Z tego powodu efektywne procesy logistyki produkcji stanowią coraz większe wyzwanie w funkcjonowaniu systemów produkcyjnych. Od skuteczności tych procesów zależy efektywność procesów produkcyjnych oraz przepływu produkcji.

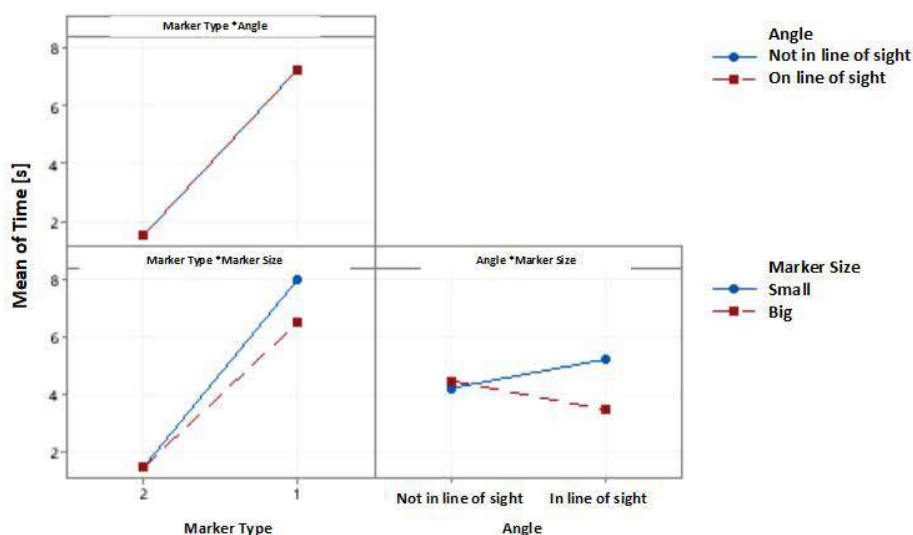
Proces kompletacji materiałów i wyrobów z obszarów magazynowych lub buforowych - może być realizowany w sposób manualny przez operatorów lub z zastosowaniem automatyzacji. Systemy kompletacji zautomatyzowane wymagają dużych nakładów finansowych z kolei kompletacja manualna jest bardziej pracochłonna i obciążona ryzykiem pomyłek.

Badania dotyczące skuteczności rozwiązań wspomagających proces kompletacji przedstawiono w pracy [A7]. Przedmiotem badań było zastosowanie rozwiązań rzeczywistości rozszerzonej (ang. augmented reality – AR) do identyfikacji i kompletacji materiałów w systemie produkcyjnym. Badania zostały przeprowadzone w Laboratorium Smart Factory Politechniki Poznańskiej

Prace badawcze zostały podzielone na dwa etapy. W pierwszym etapie przeprowadzono badania mające na celu przyjęcie najbardziej skutecznego rozwiązania AR w postaci aplikacji informatycznej, inteligentnych okularów AR oraz znaczników identyfikacyjnych (markerów). Wybrany wariant rozwiązania został zastosowany w etapie drugim badań.

W etapie tym porównano czas identyfikacji i kompletacji części produkcyjnych uzyskanych przy użyciu techniki AR i procesu realizowanego z zastosowaniem dokumentacji papierowej.

Etap pierwszy badań dotyczył wyboru elementów systemu Augmented Reality pozwalających na największą skuteczność identyfikacji markerów umieszczonych na półkach regału magazynowego. Elementami podlegającymi badaniom były: Okulary AR, aplikacje AR, typ markera oraz rozmiar markera. W ramach badań przeprowadzono eksperymenty, które pozwoliły na ustalenie korelacji i dobór elementów pozwalających na największą skuteczność działania (rys. 3.3.12).

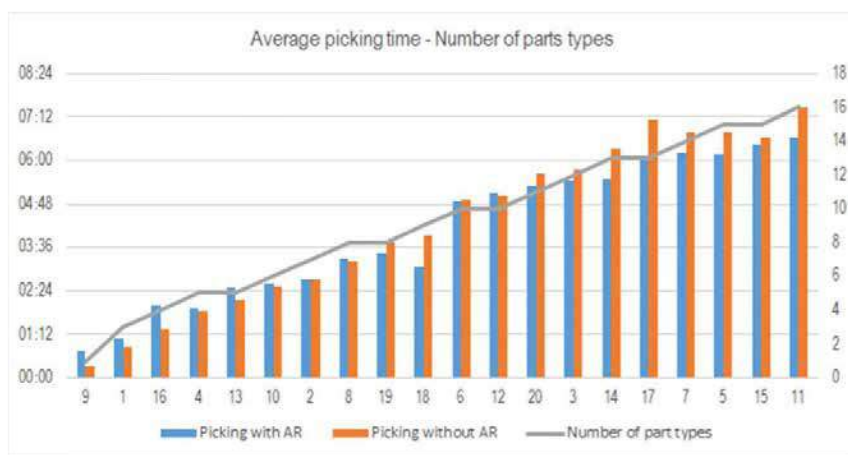


Rys. 3.3.12. Przykładowy wykres interakcji czynników eksperymentu [A7].

Wyniki eksperymentów zostały wykorzystane w realizacji drugiego etapu, który dotyczył realizacji procesu kompletacji części w warunkach symulowanych.

Ten etap badań dotyczył porównania procesów kompletacji z wykorzystaniem rozwiązań AR i tych realizowanych bez takiego wsparcia. Parametrami oceny były: poprawność kompletacji typów części, ich liczba oraz czas kompletacji. Przedmiotem badań był regał magazynowy, na półkach którego umieszczone były pojemniki z częściami. Dana część znajdowała się tylko w jednej lokalizacji. Zadaniem osoby kompletującej było pobranie wymaganej liczby danej części na podstawie listy kompletacyjnej i umieszczenie jej w pojemniku zbiorczym. W procesie kompletacji bez wsparcia AR uczestnik badania otrzymywał papierową listę kompletacji i na tej podstawie identyfikował części. W procesie przeprowadzonym z wykorzystaniem rozwiązań AR, lista kompletacji była wyświetlana na ekranie okularów. Każdy z uczestników badania wykonał 20 takich samych zleceń kompletacji. Zlecenia te różniły się rodzajem części (od 1 do 16 rodzajów części) i liczbą elementów do pobrania (od 1 do 55 części). Aby wyeliminować czynnik zapamiętywania położenia części na półce, po każdym zleceniu następowała zmiana ich położenia na półce.

Wyniki badań wskazują, że w przypadku większości zleceń kompletacji uczestnicy korzystający z rozwiązania AR wykonali je szybciej. W wyniku realizacji zleceń kompletacji nie wystąpiły błędy związane z kompletacją nieprawidłowych części i ich liczbą sztuk. Analiza wyników pokazuje, że zastosowanie rozwiązania AR skutkowało mniejszym rozrzutem uzyskanych czasów kompletacji (rys.3.3.13).



Rys. 3.3.13. Porównanie czasów kompletacji części w przeprowadzonym eksperymencie [A7].

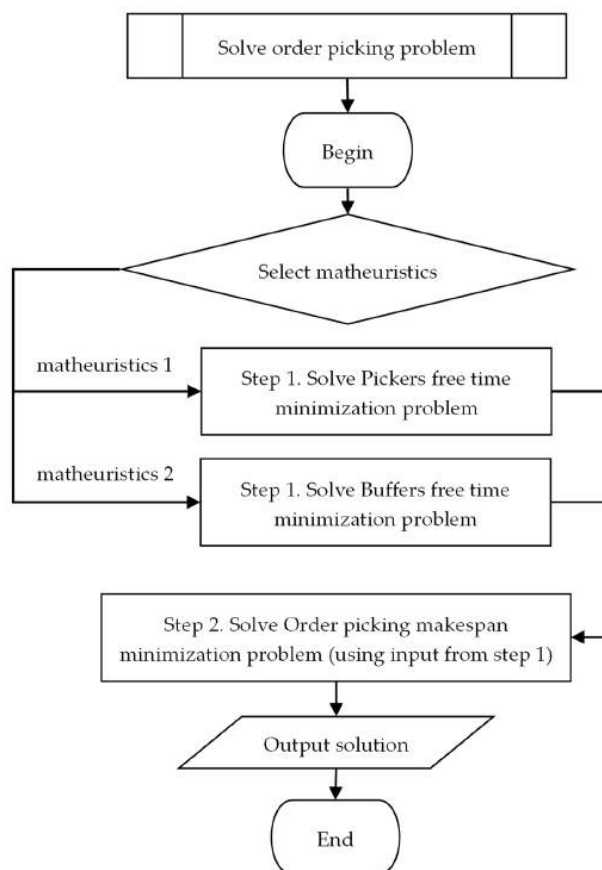
Uzyskane wyniki wskazują, że realizacja procesu kompletacji materiałów z wykorzystaniem rozwiązań AR jest efektywna. Wyniki badań pokazują również przewagę rozwiązania AR wraz ze wzrostem liczby typów części i ich liczby sztuk. Zastosowanie technik AR przyczynia się do efektywniejszej identyfikacji części, co bezpośrednio wpływa na skrócenie czasu kompletacji. Na podstawie uzyskanych wyników można również stwierdzić, że zastosowanie rozwiązań AR ma pozytywny wpływ na stabilność i powtarzalność procesu kompletacji.

Prezentowane rozwiązanie oparte na rzeczywistości rozszerzonej wykazuje duży potencjał w realizacji procesów kompletacji materiałów. Wyniki testów pokazują, że wraz ze wzrostem liczby typów części i liczby sztuk możliwe jest skrócenie czasu realizacji zleceń kompletacji. Wyniki wskazują również na stabilność i powtarzalność procesów realizowanych z wykorzystaniem AR. Warto podkreślić, że badania zostały przeprowadzone z wykorzystaniem standardowego sprzętu AR, co wskazuje na wysoki potencjał ekonomiczny tych rozwiązań.

Istotną kwestią w przypadku kompletacji dużej liczby części czy wyrobów gotowych jest organizacja pracy pracowników logistyki produkcji. Sprawne dostawy wymaganych materiałów do komórek produkcyjnych wymagają ustalenia harmonogramu pracy logistyków. W pracy [A8] przedstawiono wyniki badań związanych z zastosowaniem optymalizacji wykorzystującej metody programowania matematycznego do tworzenia rozwiązań heurystycznych.

Prace badawcze dotyczyły kompletacji materiałów w magazynie centralnym, dla potrzeb realizacji procesów produkcyjnych. Dany materiał jest składowany na jednym regale, ale możliwe jest przechowywanie niektórych materiałów w wielu lokalizacjach.

W tym badaniu wybrano rozwiązanie oparte na programowaniu matematycznym, ponieważ trudno byłoby opracować metodę, która mogłaby wygenerować akceptowalne rozwiązania w rozsądnym czasie, biorąc pod uwagę wszystkie ograniczenia związane z kompletacją zamówień. Zaproponowano podzielenie głównego problemu kompletacji zamówień na dwa podproblemy i spróbować rozwiązać każdy z nich za pomocą programowania matematycznego. Pierwszy krok ma dwa warianty, takie jak problem minimalizacji czasu wolnego operatorów kompletacji i problem minimalizacji czasu wolnego strefy magazynowej. Następnie, w drugim kroku, rozwiązujemy główny problem minimalizacji czasu kompletacji zamówień przy użyciu danych wejściowych z kroku 1.



Rys. 3.3.14. Procedura optymalizacji procesu kompletacji materiałów [A8].

Opracowano model optymalizacyjny obejmujący dekompozycję podstawowego problemu kompletacji zamówień na dwa podproblemy. W początkowym etapie rozwiązywany jest problem minimalizacji czasu wolnego dla osób kompletujących, po którym następuje badanie minimalizacji czasu realizacji zamówienia. Faza eksperymentalna jest przeprowadzana w trzech wersjach układu magazynu centralnego, w których jeden lub więcej pracowników kompletujących jest przypisanych do jednego lub więcej stref magazynu.

Model matematyczny uwzględniał następujące kryteria: każdy pracownik kompletuje tylko jeden typ materiałów dla jednego zamówienia we wszystkich swoich strefach jednocześnie; każdy pracownik w każdym zamówieniu we wszystkich swoich strefach

kompletuje tylko jeden materiał na raz. Rozpoczęcie operacji kompletacji w każdej strefie nie może nastąpić wcześniej niż czas przejazdu kontenera do tej strefy z magazynu.

Operacje kompletacji mają pierwszeństwo w każdej kolejności, wykonywane przez wszystkie osoby kompletujące we wszystkich strefach; tj. poprzednia operacja kompletacji musi zakończyć się przed rozpoczęciem jakiegokolwiek następnej operacji kompletacji dla tego zamówienia.

Zostały opracowane dla modele matematyczne (Matheuristics 1 i Matheuristics 2) dla, których zdefiniowano dwie różne funkcje kryteriów. Zestaw ograniczeń był taki sam dla każdego z modeli. Wygenerowano testowy zbiór danych: 120 instancji testowych, które zostały przygotowane do eksperymentu. W każdej wygenerowanej instancji było 5, 10, 15 i 20 zamówień. Losowo wygenerowano pięć produktów do pobrania do pojemnika.

Celem eksperymentu obliczeniowego było ustalenie, czy komercyjne narzędzia, takie jak Solver CPLEX, mogą być wykorzystane do rozwiązania określonego problemu kompletacji na zamówienie.

Wyniki porównania matematycznego pokazują, że pierwszy model matematyczny był lepszy niż drugi znajdując sześć lepszych rozwiązań.

Drugi model matematyczny znalazł tylko 3 rozwiązania, które były lepsze w porównaniu z pierwszym modelem. Co więcej, w przypadku drugiej instancji pierwszy model znalazł rozwiązanie, ale drugi nie zwrócił żadnego wyniku. Ogólnie rzecz biorąc, pierwszy model matematyczny znalazł średnio lepsze rozwiązania, ale drugi model znalazł średnio lepsze rozwiązanie tylko o 0,56%.

Wyniki wskazują, że zaproponowany problem minimalizacji czasu realizacji zamówienia dla pięciu zamówień może zostać rozwiązany przez solver CPLEX. W pierwszym kroku oba modele matematyczne (minimalizujące czas wolny kompletacji i stref) znalazły optymalne rozwiązania dla wszystkich 30 instancji, ale w drugim kroku uzyskano tylko 1 optymalne rozwiązanie z 30 instancji.

W przypadku 10 zamówień tylko pierwszy krok został rozwiązany przez oba modele, które również znalazły optymalne rozwiązania dla wszystkich 30 instancji.

W przypadku 15 zamówień w pierwszym kroku oba modele mogły znaleźć optymalne rozwiązania dla 2 z 30 przypadków tylko dla pierwszego i drugiego układu. Dla 20 zamówień w 1. kroku oba modele znalazły optymalne rozwiązania dla 8 z 10 przypadków dla 1. układu i dla wszystkich 10 przypadków dla 2. układu. Dla pozostałych 10 przypadków trzeciego układu uzyskano wykonalne rozwiązania. Trzeci układ, w którym więcej niż jeden pracownik kompletacji został przypisany do jednej strefy magazynu, był najtrudniejszy do rozwiązania.

Badania potwierdziły, że zaproponowane programowanie matematyczne może rozwiązać proponowany problem minimalizacji czasu kompletacji zamówień dla pięciu zamówień z wystarczająco dobrymi wynikami. Pomimo faktu, że wszystkie wystąpienia dla 10 zamówień zostały rozwiązane optymalnie przez pierwszy krok obu matematyki (problemy minimalizacji wolnego czasu pracowników kompletujących i stref).

Badania wskazują, że zastosowanie techniki opartej na programowaniu matematycznym jest obiecujące dla uzyskania rozwiązań w rozsądnych ramach czasowych. Proponowane podejście umożliwia szybkie i skuteczne znalezienie

rozwiązania problemu, dzięki czemu może być stosowane zastosowania w procesie projektowania i wyboru systemów kompletacji materiałów.

3.7. Szacowanie strat materiału w procesie technologicznym

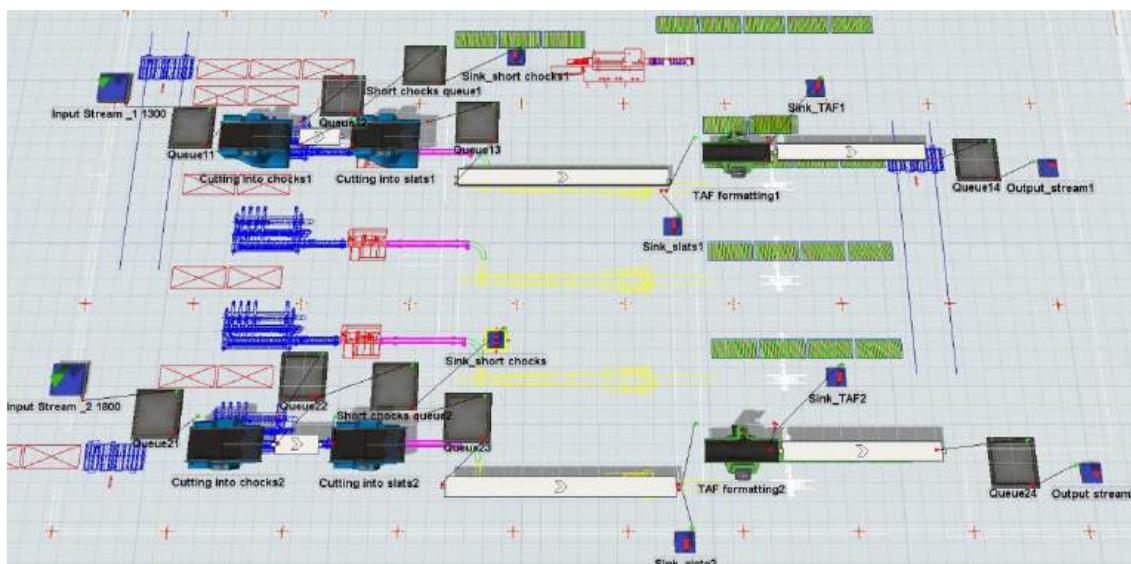
Określenie strat materiałów wejściowych jest bardzo ważnym zagadnieniem w realizacji procesów produkcyjnych. Wiedza ta pozwala na prawidłowe: określenie zapotrzebowania na materiały, planowanie produkcji i kalkulację kosztów wytwarzania. Zadanie to jest szczególnie złożone w przypadku:

- materiałów niejednorodnych wymiarowo i strukturalnie,
- niskiej stabilności stabilność procesów technologicznych,
- stosowania materiałów o wymiarach pozwalających uzyskać różną liczbę i wariantów wyrobów.

Prowadzone prace badawcze dotyczyły dwóch kierunków badań: zastosowania metod symulacyjnych oraz programowania matematycznego do szacowania i optymalizacji strat materiałowych w procesie technologicznym.

W artykule [A9] przedstawiono badania dotyczące wykorzystania metod symulacyjnych do określania strat materiałów w produkcji elementów deski podłogowej. W procesie tym straty materiałowe powstają w trakcie kolejnych operacji technologicznych. Pomiar stosunku objętości wejściowej (drewno) do wyjściowej (listwy) pozwala oszacować straty w zakresie 30–40%. Główną przyczyną tak niskiej dokładności w określaniu zapotrzebowania na materiał wejściowy jest niestabilność wymiarów geometrycznych materiału wejściowego i jego niejednorodna struktura wewnętrzna. Najważniejszą kwestią będącą przedmiotem badań było określenie wpływu jakości i wielkości danych wejściowych stanowiących podstawę działania modelu symulacyjnego. Ogólnie przyjmuje się, że próba powinna składać się z niezależnych obserwacji i powinna być wystarczająco duża, aby w wystarczającym stopniu ujawnić charakter i zmienność analizowanej populacji. W praktyce przemysłowej jest to często trudne, ponieważ proces zbierania danych może być długi lub zmienność analizowanej cechy jest tak duża, że jakość opracowanych modeli symulacyjnych może być niska.

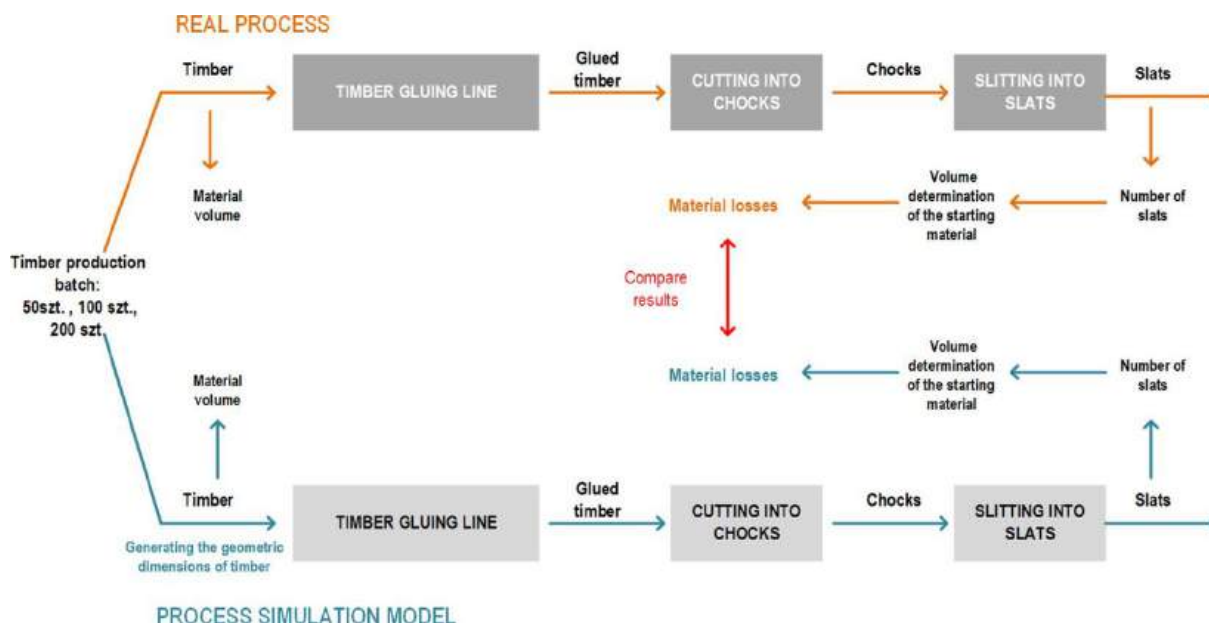
Proces produkcyjny został zamodelowany w FlexSim, środowisku do symulacji zdarzeń dyskretnych. Zamodelowano linię produkcyjną ze stacjami roboczymi i ich parametrami technologicznymi zgodnie z warunkami rzeczywistymi (rys. 3.3.15).



Rys. 3.3.15. Widok modelu symulacyjnego linii produkcyjnej [A9].

Model symulacyjny obejmował wszystkie etapy i cechy rzeczywistego procesu produkcyjnego. Bazował on na 6 wariantach danych wejściowych, które obejmowały zbiory wymiarów geometrycznych drewna i półfabrykatów pośrednich (długość, szerokość i grubość). Warianty te różniły się wielkością próby stanowiącej podstawę do wygenerowania zbiorów danych stanowiących dane wejściowe do eksperymentów symulacyjnych i wynosiła ona: 10, 20, 40, 60, 80 i 100 elementów. Na podstawie tych danych z próby oszacowano objętość materiału, stosując dopasowanie statystyczne znanych rozkładów, a następnie wykorzystano ją do obliczenia ubytku materiału i ostatecznej liczby wyprodukowanych części. Przeprowadzone eksperymenty symulacyjne miały na celu określenie ubytku materiału dla trzech partii produkcyjnych o wielkościach próbki materiału wejściowego wynoszących 50, 100 i 200 sztuk. Prognozowanie ubytku materiału w modelu symulacyjnym przeprowadzono w 30 powtórzeniach dla każdego wariantu zbioru danych wejściowych.

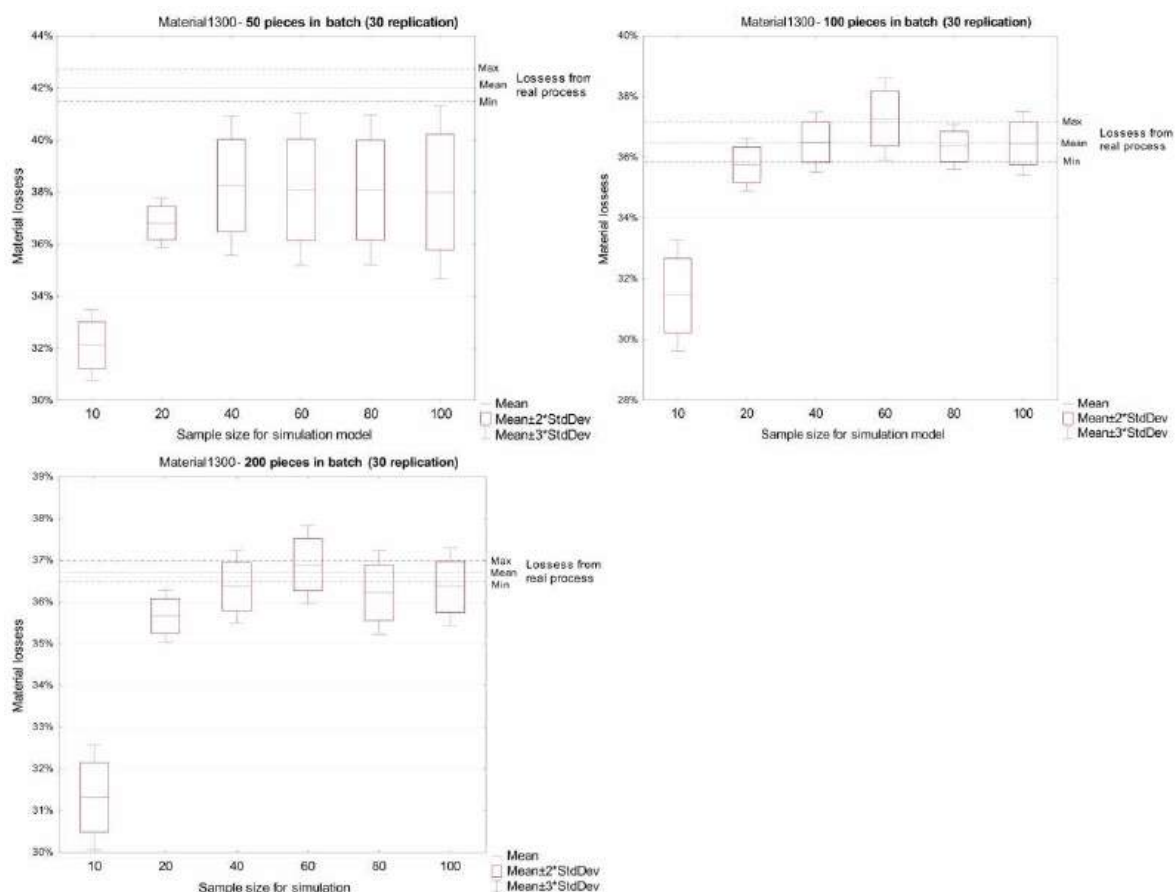
Walidację modelu symulacyjnego przeprowadzono poprzez porównanie wyników eksperymentów symulacyjnych z rzeczywistymi wynikami uzyskanymi w procesie produkcyjnym (rys. 3.3.16).



Rys. 3.3.16. Plan badań szacowania strat materiałowych [A9].

Eksperymenty symulacyjne pozwoliły określić wpływ wielkości próby statystycznej wykorzystanej w modelu symulacyjnym na prognozowanie strat materiału w omawianym procesie. Nie stwierdzono istotnego wpływu na dokładność wyników uzyskanych w modelu symulacyjnym dla próbek 40 elementów i więcej. Wyniki te dotyczą wszystkich rodzajów materiałów (drewno 1300 i 1800 mm) i wszystkich analizowanych wielkości partii produkcyjnych (50, 100 i 200 sztuk). Przykłady wyników przedstawiono na rys. 3.3.17.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych zalecana wielkość próby, dla której można opracować wiarygodny model symulacji straty materiału w produkcji środkowej warstwy drewnianej deski podłogowej, waha się od 40 do 60 niezależnych pomiarów.



Rys. 3.3.17. Porównanie strat z rzeczywistego procesu ze stratami otrzymanymi w modelu symulacyjnym [A9].

Prognozowanie strat materiałowych w procesach, których główną przyczyną jest zmienność materiału wejściowego, jest trudne do oszacowania w praktyce przemysłowej. Dlatego stworzenie modelu symulacyjnego jest racjonalnie uzasadnione. Przedstawiony model został wdrożony w dużej firmie produkcyjnej i opisuje rzeczywiste straty materiałowe bardziej wiarygodnie niż wcześniejsze założenie, że materiał wejściowy jest jednorodny.

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że na skuteczność modelu symulacyjnego istotnie wpływa jakość i liczność próby, na podstawie której szacowany jest model stochastyczny. Wykazano, że mała próba danych może być niewystarczająca do zaobserwowania zmienności procesu. Z drugiej strony nadmierna liczebność próby (80 lub więcej obserwacji) dla materiału o dużej naturalnej zmienności geometrycznej wiąże się z uwzględnieniem wartości odstających, co może obniżyć ogólną jakość prognostyczną modelu symulacyjnego.

Innym przedmiotem badań były metody planowania produkcji pozwalające na zmniejszenie strat materiałowych w procesie technologicznym, w którym materiał wejściowym ma postać wielkoformatową (np. płyta, arkusz, itp.). W takim przypadku jest możliwe uzyskanie z jednej sztuki takiego materiału kilku sztuk i kilku wariantów wyrobów. Problemem jest zaplanowanie rozkroju takiego materiału, który pozwoli na zmniejszenie odpadów (strat materiału) przy spełnieniu zapotrzebowania na wyroby.

W pracy [A10] przedstawiono wyniki badań rozwiązania tego problemu z zastosowaniem programowania matematycznego. Przedmiotem badań był proces druku opakowań wyrobów konsumpcyjnych. W tym przypadku planowanie polega na rozmieszczeniu kształtu geometrycznego opakowania na arkuszu materiału opakowaniowego. Proces ten był realizowany manualnie przez planistów i w dużym stopniu efekty były zależne od ich doświadczenia. Celem było zmniejszenie strat materiałowych, co wiąże się z poprawą zużycia materiałów, głównie poprzez zmniejszenie druku liczby dodatkowych elementów stanowiących nadprodukcję.

Zamówienia klientów obejmują różne rodzaje opakowań, które wymagają zastosowania kilku narzędzi (arkuszy, które można zamontować na maszynie drukarskiej). Każde narzędzie używane w jednym pakiecie zamówień ma taką samą liczbę gniazd (każde gniazdo może być użyte dla dowolnego opakowania) na arkusz i liczbę powtórzeń na arkuszu. Koszt arkusza jest stały. Jeśli arkusz jest używany, musi drukować typ pakietu przy użyciu liczby powtórzeń na arkusz dla tego urządzenia, tj. liczba ta nie może zostać zmniejszona w przypadku mniejszych zamówień. Prowadzi to do sytuacji, w której powstają duże ilości dodatkowych opakowań.

Optymalizacja została zaimplementowana na komercyjnej platformie solverowej i porównana z rozwiązaniem znalezionym ręcznie przez planistów produkcji. Eksperymenty obliczeniowe zostały przeprowadzone w IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. Model matematyczny obejmował zdefiniowanie liczby powtórzeń na arkuszu i liczby gniazd dla każdego zamówienia w arkuszu, tak aby całkowity koszt produkcji (w tym główne koszty drukowania i koszty nadprodukcji) był zminimalizowany.

Eksperymenty wykazały, że jakość rozwiązania ściśle zależy od wcześniej zdefiniowanego czasu rozwiązania. Z drugiej strony, szybki dostęp do rozwiązania jest również istotnym czynnikiem decydującym o użyteczności. Statystycznie na ręczne przygotowanie przydziału pojedynczego planu produkcji w firmie potrzeba około jednej godziny pracy pracownika.

Wyniki badań wskazują, że planista prawie we wszystkich przypadkach użył większej liczby arkuszy w proponowanym planie produkcji. Czynnikiem zwiększającym użycie większej liczby arkuszy nie jest całkowita wielkość produkcji, ale stopień zróżnicowania wielkości zleceń w ramach danego zestawu. W większości przypadków model matematyczny wskazywał rozwiązanie planu produkcji przy znacznie niższym całkowitym koszcie produkcji.

W przypadku badań dotyczących planowania rozkładu wyrobów produkowanych w materiałach wielkoformatowych wskazano skuteczność programowania matematycznego. Opracowany moduł planistyczny w środowisku CPLEX cechuje się skutecznością w zakresie minimalizacji kosztów produkcji ale także automatyzuje procesy planistyczne zależne od doświadczenia planistów.

3.8. Podsumowanie

Prowadzone badania dotyczyły metod i narzędzi determinantów mających wpływ na procesy sterowania przepływem produkcji. Stanowią one dane wejściowe, które powinny

być uwzględnione na etapie projektowania oraz operacyjnego sterowania przepływem produkcji.

Określenie rodzaju zasobów produkcyjnych (specjalizowane, uniwersalne), które są najbardziej adekwatne do realizacji procesów produkcyjnych jest kluczowa w obliczu postępującej kustomizacji wyrobów. Jak wykazano, metody symulacyjne oraz programowanie matematyczne pozwalają wskazać dla jakiej charakterystyki wyrobów i procesów, które rodzaje zasobów pozwalają uzyskać lepsze wyniki podczas realizacji procesów produkcyjnych.

Metody te sprawdzają się także do określania strat materiału, które mogą powstać podczas realizacji procesów technologicznych. Ich zastosowanie pozwala na kalkulację danych wejściowych, które powinny być uwzględnione podczas sterowania przepływem materiałów.

Innym kluczowym czynnikiem jest określenie normatywów czasu realizacji procesów technologicznych, które stanowią normatyw do planowania i sterowania przepływem materiałów. Zaproponowana metoda kalkulacji czasów pozwala na ich szacowanie szczególnie w produkcji wyrobów kustomizowanych.

Sprawny przepływ materiałów jest możliwy tylko w przypadku zapewnienia stabilności w zakresie dostaw niezbędnych materiałów w realizacji operacji technologicznych. W związku z tym szczególnego znaczenia nabierają procesy przygotowania i kompletacji materiałów. Zastosowanie rozwiązań rzeczywistości rozszerzonej i optymalizacji matematycznej przyczynia się do wyeliminowania błędów i pozwala na skrócenia czasu realizacji tych procesów.

Jednym z kluczowych wyzwań w funkcjonowaniu systemów produkcyjnych jest szybkość reakcji na zmienne zamówienia klientów. W tym celu wymagana jest między innymi integracja przygotowania konstrukcyjnego i technologicznego ze sterowaniem przepływem produkcji. W wyniku prac badawczych zaproponowano model takiej integracji pozwalający na wyminę danych pomiędzy tymi obszarami i tym samym skrócić czas przygotowania danych umożliwiając szybsze rozpoczęcie realizacji zamówień klientów.

Wyniki badań wskazują na skuteczność zaproponowanych rozwiązań a ich zastosowanie może przyczynić się do zapewniania efektywnego sterowania przepływem produkcji. Ich integracja na poziomie rozwiązań informatycznych bez wątpienia przyczyni się do rozwoju koncepcji smart factory.

4. Wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna

Sterowanie przepływem produkcji jest zagadnieniem złożonym i wieloaspektowym. Podstępująca wariantowość wyrobów i procesów technologicznych oraz zmienne wymagania klientów sprawiają, że konieczne jest uwzględnienie wiele czynników wpływających na przepływ materiałów i informacji w systemie produkcyjnym.

Prowadzone prace badawcze i ich wyniki w tym zakresie pozwalają na wskazanie następującego wkładu w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, który polega na:

- opracowaniu modelu sterowania przepływem produkcji uwzględniającego koncepcję cyfrowego bliźniaka, zawierającego m.in:
 - model projektowania cyfrowego bliźniaka procesu produkcyjnego,
 - model opracowywania wariantów harmonogramów produkcji,
 - system ekspercki i analiza wielokryterialna wspomagające wybór harmonogramu,
 - model prognozowania i zmian w harmonogramie produkcji.
- zaprojektowaniu nowych sposobów sterowania przepływem produkcji wdrożonych do praktyki przemysłowej,
- określeniu relacji wspomagających dobór metod sterowania przepływem produkcji na podstawie cech wyrobów, procesów technologicznych i zapotrzebowania na wyroby,
- wskazaniu wpływu rodzajów zasobów na efektywność procesów produkcyjnych,
- opracowaniu metody szacowania normy czasów operacji technologicznych z zastosowaniem podejścia kalkulacyjnego i porównawczego dla wyrobów kastomizowanych,
- opracowania modelu integracji technicznego przygotowania produkcji i sterowania przepływem produkcji pozwalającego na skrócenie czasu uruchomienia zleceń,
- wskazaniu skuteczności modelowania matematycznego i symulacyjnego do szacowania strat materiału w procesie technologicznym.

Wskazane osiągnięcia dotyczą obszaru inżynierii produkcji i wskazują, że integracja wszystkich działań podejmowanych w systemie produkcyjnym wspieranych szeroko rozumianą cyfryzacją umożliwia poprawę efektywności procesów produkcyjnych.

INFORMACJE O AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ

Staż naukowy

Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy – Wydział Informatyki, Katedra Metod i Narzędzi Przetwarzania Danych.

Okres realizacji stażu 15.07 – 15.10. 2024r.

Program stażu obejmował badania metod sterowania przepływem produkcji z zastosowaniem rozwiązań informatycznych i cyfrowych wspomagających podejmowanie decyzji:

- analiza rozwiązań informatycznych wspomagających sterowanie przepływem produkcji,
- analiza metod pozwalających na przewidywanie i prognozowanie realizacji procesów produkcyjnych,
- analiza metod wspomagających reharmonogramowanie produkcji,
- identyfikacja obszarów badawczych zorientowanych na wspólne aplikowanie o dofinansowanie badań naukowych ze środków zewnętrznych.

Współpraca z Katedrą Zarządzania Procesami Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu

Współpraca dotyczy optymalizacji harmonogramowania produkcji oraz sekwencji pracy z zastosowaniem programowania matematycznego z ograniczeniami. Wynikiem współpracy są następujące publikacje naukowe:

- Kateryna Czerniachowska, Radosław Wichniarek, Krzysztof Żywicki, Matheuristics for the Order-picking Problem with Sequence-dependant Constraints in a Logistic Center with a One-directional Conveyor Between Buffers, Management and Production Engineering Review - 2024, vol. 15, no. 1, s. 140-160.
- Kateryna Czerniachowska, Radosław Wichniarek, Krzysztof Żywicki, A Model for an Order-Picking Problem with a One-Directional Conveyor and Buffer, Sustainability - 2023, vol. 15, iss. 18, s. 13731-1-13731-18.
- Kateryna Czerniachowska, Radosław Wichniarek, Krzysztof Żywicki, A Two-Step Matheuristics for Order-Picking Process Problems with One-Directional Material Flow and Buffers, Applied Sciences - 2023, vol. 13, iss. 18, s. 10099-1-10099-23.
- Kateryna Czerniachowska, Radosław Wichniarek, Krzysztof Żywicki, Constraint Programming for Flexible Flow Shop Scheduling Problem with Repeated Jobs and Repeated Operations, Advances in Science and Technology Research Journal - 2023, vol. 17, no. 3, s. 280-293.
- Kateryna Czerniachowska, Radosław Wichniarek, Krzysztof Żywicki, Heuristics for Dimensioning the Shelf Space on the Rack with Vertical and Horizontal Product Categorisation in the Distribution Centre with Zone Picking, Management and Production Engineering Review - 2022, vol. 13, no. 2, s. 31-47.

- Kateryna Czerniachowska, Krzysztof Żywicki, Radosław Wichniarek, A Method to Improve Planning of Product Placement on a Printing Sheet, Management and Production Engineering Review - 2021, vol. 12, no. 1, s. 119-128.

Udział w programie Erasmus i Ceepus

- University of Žilina, Faculty of Mechanical Engineering - uczestnik Programu międzynarodowego ERASMUS – Teaching Programme (2010),
- University of Žilina, Department of Machining and Automation - uczestnik program CEEPUS (2010).
- Uniwersity of Rijeka, Faculty of Engineering - uczestnik programu CEEPUS – (2009).

Członkostwo w komitetach redakcyjnych

- Guest Editor, w czasopiśmie, Machines, Special Issue " Intelligent Factory 4.0: Advanced Production and Automation Systems, ISSN 2075-1702.
- Guest Editor, w czasopiśmie, Machines, Special Issue " Intelligent Factory 4.0: Advanced Production and Automation Systems, Volume II, ISSN 2075-1702.
- Członek Topical Advisory Panel czasopisma Machines

OSIĄGNIĘCIA DYDAKTYCZNE I ORGANIZACYJNE

Osiągnięcia dydaktyczne

1. Promotor pomocniczy w przewodzie doktorskim mgr inż. Pauliny REWERS. Tytuł rozprawy doktorskiej: Metodyka poziomowania produkcji w kontekście rotacji zapasów oraz dostępności wyrobów gotowych. Promotor: prof. dr hab. inż. Adam HAMROL.
2. Pomysłodawca i autor programu i pierwszy kierownik studiów podyplomowych „Organizacja i zarządzanie produkcją”.
3. Współtwórca programu studiów dla kierunku Zarządzanie i inżynieria produkcji – I i II stopnia.
4. Opiekun specjalności „Sterowanie produkcją” na kierunku „Zarządzanie i inżynieria produkcji” II stopień.
5. Opracowanie i budowa laboratorium naukowo-dydaktycznego SmartFactory.
6. Członek zespołu realizującego projekt: motoZIP – rozwój kompetencji w zarządzaniu i inżynierii produkcji dla przemysłu motoryzacyjnego (2018-2020) – Program Operacyjny POWER (POWER.03.01.00-00-T004/17-00).

Zakres zadań w projekcie:

- kierownik projektu (od 1.10.2018 do 15.11.2019),
- współpraca z przedsiębiorstwami branży automotive,
- moderator w zadaniu motoTEAM - zadania praktyczne w formie zespołów projektowych.

7. Uczestnictwo w projekcie „Era Inżyniera. Rozbudowa Potencjału Rozwojowego Politechniki Poznańskiej” - opiekun staży i praktyk w pracach związanych z realizacją zadania dotyczącego współpracy uczelni z pracodawcami w zakresie wzmocnienia praktycznych elementów nauczania (staże i praktyki) (2008-2012).
8. Promotorstwo nagrodzonych prac dyplomowych
 - Promotor pracy dyplomowej inżynierskiej nagrodzonej 1 miejscem w konkursie Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją – oddział Poznański - Łukasz Sobków: „Wpływ balansowania i harmonogramowania linii montażowej na efektywność produkcji”.
 - Promotor pracy dyplomowej magisterskiej nagrodzonej 3 miejscem w Konkursie o nagrodę Dziekana WBMiZ za wyróżniające się prace dyplomowe – Dawid Antas: Metodyka wyznaczania wymaganej liczby linii montażowych.
9. Prowadzone zajęcia dydaktyczne
 - Zarządzanie produkcją i usługami – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji I st., wykład i ćwiczenia,
 - Organizacja i sterowanie produkcją – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji II st., wykład, laboratorium,
 - Projektowanie systemów produkcyjnych – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji II st., wykład, laboratorium,
 - Logistyka produkcji i identyfikacja przepływu produkcji – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji II st., wykład,
 - Nadzorowanie produkcji i zasobów technicznych – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji II st., wykład,
 - Seminarium przeddyplomowe – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji I i II st.,
 - Seminarium dyplomowe – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji I i II st.,
 - Smart factory – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji II st., wykład
 - Lean manufacturing - Seminarium dyplomowe – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji II st., wykład, ćwiczenia, projekt,
 - Współczesne koncepcje zarządzania produkcją - Seminarium dyplomowe – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji II st., wykład, projekty
 - Organizacja procesów pomocniczych - Seminarium dyplomowe – kierunek Zarządzanie i inżynieria produkcji II st., wykład, ćwiczenia
 - Zarządzanie produkcją – kierunek Mechanika i Budowa Maszyn I st., wykład,
 - Zarządzanie i organizacja pracy – kierunek Mechatronika – wykład.

10. Prowadzone zajęcia w ramach studiów podyplomowych

- Planowanie i sterowanie produkcją – studia podyplomowe „Organizacja i zarządzanie produkcją”,
- Wprowadzenie do zarządzania produkcją – studia podyplomowe „Organizacja i zarządzanie produkcją”,
- Organizacja przepływu produkcji – studia podyplomowe „Zarządzanie jakością w teorii i praktyce”,
- Stabilizacja procesów produkcyjnych – studia podyplomowe „Zarządzanie jakością w teorii i praktyce”,

Osiągnięcia organizacyjne

1. Zajmowane stanowiska

- Zastępca Dyrektora Instytutu Technologii Materiałów ds. dydaktyki (2024-do teraz),
- Członek Wydziałowej Komisji ds. jakości kształcenia (2024-do teraz),
- Zastępca Dyrektora Instytutu Technologii Materiałów ds. nauki (2020-2024),
- Członek Komisji oceniającej wnioski o finansowanie prac badawczych w ramach Subwencji na działalność naukową wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej (2020-2024).
- Członek dziekańskiej komisji ds. nagród na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania w okresie (2016-2019),
- Opiekun praktyk studenckich dla kierunku Zarządzanie i inżynieria produkcji (2008-2016).

2. Koordynator współpracy Politechniki Poznańskiej z przedsiębiorstwem Siemens Sp. z o.o. w zakresie nowoczesnej edukacji, zmierzający do wdrażania w procesie kształcenia rozwiązań funkcjonujących w przemyśle - w szczególności chodzi o postawienie na edukację uwzględniającą rozwiązania z obszaru przemysłu 4.0 i cyfryzacji. (2024-do teraz).

3. Członek stowarzyszenia „Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją”.

4. Pomysłodawca inicjatywy Fabryka Lean przy Katedrze Zarządzania i inżynierii Produkcji – platforma wymiany wiedzy i doświadczenia w zakresie doskonalenia procesów produkcyjnych dla przedsiębiorstw i środowisk naukowych:

- organizacja Konferencji Lean Thinking,
- organizacja Lean Tours – program wymiany wiedzy i doświadczeń podczas warsztatów tematycznych w przedsiębiorstwach produkcyjnych (m.in. Aesculap Chifa, Wix-Filtron, Amica Wronki),
- organizacja i przeprowadzenie szkoleń dla przedsiębiorstw dotyczących doskonalenia procesów produkcyjnych.

5. Przyznane nagrody

- Nagroda Rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia naukowe (2024)
– za realizację projektów: „FAS Control - system adaptacyjnego sterowania procesem produkcji korpusu wodomierza” oraz „Opracowanie systemu informatycznego do aktywnego sterowania produkcją z zastosowaniem koncepcji Digital Twins”,
- Nagroda specjalna Rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia dydaktyczne (2021) – Realizacja projektu motoZiIP
- Nagroda Rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia naukowe (2020)
– Realizacja projektu: EFFRaWood - Podniesienie efektywności wykorzystania surowca drzewnego w procesach produkcji w przemyśle – projekt w ramach programu BIOSTRATEG,
- Nagroda Rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia dydaktyczne (2017) – Opracowanie i przygotowanie laboratorium Smart Factory.