

POLITECHNIKA RZESZOWSKA
im. Ignacego Łukasiewicza

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji

PRACA DOKTORSKA

Jerzy PATER

**Modelowanie przepływu strumienia wartości produkcji
części lotniczych na elastycznej linii produkcyjnej**

Promotor:

dr hab. inż. Dorota STADNICKA, Prof. PRz

Rzeszów 2022

Spis treści

Spis treści.....	3
Wykaz oznaczeń, skrótów i pojęć	5
Streszczenie	7
Abstract.....	8
Wstęp.....	9
1. Wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy	13
1.1. Elastyczne systemy produkcyjne	13
1.2. Statyczne i dynamiczne mapowanie strumienia wartości (MSW)	19
1.3. Specyfika produkcji lotniczej	27
1.4. Wskaźniki oceny funkcjonowania linii produkcyjnej.....	28
2. Teza, cele, zakres i metodyka pracy.....	33
2.1. Teza pracy.....	33
2.2. Cele pracy	33
2.3. Zakres pracy.....	34
2.4. Ogólna metodyka pracy	34
3. Przegląd aktualnego stanu wiedzy	37
3.1. Szczegółowa metodyka przeprowadzenia systematycznego przeglądu literatury.....	37
3.2. Plan realizacji systematycznego przeglądu literatury.....	39
3.3. Wyniki systematycznego przeglądu literatury.....	42
3.4. Wnioski z przeprowadzonych badań literaturowych.....	46
3.5. Wybór metody modelowania przepływu strumienia wartości.....	46
4. Prezentacja obiektu badań.....	49
4.1. Layout linii produkcyjnej.....	49
4.2. Prezentacja wyrobów	50
4.3. Przepływ produktów	54
4.4. Mapa przepływu strumienia wartości	55
4.5. Gospodarka narzędziowa.....	56
4.6. Zarządzanie danymi	61
4.7. Stosowane wskaźniki oceny	61
5. Prezentacja problemu badawczego / problemów występujących na linii	65
6. Przygotowanie do badań	67
6.1. Przygotowanie narzędzi do zbierania danych.....	67
6.2. Przygotowania danych historycznych do analizy	68
6.3. Analiza danych historycznych	73

6.4.	Ocena możliwości automatycznego zbierania danych.....	81
7.	Opracowanie modelu	85
7.1.	Założenia do opracowania modelu.....	85
7.2.	Identyfikacja parametrów wejściowych.....	87
7.3.	Identyfikacja parametrów wyjściowych.....	88
7.4.	Opis modelu	89
7.5.	Weryfikacja modelu i analiza błędów	94
7.6.	Ocena adekwatności modelu.....	97
8.	Badania i eksperymenty symulacyjne	111
8.1.	Założenia do badań eksperymentalnych.....	111
8.2.	Plan eksperymentów.....	115
8.3.	Wyniki eksperymentów.....	129
9.	Wnioski z badań	149
	Podsumowanie	151
	Bibliografia	153
	Spis tabel.....	159
	Spis rysunków	163
	Załączniki.....	167

Wykaz oznaczeń, skrótów i pojęć

- ESP** – elastyczny system produkcyjny (ang. *Flexible Manufacturing System – FMS*)
- MSW** – Mapowanie strumienia wartości (ang. *Value Stream Mapping – VSM*)
- KPI** – Wskaźniki produkcyjne (ang. *Key Performance Indicators*)
- WIP** – produkcja w toku mierzona poziomem części w obszarze linii produkcyjnej (ang. *Work in Process*)
- WIP_{min}**, – funkcja celu wskaźnika produkcja w toku mierzona poziomem części w obszarze linii produkcyjnej – dąży do minimum,
- LT** – cykl produkcyjny (ang. *Lead Time*)
- LT_{min}** – funkcja celu wskaźnika cykl produkcyjny – dąży do minimum
- U** – wskaźnik Wykorzystanie (ang. *Utilization*)
- U_{max}**, – funkcja celu wskaźnika wykorzystanie maszyn – dąży do maksimum
- NC** – program sterujący obrabiarką sterowaną numerycznie (ang. *Numerical Control*)
- CNC** – obrabiarka sterowana numerycznie
- OEE** – wskaźnik całkowitej efektywności wyposażenia (ang. *Overall Equipment Effectiveness*)
- Efficiency (Eff)** – wskaźnik wydajności maszyn, linii lub całych systemów produkcyjnych
- Utilization (U)** – wskaźnik wykorzystania maszyn, linii lub całych systemów produkcyjnych
- Productivity (P)** – wskaźnik produktywności maszyn, linii lub całych systemów produkcyjnych
- Witness** – program komputerowy do modelowania linii ESP
- ADT** – przekładnia akcesoriów (ang. *Acessory Drive Train*)
- JFMX** – system komputerowy sterujący linią ESP
- SIPOC** – narzędzie do identyfikacji elementów procesu (ang. *Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers*)
- ERP** – system do kompleksowego zarządzania przedsiębiorstwem (ang. *Enterprise Resources Planning*)
- MES** – system realizacji produkcji (ang. *Manufacturing Executing System*)
- MCS** – system monitorujący pracę maszyn i urządzeń (ang. *Machine Control System*)

Streszczenie

Temat modelowania przepływu strumienia wartości produkcji części lotniczych na elastycznej linii produkcyjnej lub inaczej nazywanej elastycznym systemem produkcyjnym (ESP) z punktu widzenia zakładów produkcyjnych jest niezwykle ważny. Koszty związane z zakupem, instalacją i uruchomieniem są bardzo wysokie dlatego też firmy, które zdecydują się na linię ESP starają się od samego początku maksymalnie ją wykorzystać. Brak wiedzy i doświadczenia prowadzi do niezamierzonych strat związanych z nie wykorzystaniem całego potencjału, jaki jest w takim elastycznym systemie produkcyjnym. Umiejętne modelowanie przepływu produkcji w środowisku wirtualnym jest jednym ekonomicznie akceptowalnym sposobem na testowanie różnych ustawień parametrów wejściowych i kontroli parametrów wyjściowych. Testowanie takie nazywamy eksperymentem symulacyjnym. Eksperyment jest metodą badawczą polegającą na manipulowaniu zmiennymi w celu pomiaru ich efektów przy jednoczesnej kontroli innych zmiennych mogących wpłynąć na interpretację wyników [42]. Niniejsza praca jest swego rodzaju studium przypadku (ang. *case study*) linii ESP w firmie lotniczej. W pracy zaprezentowano proces tworzenia środowiska wirtualnego elastycznej linii produkcyjnej wraz z metodologią weryfikacji danych wejściowych i wyjściowych oraz walidacją modelu. Prace te poprzedzone były badaniami literaturowymi a następnie szczegółową analizą obszaru badawczego. Efektem pracy jest przedstawienie kompletnego wirtualnego modelu linii ESP zdolnego do przeprowadzania eksperymentów.

Dzięki przeprowadzonym eksperymentom oraz zastosowanym kryteriom wyboru w krótkim czasie zostały przetestowane zmienne wejściowe. Wyniki eksperymentów pozwoliły na wskazanie najkorzystniejszych opcji i jednoczesną rekomendację, który kierunek optymalizacji linii produkcyjnej wybrać. Przeprowadzanie eksperymentów symulacyjnych nie wymagało zatrzymywania linii produkcyjnej, a wszystko odbywało się w środowisku wirtualnym zbliżonym do rzeczywistego. Udowodniono, że model świetnie się nadaje jako narzędzie wspomagające proces decyzyjny w różnych obszarach zarządczych zakładu, takich jak planowanie produkcji na ESP (przepływ strumienia wartości mierzony wskaźnikiem *U*), czy finanse (przepływ strumienia wartości mierzony wskaźnikami *WIP* i *LT*). Pozyskana wiedza i doświadczenie podczas realizacji niniejszej pracy w przyszłości pozwoli na opracowanie kolejnych wirtualnych linii produkcyjnych w zakładzie.

Abstract

The topic of modelling the flow of the value of the production of aviation parts on a flexible production line or otherwise known as a flexible production system (ESP) is extremely important for the point of view of production plants. The costs associated with the purchase, installation and commissioning are very high, which is why companies that decide to use the ESP line try to use it to the maximum from the very beginning. Lack of knowledge and experience then leads to unintended losses related to not using the full potential of such a flexible production system. Skillful modelling of the production flow in a virtual environment is one way to test various input parameter settings and output parameter control. We call such testing an experiment. The experiment is a research method involving the manipulation of variables in order to measure their effects while controlling other variables that may affect the interpretation of the results (Korzyński M., 2013). This work is a kind of case study of ESP in an aviation company. The paper presents the process of creating a virtual environment of a flexible production line along with the methodology of input and output data verification and model validation. These works were preceded by literature research and then a detailed analysis of the research area. The result of the work is the presentation of a complete virtual model of the ESP line capable of carrying out experiments.

Thanks to the conducted experiments and the selection criteria used, the input variables were tested in a short time. The results of the experiments made it possible to select the most advantageous options and, at the same time, to recommend to the management board which direction to the best choose. At the same time, it did not require stopping the production line and everything took place in a virtual environment similar to the real one. It has been proven that the model is a great tool to support the decision-making process in various management areas of the plant, such as production planning (value stream flow measured by the *Utilization* indicator) or finance (value stream flow measured by *WIP* and *LT* indicators). The knowledge and experience gained during the implementation of this work in the future will allow for the development of further virtual production lines in the company.

Wstęp

Motywacją do napisania niniejszej pracy była realna potrzeba wynikająca z zakładu produkcyjnego polegająca na konieczności pozyskania narzędzia planistycznego do skutecznego modelowania przepływu produkcji części lotniczych na nowej elastycznej linii produkcyjnej. Zakład produkcyjny, o którym jest mowa to światowy lider w produkcji przekładni akcesoriów ADT (ang. *Accessory Drive Train*) zlokalizowany w południowo-wschodniej Polsce. Elastyczna linia produkcyjna będąca obiektem badań przeznaczona jest do produkcji części typu kadłuby i pokrywy będące komponentami przekładni ADT. Przewidywany znaczny wzrost produkcji wymagać będzie od Działu Planowania podjęcia szeregu trudnych decyzji związanych z zaplanowaniem i zrealizowaniem na czas dostaw do klienta. Jedną z niewiadomych, która uniemożliwiała prawidłowe planowanie produkcji na linii ESP było pozyskanie informacji o maksymalnym możliwym do osiągnięcia wykorzystaniu czasu pracy maszyn. Brak doświadczenia, wiedzy oraz wystarczających danych historycznych i narzędzi do ich odpowiedniej analizy w celu poprawnego oszacowania możliwości linii był inspiracją do podjęcia się zadania opracowania modelu przepływu strumienia wartości produkcji części lotniczych na elastycznej linii produkcyjnej.

W pierwszym etapie realizacji pracy badawczej pozyskano wiedzę z zakresu elastycznych systemów produkcyjnych. Poznanie możliwości linii ESP na przykładzie wielu publikacji naukowych pozwoliło na prawidłowe zdefiniowanie oczekiwań w stosunku do analizowanej linii produkcyjnej. W rozdziale pierwszym zostały przedstawione różne konfiguracje elastycznych systemów produkcyjnych. Skupiono się na przedstawieniu sposobów rozwiązywania problemów poprzez ciągłe doskonalenie. Jednym z narzędzi, które zaprezentowano na tym etapie pracy było mapowanie strumienia wartości. Pokazano jak ważna jest to metoda do analizy pracy linii. Dostępne statyczne i dynamiczne metody mapowania strumienia wartości mają na celu usprawnienie procesów i wyeliminowanie z nich marnotrawstwa. Następnie opisana została specyfika produkcji lotniczej, która swoimi licznymi ograniczeniami związanymi z przepisami lotniczymi jest często nieosiągalna dla wielu firm. W kolejnym kroku opisane zostały wskaźniki funkcjonowania linii produkcyjnej. Monitorowanie procesu produkcyjnego jest koniecznym elementem współczesnego przedsiębiorstwa. Szereg dostępnych wskaźników i metod pozyskiwania danych sprawia, że często trudno jest wybrać ten właściwy zestaw wskaźników odpowiadający na wszystkie pytania o prawidłowy przebieg procesu.

W drugim rozdziale przedstawiono tezę, cele, zakres i metodykę prowadzenia pracy badawczej. Opracowana teza ściśle nawiązuje do tematu niniejszej pracy i celu, jaki ma zostać osiągnięty. Żeby to zrealizować postawiony został **cel badawczy** w postaci przeprowadzenia symulacji funkcjonowania linii produkcyjnej w celu zoptymalizowania pracy linii ESP. Aby osiągnąć cel główny zostało zdefiniowane dziewięć celów częściowych, które są swego rodzaju mapą drogową dla realizacji pracy. Następnie określony został zakres pracy i opisana ogólna metodyka pracy badawczej. Metodyka została podzielona na sześć zadań szczegółowych. Realizacja każdego z zadań przybliży do osiągnięcia celów szczegółowych, a co za tym idzie celu głównego pracy.

W rozdziale trzecim przedstawiono wyniki przeglądu aktualnego stanu wiedzy. Za metodę badawczą wybrano systematyczny przegląd literatury. Jego celem jest identyfikacja i ocena badań dotyczących wybranej tematyki na podstawie zdefiniowanych kryteriów. Z punktu widzenia pracy badawczej, badania literaturowe są podstawowym jej elementem i mają zapewnić trzy podstawowe korzyści [19]:

- przegląd literatury uwzględni wszystkie wyniki badań danego zagadnienia,
- nie zostaną pominięte żadne wyniki badań,
- opracowane reguły zweryfikują trafność przeglądu poprzez możliwość jego powtórzenia w celu weryfikacji.

Wyniki i wnioski z przeprowadzonego systematycznego przeglądu literatury jasno wskazują, że tematyka związana z matematycznymi modelami w zastosowaniu do mapowania strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych nie jest szeroko omawiana w literaturze. Pozwoliło to na otwarcie możliwości w postaci przeprowadzenia badań w obszarze nieopisanym dostatecznie dotąd w literaturze. W kolejnym kroku dokonano wyboru metody modelowania przepływu strumienia wartości. Po przeanalizowaniu dostępnych metod oraz rekomendacji Grupy, do której niniejsza firma należy wybrana została metoda symulacji dyskretnej w programie komputerowym Witness firmy Lanner Group Ltd.

W rozdziale czwartym zaprezentowany został obiekt badań oraz wyroby, jakie są produkowane na linii ESP. Przedstawiony został proces produkcyjny części lotniczych, gospodarka narzędziami obróbczymi, proces pozyskiwania danych oraz wskaźniki, jakie są stosowane do oceny pracy linii. Wszystkie te dane zostały użyte do analizy stanu obecnego i danych historycznych podczas opracowywania wirtualnego modelu linii ESP.

W następnym rozdziale zaprezentowany został problem badawczy występujący na linii produkcyjnej. Jest on ściśle powiązany z tezą pracy oraz celem głównym i celami cząstkowymi. Zrealizowanie ich pozwoli na rozwiązanie problemów związanych z brakiem prawidłowej optymalizacji pracy linii ESP.

W rozdziale szóstym opisany został etap przygotowania do badań. Zostały opracowane narzędzia do pozyskiwania danych oraz przedstawione zostały dostępne raporty z linii ESP. Następnie dane historyczne zostały poddane analizie. W tym celu użyte zostały narzędzia statystyczne. Analizy statystyczne zostały przeprowadzone w programie Minitab. Po przeprowadzeniu testów normalności rozkładu dla zarejestrowanych czasów rzeczywistych poszczególnych operacji i ocenie tych testów pod kątem użycia ich do parametryzacji wirtualnego środowiska linii ESP przystąpiono do opracowania modelu. Poświęcony został na to rozdział siódmy.

Opracowanie modelu rozpoczęto od zdefiniowania założeń. Następnie zidentyfikowane zostały parametry wejściowe i wyjściowe dla modelu. W kolejnym kroku opisany został sam model oraz poszczególne etapy jego tworzenia. Ważnym elementem było dokładne zweryfikowanie ewentualnych błędów podczas opracowania modelu, które mogłyby uniemożliwić prawidłowe jego działanie. Na końcu została przeprowadzona walidacja modelu. Odbyło się to z wykorzystaniem danych rzeczywistych i danych z symulacji. Porównane zostały dane wyjściowe pod kątem występowania korelacji wskaźników *WIP* i *LT*. Do badania korelacji wybrano metodę Pearsona. W wyniku analizy przeprowadzonej w programie statystycznym Minitab stwierdzono bardzo silny stopień współzależności danych rzeczywistych i z symulacji. Dodatkowo przeprowadzono 2 sample T-Test dla obu zestawów wskaźników *WIP* i *LT*. Test miał na celu potwierdzenie hipotezy zerowej (H_0) czy nie ma istotnej różnicy pomiędzy danymi rzeczywistymi, a danymi pochodzącymi z symulacji. Wynik potwierdził przyjęcie hipotezy zerowej świadczącej o tym, że nie ma istotnej różnicy pomiędzy danymi rzeczywistymi i danymi pochodzącymi z symulacji [71].

W przedostatnim rozdziale opisany został plan oraz wyniki przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych. W tym celu opracowano założenia do przeprowadzenia eksperymentów, które były podstawą do przygotowania planu. Cel zakładał przeprowadzenie szeregu symulacji, aby umożliwić optymalną organizację pracy linii. Zostało zdefiniowanych i wykonanych 21 eksperymentów, które dały odpowiedź na postawiony cel i pozwoliły rozwiązać problem występujący na linii ESP. W ostatnim kroku niniejszej pracy omówione

zostały wyniki eksperymentów i wskazane rekomendacje do optymalnego sparametryzowania linii ESP.

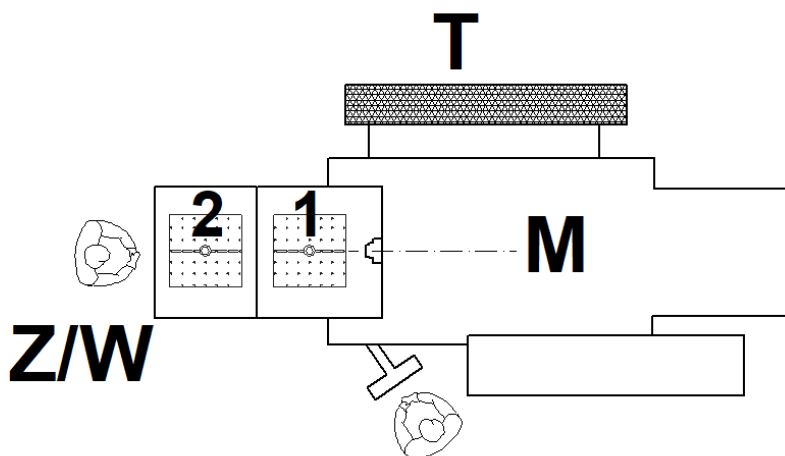
1. Wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy

1.1. Elastyczne systemy produkcyjne

Elastyczny system produkcyjny (ESP) (ang. *Flexible Manufacturing System - FMS*) to system, w którym zastosowano środki elastycznej automatyzacji produkcji charakteryzujące się dużą wszechstronnością i łatwością przeobrażania tak, aby szybko dostosowywać się do zmian rodzaju i liczby wytwarzanych produktów [13]. Maszyny i systemy komputerowe można konfigurować do wytwarzania różnorodnych części i obsługi zmieniającej się wielkości produkcji.

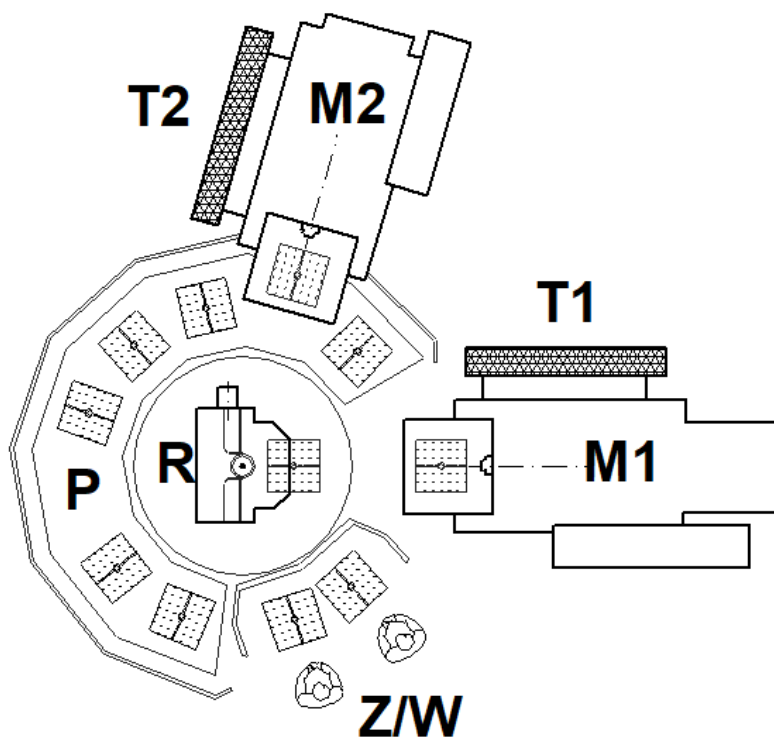
Zastosowanie elastycznego systemu produkcji umożliwia osiągnięcie wysokiej wydajności, a tym samym uzyskanie niskich kosztów produkcji. W pracy [12] przedstawiono poprawę wydajności poprzez wydłużenie efektywnego czasu pracy maszyn oraz skrócenie terminu realizacji zamówień w firmie Erowa, dzięki wdrożeniu ESP. Innym przykładem poprawy wydajności poprzez zastosowanie ESP jest zakład produkujący elementy z komponentów odlewanych [53]. W porównaniu do konwencjonalnej metody czas obróbki został skrócony 20 krotnie z 73 godzin do 3,8 godziny. Elastyczna produkcja może być również kluczowym elementem strategii produkcji na zamówienie, która pozwala dostosować produkty do wymagań klientów [78]. Najczęściej elastyczne systemy produkcyjne zbudowane są w formie gniazd produkcyjnych będących zespołem stanowisk pracy w kolejności operacji technologicznych [49]. Samo rozmieszczenie komponentów linii ESP, tzw. layout, może przybierać różny kształt, który jest determinowany liczbą urządzeń w systemie, przeznaczeniem, specyfiką produkowanych części czy ilością miejsca na hali produkcyjnej. Można wyróżnić następujące konfiguracje elastycznych systemów produkcyjnych [13]:

- Elastyczny moduł produkcyjny, jako pojedyncza obrabiarka (M) wyposażona w system wymiany narzędzi (T), strefę załadunku i rozładunku materiału (Z/W) oraz strefę obróbki (1) (Rys. 1.1). Podział na dwie niezależne strefy obróbki i załadunku/rozładunku sprawia, że moduł możemy nazwać elastycznym. Zarówno przebrojenie na produkcję innej części jak i wymiana komponentu na półfabrykat i wyrób gotowy podczas realizacji zlecenia produkcyjnego może odbyć się bez konieczności zatrzymania pracy maszyny.



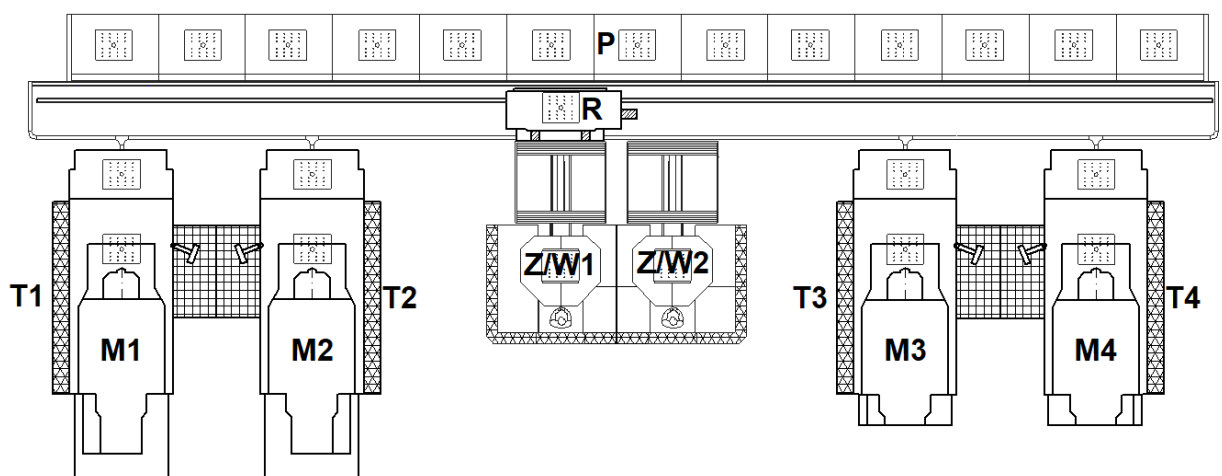
Rysunek 1.1. Elastyczny moduł produkcyjny;
Źródło: opracowanie własne

- Elastyczne gniazdo produkcyjne, składające się z kilku maszyn (M1 i M2) wyposażone w magazyny narzędzi (T1 i T2), magazyn palet (P), strefę załadowczo wyładowczą (Z/W) i robota (R), powiązanych typem wyrobu lub procesu technologicznego (Rys. 1.2),



Rysunek 1.2. Elastyczne gniazdo produkcyjne;
Źródło: opracowanie własne

- Elastyczna linia produkcyjna, wyposażona w zbiór specjalistycznych maszyn (M1 – M4) rozmieszczonych w określonym porządku, gdzie dana operacja może być wykonana na każdej maszynie. Każda z maszyn wyposażona jest w magazyn narzędzi (T1 – T4). Dzięki magazynowi palet (P) i robotowi (R) charakteryzuje się dużą zdolnością do częstych i szybkich przebrożeń, a przepływ materiału zapewniają stanowiska załadowczo-wyładowcze (ZW1, ZW2). Odbywa się to ściśle według określonego harmonogramu i ma charakter wielokierunkowy charakteryzujący się możliwością wielokrotnego wejścia i wyjścia z i na linię ESP (Rys. 1.3).



Rysunek 1.3. Elastyczna linia produkcyjna ESP;
Źródło: opracowanie własne

Można spotkać bardzo rozbudowane systemy produkcyjne składające się z kilkudziesięciu urządzeń, jak i proste, gdzie jest ich kilka. Niezależnie od stopnia złożoności systemu, żeby nazwać go elastycznym systemem produkcyjnym, muszą być spełnione następujące warunki [55]:

- Na linii produkcyjnej powinny być produkowane co najmniej dwie różne części – zalety systemu ESP mogą być skutecznie wykorzystywane w produkcji wielu różnych części.
- Koszt jednostkowy produkcji jest taki sam niezależnie od wielkości produkcji.
- Istnieje zrobotyzowany system automatycznego załadunku i rozładunku przestrzeni roboczej maszyn w linii produkcyjnej.
- Istnieje automatyczny magazyn półfabrykatów i wyrobów gotowych, jako element składowy systemu ESP.

- Istnieje wydzielone miejsce załadowczo-wyładowcze w celu napełniania i rozładunku linii.
- Istnieje automatyczny magazyn narzędzi obróbczych.

Koncepcja elastycznej produkcji została opracowana przez Jerome'a H. Lemelona, amerykańskiego inżyniera i wynalazcę, który na początku lat pięćdziesiątych złożył szereg powiązanych patentów. Jego pierwotnym projektem był system oparty na robotach, który mógł spawać, nitować, przenosić i sprawdzać wyprodukowane wyroby. Systemy oparte na wynalazkach Lemelona zadebiutowały na halach fabrycznych w Stanach Zjednoczonych i Europie pod koniec lat sześćdziesiątych i rozpowszechniły się w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku [15].

Rozwój technologiczny na świecie swoją skalą zmusza producentów i firmy do ciągłego wdrażania innowacyjnych rozwiązań w swoich liniach produkcyjnych. Wykonywana na nich praca musi być szybka i wydajna przy zachowaniu wymaganej jakości. Potencjał pracowniczy i produkcyjny musi być wykorzystywany w pełni, aby utrzymać się na wymagającym konkurencyjnym rynku. Obecnie elastyczne systemy produkcyjne są powszechnie stosowane w przemyśle. W wielu jego gałęziach używane od lat zapewniają wysoką produktywność. Możliwość ciągłej pracy przy zmieniającym się asortymencie części zapewnia zredukowanie do zera czasu przygotowawczo-zakończeniowego (ang. *setup time*). Elastyczność linii może być ograniczona ilością miejsca na narzędzia niezbędne w procesie produkcji lub ilością miejsca w magazynie palet. Ograniczeniem może również być określona maszyna w linii ESP a nawet cała linia. Zawsze w takich przypadkach należy sięgnąć do teorii ograniczeń Goldratta [26]. Głównym założeniem zaproponowanym przez teorię ograniczeń w tym przypadku jest badanie wpływu wyboru konkretnych wariantów decyzyjnych na funkcjonowanie linii ESP [77]. Fakt istnienia ograniczeń, czyli czynników uniemożliwiających maksymalizowanie wydajności linii wymusza zastosowanie konkretnych narzędzi pozwalających na poprawę produktywności. Ten system został przez Goldratta nazwany „five steps of focusing” i odnosi się do pięciu kroków poprawy produktywności [26].

Pierwszym krokiem jest zidentyfikowanie ograniczenia systemu tzw. wąskiego gardła. Podstawą znalezienia rozwiązania jest zdefiniowanie problemu co oznacza, że analizę linii ESP należy rozpocząć od identyfikacji i opisanie ograniczeń.

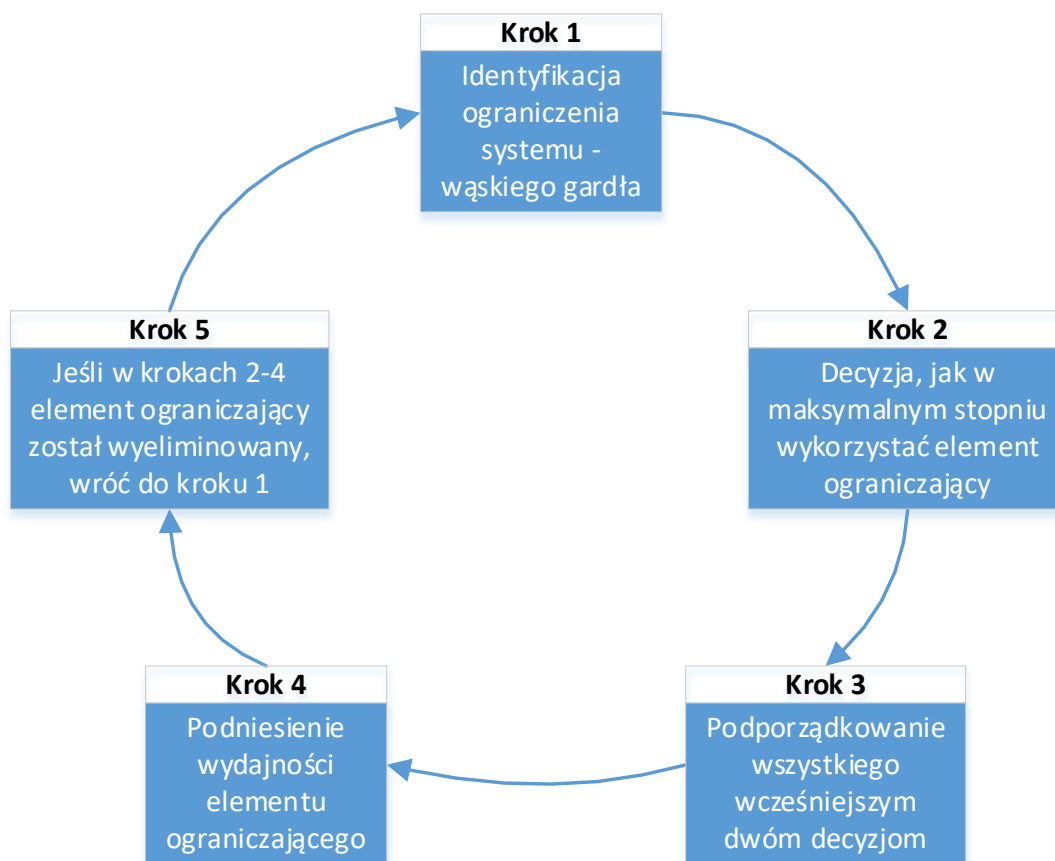
Krok drugi to decyzja, jak wyeksploatować ograniczenie. W celu poprawy produktywności linii konieczne jest podjęcie działań, które pozwolą poprawić wydajność

elementu ograniczającego, przykładowo poprawić wydajność najmniej wydajnego elementu linii (magazynu narzędzi, magazynu palet pojedynczej maszyny, robota czy też całej linii) poprzez skrócenie czasu przebrojeń, bądź niedopuszczanie do występowania przestoju.

Trzecim krokiem jest podporządkowanie wszystkiego wcześniejszym dwóm decyzjom. Z chwilą, kiedy określona została maksymalna wydajność elementu ograniczającego należy dostosować cały proces produkcyjny do tej właśnie wydajności. Szczególnie maszyny znajdujące się przed wąskim gardłem nie powinny produkować więcej niż element ograniczający jest w stanie przetworzyć, ponieważ będzie to powodowało stałe powiększanie się zapasów. Oczywiście należy przewidzieć odpowiedni bufor bezpieczeństwa, aby awaria maszyny pracującej przed elementem ograniczającym nie doprowadziła do zatrzymania produkcji na gnieździe będącym wąskim gardłem.

Krok czwarty określony został jako podniesienie wydajności elementu ograniczającego. Wąskie gardło ogranicza wydajność całego systemu produkcyjnego i uwzględniane jest w aspekcie całego systemu, pod kątem powiązań pomiędzy stacjami roboczymi [13]. Dopiero po ustawieniu czasu cyklu produkcyjnego zgodnie z wydajnością wąskiego gardła można rozważać jego likwidację. Może to polegać na kolejnej zmianie produkcyjnej w gnieździe, które jest ograniczeniem lub inwestycji w kolejne urządzenie niezbędne do przeprowadzenia procesu w tym gnieździe.

Krok piąty brzmi – jeśli w krokach 2-4 element ograniczający został wyeliminowany, wróć do kroku 1 i nie pozwól, by ograniczeniem stała się bierność. Bardzo istotnym elementem Teorii Ograniczeń jest ciągłość procesu doskonalenia przedsiębiorstwa nazwana przez Goldratta „process of ongoing improvement”. Zidentyfikowanie elementu ograniczającego umożliwia ustalenie struktury produkcji pozwalającej na zmaksymalizowanie produktywności. Rysunek 1.4 prezentuje w sposób graficzny przebieg procesu poprawy produktywności.



Rysunek 1.4. Etapy poprawy produktywności według Goldratta nazywane „five steps of focusing”;
Źródło: opracowanie własne na podstawie [27]

Można zauważyć szereg korzyści z zastosowania ESP, ale również istnieje wiele niedogodności. Główną korzyścią jest zwiększenie wydajności produkcji poprzez maksymalizację wykorzystania czasu pracy maszyn. Czas przestoju jest skrócony do minimum, ponieważ linia produkcyjna nie musi być wyłączana, aby przygotować ją do produkcji innego typu wyrobu. Przebrojenie maszyn pracujących w linii ESP wykonywane jest w trakcie realizacji produkcji i wiąże się jedynie ze wskazaniem kolejnego programu sterującego oraz wcześniejszym załadunkiem w stacji załadowczo/wyładowczej półfabrykatu kolejnej części przewidzianej do produkcji. Program sterujący może być automatycznie transferowany do systemu sterującego ESP, na podstawie informacji przesłanej z systemu planowania produkcji. W magazynie półfabrykatów może oczekiwać do produkcji jednocześnie wiele różnych części, a jednym ograniczeniem jest pojemność magazynu palet [70].

Do wad zaliczyć można wysokie koszty początkowe uruchomienia elastycznego systemu produkcyjnego. Składa się na to nie tylko wysoki koszt urządzeń i systemów komputerowych, ale również koszty pracy związanej z programowaniem pracy linii ESP, na której będą

wykonywane różnego rodzaju wyroby. Programy obróbcze muszą być tak opracowane, żeby zapewnić wysoką jakość produkowanych części przy jednoczesnym ograniczeniu do minimum obsługi maszyn przez operatorów. Istnieją również koszty związane z potrzebą zatrudnienia wyspecjalizowanych inżynierów i techników do obsługi, monitorowania i konserwacji linii ESP [70].

1.2. Statyczne i dynamiczne mapowanie strumienia wartości (MSW)

Mapowanie strumienia wartości (ang. *Value Stream Mapping* – VSM) jest jedną z metod umożliwiających dokonanie analizy procesów pod kątem występującego w nich marnotrawstwa. Metoda ta wywodzi się z praktyk koncernu Toyota, gdzie określana jest mapowaniem przepływu materiałów i informacji [54].

Naturalnym dążeniem przedsiębiorstw produkcyjnych jest chęć usprawnienia procesów wytwórczych i eliminacja występującego w nich marnotrawstwa. Polega to na określeniu przepływów informacyjnych, materiałowych oraz elementów fizycznych w obszarze produkcji przedsiębiorstwa, co pozwala na identyfikację i zrozumienie całego procesu produkcyjnego. Usprawnienia stanowią nieodłączny element *Lean Manufacturing* [45].

Prekursorem *Lean Management* był Taiichi Ohno, który do podstawowych źródeł marnotrawstwa zaliczył występujące w przemyśle nieproduktywne straty. Należą do nich [54]:

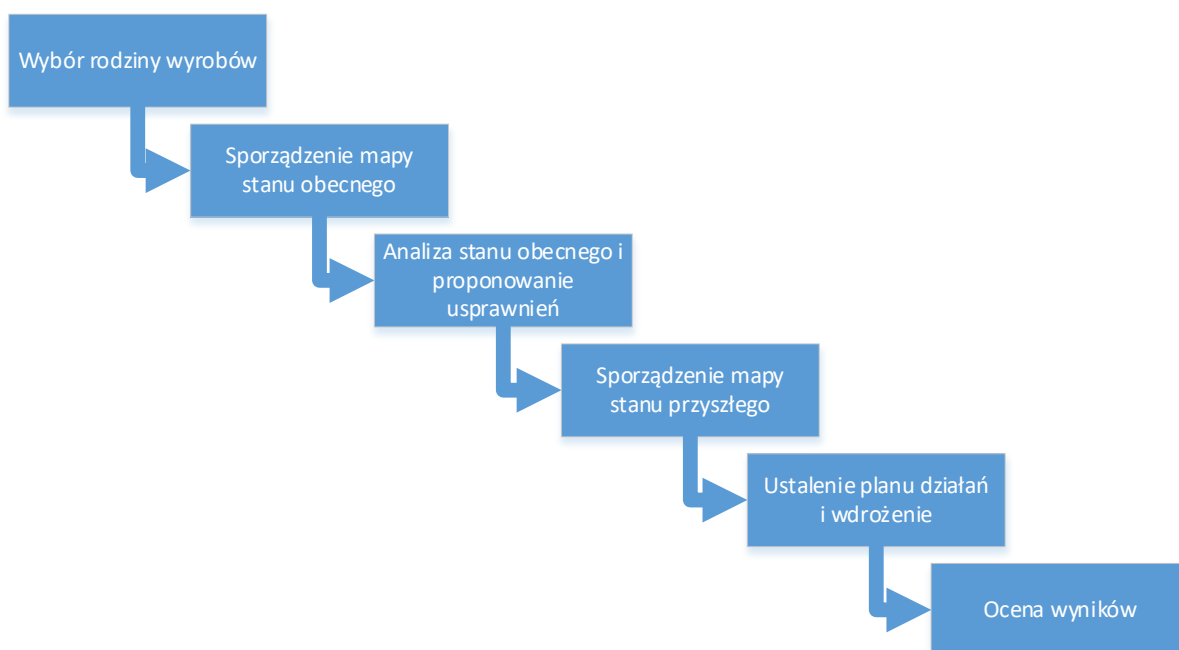
- produkcja bez zamówień klienta, powodująca wzrost zapasów wyrobów gotowych,
- oczekiwanie ludzi/maszyn na opóźnione dostawy materiału lub następne kroki w procesie,
- niepotrzebny transport produktów pomiędzy obszarami produkcyjnymi,
- zbyt długie czasy wykonania operacji ze względu na źle zaprojektowany proces technologiczny,
- za duże zapasy materiałów zarówno w magazynach, jak i produkcji w toku,
- bezproduktywne przemieszczanie się ludzi podczas pracy w poszukiwaniu części, oprzyrządowania, narzędzi, instrukcji itp.,
- braki lub niezgodności w wyrobach, które wymagają naprawy, bądź korekty procesu.

Na podstawie zsumowania czynności dodających wartość i porównania ich z sumą czasów czynności uznanych za marnotrawstwo można wyznaczyć poziom efektywności operacyjnej całego systemu produkcyjnego. W tradycyjnej fabryce tylko 15 do 20% procesów (etapów produkcji) przyczynia się do powiększania wartości dodanej [40]. Zwykle w ciągu

niespełna 0,2% czasu, jaki materiał spędza w zakładzie produkcyjnym, od momentu pojawienia się w magazynie do momentu zakończenia procesu produktu jest dodawana wartość [40].

Mapowanie strumienia wartości (MSW) służy do wizualizacji przepływu w postaci diagramu. W ten sposób łatwo można zidentyfikować czynności nietworzące wartości. Jest skuteczną metodą niewymagającą ponoszenia kosztów na specjalistyczne oprogramowanie komputerowe do analiz ani specjalnego sprzętu, czy określonych kwalifikacji personelu [6]. MSW jest zapisem kroków, jakie podejmowane są podczas procesu produkcyjnego konkretnego wyrobu, zwizualizowanych w postaci mapy strumienia wartości. Analiza poszczególnych faz procesu produkcyjnego obejmuje moment od pozyskania danego surowca do finalizacji produkcji i otrzymania gotowego produktu.

Mapowanie strumienia wartości składa się z kilku etapów, które zostały zaprezentowane w sposób graficzny na rysunku 1.5 [76].

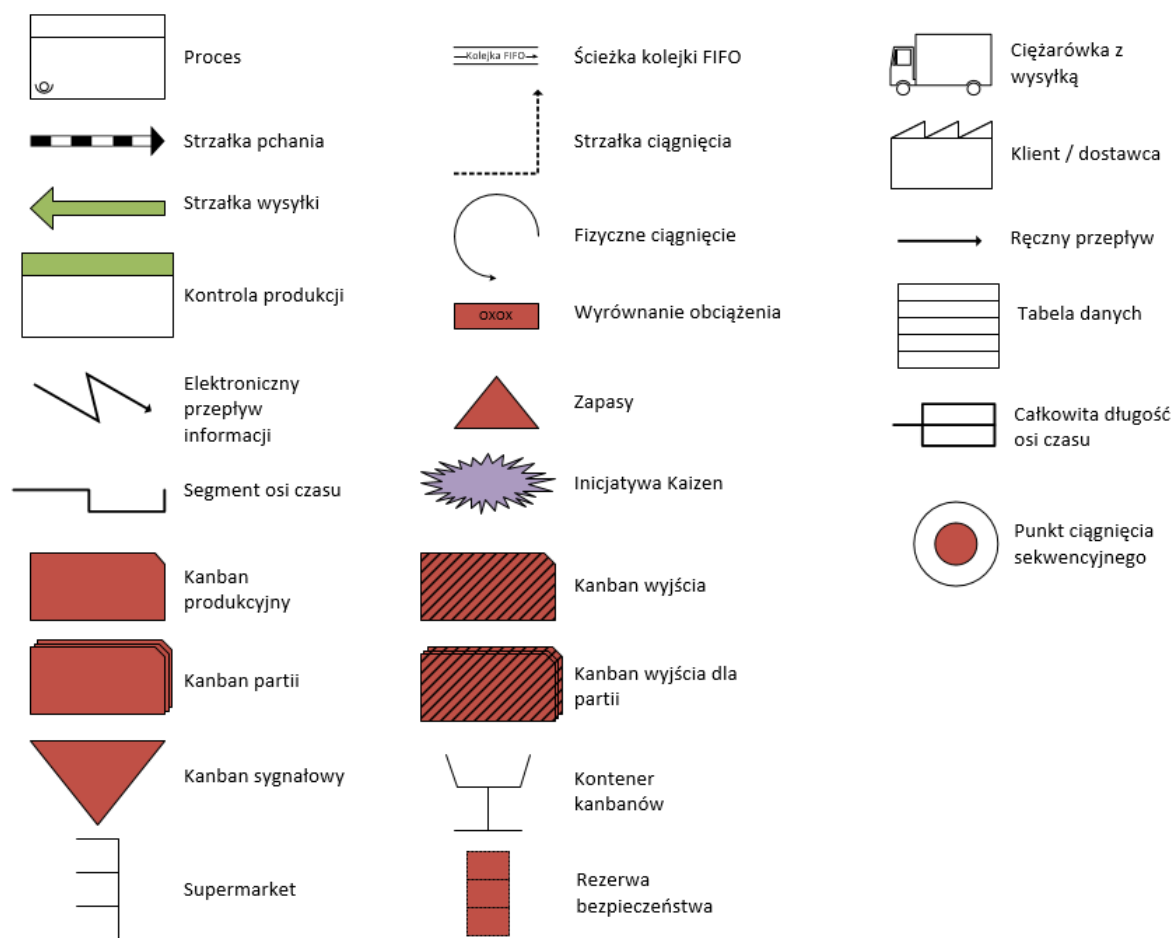


Rysunek 1.5. Schemat postępowania w trakcie mapowania strumienia wartości;
Źródło: opracowanie własne

Wartość tej metody polega nie tylko na skróceniu czasu przejścia produktu przez cały proces, zwiększeniu zdolności reakcji firmy na potrzeby klienta, ale przede wszystkim, na spojrzeniu na całość procesu z perspektywy ostatecznego odbiorcy, co pozwala ujawnić, które z działań dodają wartość do produktu końcowego, a które są zbędne i ich doskonalenie nie

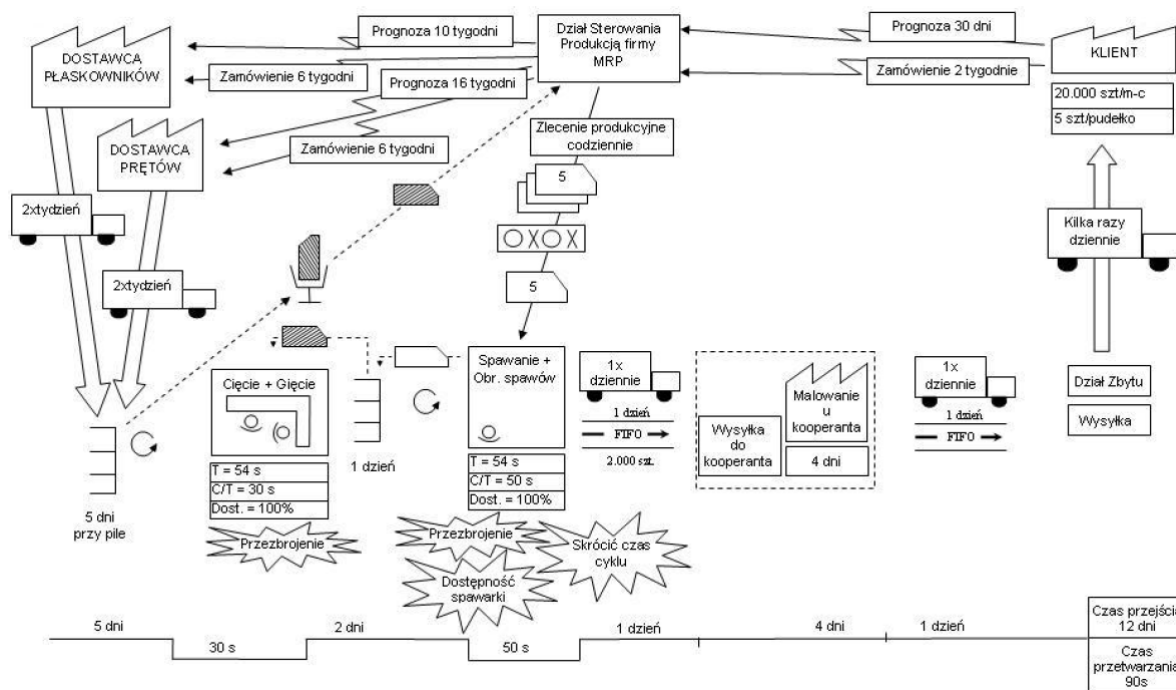
przyniesie pożądaných rezultatów. Istotne jest zarówno to, w jaki sposób materiał przemierza proces produkcji, ale także jak przepływają informacje. Metoda mapowania ujawnia takie problemy, jak okresy oczekiwania, czy przebrożenia, które wydłużają proces produkcji. Wskazanie tych okresów i wykrycie ich przyczyn, które mogą mieć źródło np. w nieefektywnym planowaniu, czy zaburzonym przepływie informacji między produkcją, a magazynem, jest pierwszym krokiem do optymalizacji procesu. Istotną wartością MSW jest także całościowe spojrzenie na proces produkcji nie tylko jednego produktu, ale także rodzin produktów powiązanych ze sobą pod względem technologicznym (np. poprzez wykonywanie na tych samych maszynach). Umożliwia to planowanie produkcji w szerszej perspektywie.

W celu poprawnego przeprowadzenia MSW używa się wystandaryzowanych symboli, dzięki czemu proces można przedstawić w przejrzysty i zrozumiały sposób. Wybrane z symboli zaprezentowano na rysunku 1.6 [76].



Rysunek 1.6. Symbole graficzne do budowy mapy przepływu strumienia wartości;
Źródło: opracowanie własne w programie Visio

Rysunek 1.7 przedstawia przykład mapy strumienia wartości dla stanu przyszłego procesu wytwarzania mieszadeł. Mapa pokazuje możliwości, jakie daje metoda MSW w procesie ciągłego doskonalenia [6].



Rysunek 1.7. Mapa przepływu strumienia wartości w produkcji mieszadeł – stan przyszły;
Źródło: Antosz K. Stadnicka D., [6]

Jak każda metoda ciągłego doskonalenia tak i MSW ma swoje ograniczenia. Jest niezwykle skutecznym narzędziem w sytuacji analizowania prostych systemów dla wybranego produktu lub rodziny produktów o tej samej technologii. Ma jednak skłonność do traktowania procesu jako samodzielnego etapu w systemie. W sytuacji, gdy przez stanowiska produkcyjne przepływa większa liczba części różnego typu o złożonym procesie produkcyjnym to MSW, jako migawka stanu obecnego, nie pozwala przewidzieć, jak sytuacja będzie się zmieniać w przyszłości. Można zatem powiedzieć, że mapa strumienia wartości przedstawiana w formie diagramu jest mapą statyczną.

Alternatywą dla metody statycznej jest symulacja. Największą zaletą symulacji jest możliwość sprawdzenia skutków danego usprawnienia jeszcze przed jego wdrożeniem. Analiza różnych rozwiązań pozwala na wybór tego optymalnego, w krótkim okresie czasu. Do symulacji wykorzystywane są dane historyczne, jednak dzięki zastosowaniu metod

statystycznych i zapisaniu charakterystyk pracy maszyn i urządzeń w postaci języka matematycznego, możliwe jest symulowanie przyszłości z bardzo dużym przybliżeniem [41]. Tym samym analizowany problem sprowadzany jest do postaci ogólnej, a jego rozwiązanie uwzględnia również interakcje pomiędzy pozostałymi elementami systemu, a nie jedynie jego wybrany wycinek. Połączenie logiki metod szczupłej produkcji i siły analizy narzędzi symulacyjnych wydaje się być więc rozwiązaniem lepszym z punktu widzenia rozwiązywania problemów produkcyjnych [24]. Filozofia *Lean* proponuje gotowe sposoby analizy i usprawniania procesów wytwórczych, natomiast symulacja rozszerza funkcjonalność metod i narzędzi lean poprzez dodanie do analizy elementu losowości i poszukiwania optimum w ujęciu globalnym [37].

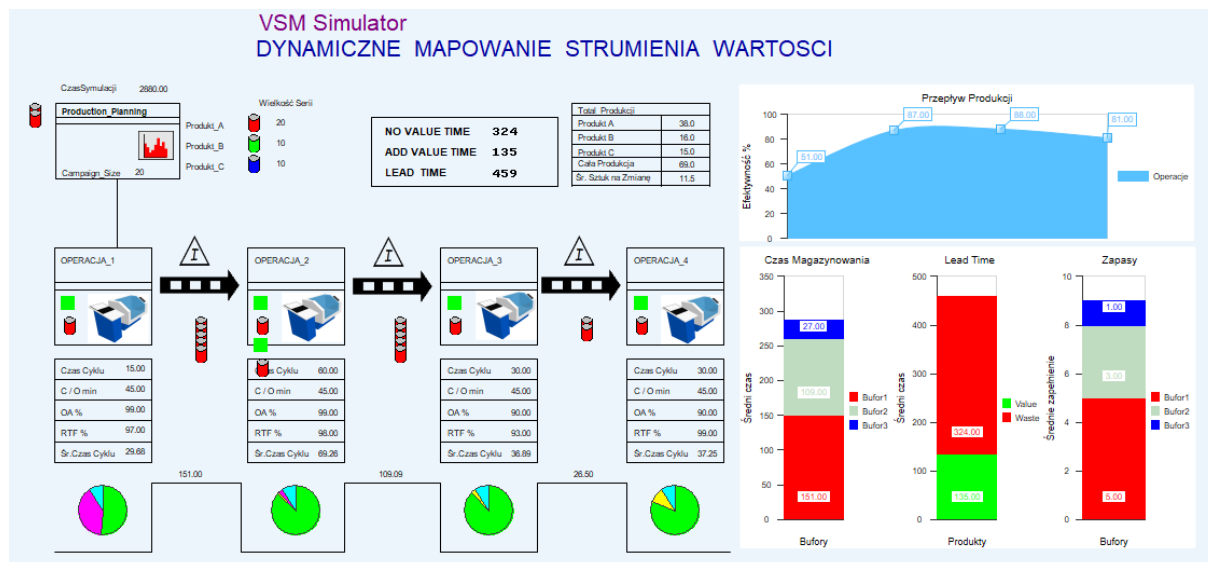
W przemyśle stosowane są różne programy komputerowe do symulacji pracy linii produkcyjnej, takie jak:

- Enterprise Dynamics,
- ExtendSim,
- DELMIA,
- FlexSim,
- GoldSim,
- Micro Saint Sharp,
- Simcad Pro,
- SimEvents,
- Witness.

W niniejszej pracy do zastosowania symulacji mapowania strumienia wartości został wybrany program Witness firmy Lanner Group Ltd. Wybór programu Witness nie jest przypadkowy. Witness został zastosowany, ponieważ został on wybrany, jako narzędzie do symulacji przez całą Grupę, do której należy przedsiębiorstwo, w którym funkcjonuje analizowana linia produkcyjna. Wprowadzana transformacja cyfrowa w ramach programu Manufacturing 4.0 ma na celu między innymi ujednolicenie stosowania programów wspomagających procesy produkcyjne we wszystkich zakładach w Grupie.

Zastosowanie programu jest bardzo szerokie. Różne organizacje biznesowe mogą modelować, analizować i optymalizować procesy, w celu podejmowania trudnych decyzji biznesowych minimalizując ryzyko błędnych decyzji. Symulacje przeprowadzane w programie Witness prowadzą do poprawy efektywności, produktywności i redukcji kosztów. Rysunek 1.8

przedstawia przykład symulacji strumienia wartości opracowany w programie Witness (Materiały szkoleniowe firmy Lanner Group Ltd).



Rysunek 1.8. Symulacja przepływu strumienia wartości opracowana w programie Witness;
Źródło: materiały szkoleniowe firmy Lanner Group Ltd

Przedstawiony przykład dynamicznego mapowania strumienia wartości pokazuje możliwości, jakie daje symulacja. Obserwacja procesu w zadanym przedziale czasu umożliwia lepsze zrozumienie występujących zależności zachodzących pomiędzy badanymi elementami. Graficzny monitoring wskaźników procesu umożliwia w trybie dynamicznego mapowania strumienia wartości na szybką i trafną ocenę parametrów wyjściowych.

W tabeli 1.1 przedstawiono porównanie omówionych dwóch metod mapowania strumienia wartości – statycznej i dynamicznej (symulacji). Pomijając możliwości obu metod, to różnica pomiędzy nimi zawiera się w kosztach jakie trzeba ponieść w przypadku zastosowania symulacji.

Tabela 1.1. Porównanie własności metody statycznej i symulacji;
Źródło: opracowanie własne na podstawie Solding, P., Gullander, P. [68]

	Mapowanie strumienia wartości	Symulacja
Narzędzie	statyczne	dynamiczne
Wymagania	kartka papieru, ołówek, wystandaryzowane symbole	komputer, oprogramowanie do symulacji
Zastosowanie	produkt, rodzina produktów technologicznie podobnych	wszystkie produkty
Zakres	migawka stanu obecnego	symulacja w czasie rzeczywistym skutków decyzji podejmowanych w czasie
Koszty	niskie koszty, wymagana podstawowa wiedza z zakresu MSW	wysokie koszty specjalistycznego oprogramowania
Szkolenie pracowników	niskie koszty szkolenia pracowników	wysokie koszty szkoleń, specjalistyczna wiedza

Połączenie mapy strumienia wartości i symulacji pozwala na całościową analizę systemów produkcyjnych. Szczególnie jest to przydatne w skomplikowanych układach, do których należą elastyczne systemy produkcyjne. Odwzorowanie wszystkich możliwych interakcji występujących pomiędzy elementami ESP stosując tylko metodę statyczną jest wręcz niemożliwe. Połączenie obu metod (stacyjnej i dynamicznej) umożliwia kompleksową analizę całych systemów przy jednoczesnym zachowaniu przejrzystości i łatwości interpretacji uzyskanych wyników. Łączenie metod eliminuje słabości obu technik stosowanych osobno, przy jednoczesnym zachowaniu ich mocnych stron [37].

Mapowanie strumienia wartości jako metoda ciągłego doskonalenia znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach. Najczęściej używana jest w procesach produkcyjnych jednak zakres jej stosowania jest dużo szerszy. Wszędzie tam, gdzie występuje proces decyzyjny jest możliwość użycia mapowania strumienia wartości w procesie ciągłego doskonalenia. Zastosowanie MSW jest szeroko omawiane w literaturze [20, 65, 67]. Zestawienie zastosowania MSW w przykładowych branżach wraz z korzyściami, jakie przyniosło MSW przedstawiono w tabeli 1.2.

Tabela 1.2. Przykładowe branże gdzie zastosowano MSW jako narzędzie ciągłego doskonalenia do usprawnienia procesu;

Źródło: opracowanie własne

Branża	Tytuł publikacji	Autor / rok	Problem do rozwiązania	Korzyści z wdrożenia MSW
Usługi	Mapowanie strumienia wartości w procesie obsługi klienta w przedsiębiorstwie usługowym	Kowalik K. Klimecka-Tatar D. 2017 [43]	Długi czas obsługi klienta przy kasie w kinie	Skrócony czas o 8 sekund z 85s do 77s.
Transport	Mapowanie strumienia wartości jako narzędzie diagnozy procesów zarządzania miejską infrastrukturą transportową	Bylinko L. 2015 [14]	Problemy związane z zarządzaniem infrastrukturą transportową w transporcie miejskim	Diagnoza procesów związanych z zarządzaniem infrastrukturą transportową w mieście.
Szkolnictwo wyższe	Mapowanie Strumienia Wartości w procesie kształcenia w szkole wyższej – wyzwania teorii i praktyki	Maciąg J. 2016 [46]	Zbyt długi czas dyplomowania studentów	Usprawnienie procesu dyplomowania studenta przez automatyzację wybranych działań
Handel	Usprawnienie procesu gospodarczego metodą mapowania – studium przypadku	Bagińska M. 2018 [7]	Wielowymiarowy problem czasu, jaki mijał od momentu odebrania gotówki od klienta do momentu wpływu należności na konto bankowe.	Uproszczone struktury całego procesu i ujednociono dla wszystkich pracowników przejście danej czynności przez proces – czas rozliczenia i wpłaty gotówki do banku skrócono z 126 do 5 godzin tygodniowo na pracownika
Administracja	Wykorzystanie metod teorii masowej obsługi i „lean management” w usprawnianiu procesów w zarządzaniu organizacją publiczną	Nogalski B. Czerska J. Klimek A 2010 [52]	Wysokie koszty klienta, które wraz z kosztami obsługi składają się na wysoki koszt całkowity, przy niskim poziomie jakości obsługi	Wprowadzone usprawnienia uwolniły zasoby, które odpowiednio wykorzystane umożliwiają podniesienie jakości obsługi. W efekcie koszty obsługi pozostają praktycznie na niezmiennym poziomie, natomiast koszty klienta w znaczący sposób zostały obniżone.
Bankowość	Koncepcja Lean Management w sektorze bankowym	Grobelak M. Ulewicz R. 2018 [28]	Eliminacja marnotrawstwa czasu w procesie reklamacyjnym klienta	Skrócony czas poświęcony na obsługę reklamacji klienta - przed wdrożeniem czas obsługi wynosił 3 dni, po wdrożeniu 1 dzień, co daje redukcję o 67%.

Każda organizacja, aby stale dobrze funkcjonować i być konkurencyjną oraz przynosić zyski lub po prostu realizować założone cele i zadania, bez względu na rodzaj prowadzonej działalności, powinna podnosić jakość swoich produktów, usług, czy procesów. Narzędzia *Lean Management*, a wśród nich MSW, pozwalają na szybką identyfikację problemów i wskazanie głównych obszarów marnotrawstwa. Zdefiniowanie przyczyn źródłowych strat może w krótkim czasie dać szereg rozwiązań i usprawnień procesów. W tabeli 1.2 przedstawiono przykłady zastosowań MSW. W każdym przypadku korzyści w postaci poprawy procesów były bardzo duże.

1.3. Specyfika produkcji lotniczej

Prowadzenie produkcji lotniczej jest objęte szeregiem zatwierdzeń i certyfikacji. Jednym z nich jest zatwierdzenie produkcji zgodnie z EASA Part 21, Podczęść G dla Organizacji Produkującej. Certyfikację w zakresie EASA Part 21G prowadzą Urzędy Lotnictwa Cywilnego właściwe dla danego kraju należące do EASA (ang. *European Union Aviation Safety Agency*). EASA jest Agencją Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego skupiającą 31 państw (27 UE i 4 należące do EFTA (ang. *European Free Trade Association*)). Do głównych zadań Agencji należy utrzymanie wysokiego i ujednoliconego poziomu bezpieczeństwa lotnictwa cywilnego w Europie oraz zapewnienie wysokiego poziomu ochrony środowiska.

Kolejnym ważnym elementem systemu zarządzania produkcją lotniczą jest Polityka Jakości, która jest nieodłącznym elementem technicznej doskonałości produkcji lotniczej. Zwykle bazuje na dwóch głównych celach:

- Zadowolenie klienta – słuchanie i integrowanie jego potrzeb oraz spełnianie jego wymagań, a także przewidywanie jego żądań i reagowanie na nie, tak szybko jak to tylko możliwe.
- Ciągłe doskonalenie – bazuje na upraszczaniu procesów, wdrażaniu najlepszych praktyk i standardów w celu wzmocnienia jakości i wydajności oraz na efektywnym zarządzaniu programami, bazującymi na osiągnięciu wszystkich kamieni milowych oraz systematycznym identyfikowaniu ryzyka i zarządzaniu nim.

Wymagane certyfikaty związane z Systemem Zarządzania Jakością dla produkcji lotniczej to:

- System Zarządzania Jakością według PN-EN 9100:2018-08 [60] – szeroko znormalizowany system zarządzania jakością dla przemysłu lotniczego. Norma PN-EN 9100 opiera się na strukturze podstawowej i kładzie szczególny nacisk na zarządzanie ryzykiem i ciągłe doskonalenie, a także na bezpieczeństwo wyrobu, zarządzanie zmianą, ochronę przed częściami z nieznanego pochodzenia oraz czynnik ludzki.
- System Zarządzania Jakością według PN-EN ISO 9001:2015-10 [62] – standard, na podstawie którego opracowuje się i wdraża system zarządzania jakością w organizacji. Norma może być stosowana przez wszystkie organizacje niezależnie od ich wielkości czy profilu. Standard ISO 9001 ukierunkowany jest na zrozumienie i spełnienie wymagań klienta. Określa potrzeby względem wyrobów danej organizacji. Przyjmuje podejście procesowe dostarczając wyniki skuteczności procesów oraz zapewniając ich ciągłe doskonalenie.

W produkcji lotniczej duży nacisk położony jest również na aspekty bezpieczeństwa pracy i ochronę środowiska. Certyfikaty z tym związane to:

- System Zarządzania Bezpieczeństwem i Higieną Pracy według PN-ISO 45001:2018-06 [63],
- System Zarządzania Środowiskiem według PN-EN ISO 14001:2015-09 [61].

Produkcja lotnicza wraz ze wszystkimi wymaganiami, jakie stawiają przed nią organizacje sprawujące nadzór nad produktami lotniczymi jest dla większości firm nieosiągalna. Szereg wymagań norm, certyfikacja i utrzymanie systemów zarządzania jakością stanowią finansową barierę wejścia na rynek lotniczy. Tylko nieliczni mają zaszczyt wstąpić do grona firm lotniczych, jako organizacja produkująca a jeszcze mniej, jako organizacja projektująca.

1.4. Wskaźniki oceny funkcjonowania linii produkcyjnej

Monitoring procesu produkcyjnego jest nieodzownym elementem współczesnego przedsiębiorstwa. Polega on na rejestrowaniu i gromadzeniu danych dotyczących przebiegu procesu. Wysoki poziom szczegółowości danych daje możliwość trafnej oceny funkcjonowania firmy i jest istotnym elementem strategii zarządzania przedsiębiorstwem produkcyjnym. Metody rejestracji danych można podzielić na dwie kategorie: ręczna i automatyczne [8].

- Metoda ręczna polega na wypełnianiu danych za pomocą przygotowanych do tego celu arkuszy papierowych lub arkuszy danych. Wysoka pracochłonność tej metody rekompensowana jest niskim kosztem uruchomienia. Stosowana jest głównie przez małe firmy, które nie potrzebują kosztownego oprogramowania.
- Metoda automatyczna realizowana jest za pomocą systemów komputerowych i specjalistycznego oprogramowania. Wysoki koszt jego zakupu oraz utrzymania powoduje, że ta metoda dostępna jest głównie dla dużych zakładów.

W systemach produkcyjnych monitoruje się oraz gromadzi wiele danych, takich jak np. czas pracy, liczba produktów, czy też ich jakość. Posługiwanie się surowymi wynikami pomiarów o zróżnicowanym charakterze, pochodzącymi z wielu stanowisk, może być trudne do koordynacji i ewaluacji. O wiele dogodniejsze jest posługiwanie się wskaźnikami liczbowymi o charakterze syntetycznym, łączącymi w sobie informacje pochodzące z różnych źródeł. W tym celu w nowoczesnych systemach produkcyjnych wykorzystuje się tzw. kluczowe wskaźniki wydajności, tzw. KPI (ang. *Key Performance Indicators*) [29].

Definicja kluczowych wskaźników efektywności brzmi następująco: kluczowy wskaźnik efektywności jest nośnikiem informacji, w postaci wskaźnika, miary absolutnej lub statystyki określonego procesu, służącym do kwantyfikacji osiągnięć (sfery technicznej, organizacyjnej oraz ekonomicznej), identyfikacji priorytetowych procesów, operacji, działań i wartości mobilizujących pracowników do osiągnięcia założonych celów i strategii przedsiębiorstwa [21].

Norma ISO 22400 [32, 33] definiuje wskaźniki systemu produkcyjnego, które charakteryzują się hierarchiczną strukturą i wzajemnymi powiązaniem. Możemy wyróżnić trzy poziomy wskaźników KPI [39]:

- bezpośrednie,
- podstawowe,
- złożone.

Wskaźniki bezpośrednie można podzielić na dwie grupy: planowane i rzeczywiste. Planowane charakteryzują się tym, że wynikają z harmonogramów, planów produkcyjnych lub planowanych zamówień. Ich wartości są związane z planowanym czasem lub ilością. Rzeczywiste wskaźniki są efektem pomiaru czasu lub ilości bezpośrednio na produkcji. Oba wskaźniki są niezbędne do poprawnego monitorowania procesu produkcyjnego. Odchylenia pomiędzy nimi służą do oceny jakości planu względem wykonania.

Czas stanowi kluczowy parametr dla większości wskaźników. Wśród planowanego czasu w odniesieniu do maszyn można wyróżnić [8]:

- planowany czas pracy PCP (ang. *Planned Operation Time* POT),
- planowany czas zajętości PCZ (ang. *Planned Busy Time* PBT),
- planowany czas przestoju PCPR (ang. *Planned Down Time* PDOT).

Planowany czas pracy jest sumą planowanego czasu zajętości i planowanego czasu przestoju (wzór 1).

$$PCP = PCZ + PCPR \quad (1)$$

Dla czasu rzeczywistego w odniesieniu do maszyn można wyróżnić [8]:

- rzeczywisty całkowity czas pracy RCCP (ang. *Actual Unit Processing Time* AUPT),
- rzeczywisty czas pracy RCP (ang. *Actual Production Time* APT),
- rzeczywisty czas przebrojenia maszyn RCPM (ang. *Actual Unit Setup Time* AUST).

Rzeczywisty całkowity czas pracy jest sumą rzeczywistego czasu pracy i rzeczywistego czasu przebrojenia maszyn (wzór 2).

$$RCCP = RCP + RCPM \quad (2)$$

W podobny sposób można odnieść się do czasu planowanego i rzeczywistego pracowników, gdzie można wyróżnić [8]:

- planowany i rzeczywisty całkowity czas dostępności pracownika – odpowiednio PCDP i RCDP,
- planowany i rzeczywisty czas pracy pracownika – odpowiednio PCPP i RCPP.

Na podstawie wskaźników bezpośrednich można wyznaczyć/obliczyć wskaźniki podstawowe. Do najczęściej stosowanych w celu oceny funkcjonowania linii produkcyjnej zaliczyć można **Wydajność** (ang. *Efficiency*), **Wykorzystanie** (ang. *Utilization*) i **Produktywność** (ang. *Productivity*) [8].

Wspólnym mianownikiem wyżej wymienionych wskaźników jest czas. Do obliczeń niezbędna jest suma czasu standardowego, która bezpośrednio odnosi się do liczby wyprodukowanych części, suma czasu rzeczywistego poświęconego na wyprodukowanie części i suma czasu dostępnego, w którym te części zostały wyprodukowane.

Czas standardowy (ang. *Standard Time*) jest zdefiniowany dla każdej operacji wykonywanej w procesie produkcyjnym. Stanowi sumę czasów wszystkich czynności, jakie są niezbędne do wykonania jednej części w danej operacji. W przypadku procesów wykonywanych ręcznie lub w kombinacji ręcznie/automatycznie bardzo często do poprawnego obliczenia czasu standardowego niezbędna jest obserwacja czasu. Na jej podstawie wyznacza się standardowy czas procesu. Dla procesów wykonywanych w trybie automatycznym bez udziału człowieka obliczenie czasu standardowego jest o wiele prostsze. Proces automatyczny jest sterowany komputerowo przez programy NC (ang. *Numerical Control*). Czas standardowy jest zatem obliczany z kodu NC. Dokładność jest uzależniona od poprawnego sparametryzowania programu, w którym jest opracowywany kod sterujący obrabiarką. Suma czasu standardowego jest sumą czasów standardowych wszystkich wyprodukowanych części w danej jednostce czasu.

Czas rzeczywisty (ang. *Real Time*) jest to czas w którym część została wykonana zgodnie z operacją procesu technologicznego. Od dokładności rejestracji czasu rzeczywistego zależy poprawna interpretacja wskaźników *Wydajność*, *Wykorzystanie* i *Produktywność*. Suma czasu rzeczywistego jest sumą czasów rzeczywistych wszystkich wyprodukowanych części w danej jednostce czasu.

Czas dostępny (ang. *Global Open Time*) to inaczej czas dyspozycyjny, obliczany jako suma czasu dostępnego do wykonania zadań produkcyjnych dla stanowiska lub grupy stanowisk (linia produkcyjna, wydział produkcyjny). Często służy do określenia czasu, jakim dysponuje operator lub grupa operatorów, którzy pracują na określonej linii produkcyjnej.

Wzory do obliczenia wskaźników wydajność, wykorzystanie i produktywność zostały szczegółowo omówione w rozdziale 4.7.

Wskaźniki złożone łączą ze sobą informację ze wskaźników podstawowych. Do najczęściej stosowanych należy *OEE* (ang. *Overall Equipment Effectiveness*). Dzięki *OEE* możemy za pomocą jednego wskaźnika złożonego monitorować kilka wskaźników podstawowych – jakość, wykorzystanie i dostępność. Sposób obliczenia *OEE* przedstawia wzór 3 [69].

$$OEE = \text{Jakość} \times \text{Wykorzystanie} \times \text{Dostępność} \quad (3)$$

Jakość jest ilorazem sumy części zgodnych i sumy wszystkich wyprodukowanych części (wzór 4). Wykorzystanie obliczamy na podstawie sumy czasu rzeczywistego i sumy czasu

dostępnego (wzór 5) natomiast dostępność jest ilorazem sumy czasu dostępnego pomniejszonego o sumę nieplanowanych przestojów i sumę czasu dostępnego (wzór 6)

$$\text{Jakość} = \frac{\Sigma \text{części wyprodukowanych} - \Sigma \text{części niezgodnych}}{\Sigma \text{części wyprodukowanych}} \quad (4)$$

$$\text{Wykorzystanie} = \frac{\Sigma \text{czasu rzeczywistego}}{\Sigma \text{czasu dostępnego}} \quad (5)$$

$$\text{Dostępność} = \frac{\Sigma \text{czasu dostępnego} - \Sigma \text{czasu nieplanowanych przestojów}}{\Sigma \text{czasu dostępnego}} \quad (6)$$

Przedstawiony wskaźnik *OEE* nie jest zastosowany w niniejszej pracy do oceny linii ESP.

2. Teza, cele, zakres i metodyka pracy

2.1. Teza pracy

Dzięki opracowaniu wirtualnego modelu odzwierciedlającego przepływ materiałów i realizację operacji produkcyjnych na elastycznej linii produkcyjnej możliwe będzie dokonanie symulacji w celu optymalizacji pracy linii produkcyjnej względem kryteriów: czasowego i kosztowego. Przeprowadzenie wielu symulacji w krótkim okresie czasu dla różnych wariantów pracy linii pozwoli podejmować najlepsze decyzje umożliwiające uzyskanie maksymalnego stopnia wykorzystania czasu pracy maszyn, minimalnego czasu przejścia wyrobu przez linię produkcyjną oraz minimalnej liczby wyrobów w toku produkcji zapewniając realizację planu produkcji.

2.2. Cele pracy

Celem niniejszej pracy jest przeprowadzenie symulacji funkcjonowania elastycznej linii produkcyjnej, aby umożliwić optymalną organizację pracy linii zapewniając jak największy stopień wykorzystania czasu pracy maszyn (U), najkrótszy czas przejścia wyrobu przez wszystkie procesy produkcyjne (LT), jak najmniejsze koszty utrzymania produkcji w toku (WIP) oraz jak najmniejsze koszty narzędzi.

Aby ten cel osiągnąć ustalono następujące cele cząstkowe:

- Cel 1. Przegląd i pozyskanie informacji na temat modelowania przepływu strumienia wartości na linii produkcyjnej.
- Cel 2. Identyfikacja czynników wejściowych i wyjściowych dla linii produkcyjnej.
- Cel 3. Identyfikacja etapów procesu produkcyjnego.
- Cel 4. Identyfikacja elementów systemu elastycznego oraz zależności występujących pomiędzy nimi.
- Cel 5. Przygotowanie i analiza danych do opracowania modelu.
- Cel 6. Opracowanie wirtualnego modelu linii produkcyjnej.
- Cel 7. Ocena adekwatności modelu.
- Cel 8. Zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych.
- Cel 9. Opracowanie rekomendacji dla organizacji produkcyjnej w celu optymalizacji pracy elastycznej linii produkcyjnej.

2.3. Zakres pracy

Praca obejmuje analizę funkcjonowania jednej elastycznej linii produkcyjnej, na której realizowana jest obróbka dziesięciu części na czterech obrabiarkach sterowanych numerycznie.

2.4. Ogólna metodyka pracy

Aby osiągnąć założone cele w ramach niniejszej pracy wykonano następujące zadania według zaprezentowanej metodyki:

Zadanie 1. Przeprowadzenie systematycznego przeglądu literatury

Dla osiągnięcia celu pierwszego został przeprowadzony systematyczny przegląd literatury. W pierwszej kolejności zostały zdefiniowane słowa kluczowe oraz zidentyfikowane pytania badawcze. Do przeszukania wybrano trzy bazy danych: Web of Science, Scopus i Science Direct.

Proces wyszukiwania publikacji opierał się na przeglądzie tytułu, streszczenia i słów kluczowych. Następnie dokonano analizy wyników i opracowano wnioski z przeprowadzonych badań literaturowych.

Zadanie 2. Analiza obiektu badań

Dla osiągnięcia celów 2, 3 i 4 w kolejnym etapie przeanalizowano obiekt badań (linię ESP) oraz proces produkcji wyrobów realizowanych na analizowanej linii produkcyjnej. Zidentyfikowano dane wejściowe i dane wyjściowe dla procesu produkcyjnego oraz elementu składowe systemu.

Zadanie 3. Zbieranie i analiza danych

Dla osiągnięcia celu 5 w kolejnym etapie opisano wszystkie czynności przygotowujące do badań. Najważniejsze elementy to przygotowanie narzędzi do zbierania danych, zgromadzenie danych i ich analiza. W pracy wykorzystano również dane historyczne zgromadzone przed rozpoczęciem badań przedstawionych w niniejszej pracy, w związku z tym należało zidentyfikować źródła tych danych.

Zadanie 4. Opracowanie modelu w programie Witness

Dla osiągnięcia celów 6 i 7, czyli opracowania wirtualnego modelu linii ESP, co było kluczowym elementem pracy, w pierwszej kolejności stworzono wirtualny model w programie Witness, a następnie dokonano przeglądu wprowadzonych formuł dla zidentyfikowania

i wyeliminowania ewentualnych błędów. W kolejnym kroku dokonano weryfikacji modelu przeprowadzając szereg testów dla różnych danych wejściowych kontrolując jednocześnie dane wyjściowe.

Weryfikacji modelu dokonano poprzez ocenę, w jakim stopniu wnioski z modelu symulacyjnego można odnieść do wyników fragmentu rzeczywistości. W tym celu podczas testów modelu sprawdzano prawidłowość przepływu części w środowisku wirtualnym. Wyniki porównano z rzeczywistym procesem technologicznym. Dokonano weryfikacji wszystkich reguł wejścia i wyjścia z poszczególnych elementów takich jak maszyny i bufory oraz sprawdzono adekwatność reguł kolejkowania.

Walidacja modelu została przeprowadzona w odniesieniu do danych rzeczywistych pozyskanych z linii produkcyjnej przy takich samych warunkach, jakie założono następnie w symulacji. Walidacja polegała na porównaniu danych rzeczywistych z danymi z symulacji dla takiego samego okresu czasu i tej samej liczby zleceń produkcyjnych. Przeprowadzone zostały testy statystyczne w celu potwierdzenia braku istotnych różnic pomiędzy danymi rzeczywistymi, a danymi z symulacji. Było to podstawą do przyjęcia bądź odrzucenia wirtualnego modelu do przeprowadzenia eksperymentów. Przeprowadzono następujące testy statystyczne: test normalności rozkładu Shapiro-Wilka, analizę korelacji liniowej Pearsona i 2 sample T-Test Testy wykonane zostały w programie statystycznym Minitab, wersja 20.1.3.

Zadanie 5. Zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów

Dla osiągnięcia celu 8 opracowano plan eksperymentów. W tym celu został przeanalizowany stan aktualny linii produkcyjnej. Opracowane zostały założenia do przeprowadzenia eksperymentów. Dla każdego eksperymentu określono cel oraz jakie założenie będzie zweryfikowane. Zdefiniowane zostały trzy funkcje celu:

- U_{max} , – wykorzystanie maszyn dąży do maksimum,
- WIP_{min} , – produkcja w toku mierzona poziomem części w obszarze linii produkcyjnej dąży do minimum,
- LT_{min} – cykl produkcyjny dąży do minimum.

W eksperymentach zostały zastosowane dwie zmienne wejściowe:

- **IleW_ESP** – *zmienna ograniczająca maksymalną liczbę wszystkich części, jakie mogą się znajdować na linii ESP – trzy poziomy zmienności*

- **BazaAlt_Op** – zmienna definiująca aktywną operację dla części na danej maszynie – dwa poziomy zmienności

Łącznie wykonano 21 eksperymentów, które zostały podzielone na dwa etapy rozdzielone etapem pośrednim związanym z szacowaniem kosztów. Do poprawnej oceny wyników poszczególnych zestawów eksperymentów w etapie drugim dla wskaźników *U*, *WIP* i *LT* przyjęte zostały wartości wag odpowiednio 0,7, 0,15 i 0,15, które wynikają z przyjętej polityki firmy.

Zadanie 6. Analiza wyników eksperymentów, dyskusja i opracowanie rekomendacji

Ostatnim krokiem pracy była analiza wyników eksperymentów i przedstawienie wniosków z przeprowadzonych badań. Wykonane eksperymenty oraz opracowane na tej podstawie wyniki i wnioski posłużą do optymalizacji stanu obecnego linii, wyznaczenia stanu przyszłego oraz wskazania możliwości wdrożenia proponowanych rozwiązań w przyszłości w zakładzie.

3. Przegląd aktualnego stanu wiedzy

3.1. Szczegółowa metodyka przeprowadzenia systematycznego przeglądu literatury

Celem systematycznego przeglądu literatury jest identyfikacja, i ocena badań, dotyczących wybranej tematyki, na podstawie jasno zdefiniowanych kryteriów. Przegląd aktualnego stanu wiedzy to również rodzaj przeglądu literatury skupiający się na jednym zagadnieniu wykonanym w oparciu o dowody naukowe, czyli wiarygodne publikacje wyników pierwotnych badań naukowych (pierwotne źródło wiedzy), zawierającym opis identyfikacji, oceny, wyboru i podsumowania tych wyników. Stosowanie metodyki sporządzania przeglądu literatury ma zapewnić trzy podstawowe korzyści [19]:

- przegląd literatury uwzględni wszystkie wyniki badań poświęcone danemu zagadnieniu,
- w przeglądzie literatury nie zostaną pominięte żadne wyniki badań, które nie odpowiadają zamierzeniom lub poglądom osoby przeprowadzającej badanie,
- opracowane przejrzyste reguły stworzą możliwość weryfikacji trafności przeglądu poprzez umożliwienie jego powtórzenia w celu zweryfikowania wyników.

Powyższe korzyści zostaną osiągnięte, gdy autor systematycznego przeglądu literatury odpowiednio dobierze kryteria wyszukiwania, w kolejnym kroku prawidłowo przeanalizuje wszystkie odnalezione źródła, a następnie właściwie je podsumuje uwzględniając ograniczenia metodyczne indywidualnych badań omawianych w ramach przeglądu literatury, a na koniec rzetelnie przedstawi wyniki w końcowym raporcie z przeglądu literatury.

Przygotowanie systematycznego przeglądu literatury może stanowić cel sam w sobie, lecz często taki przegląd jest jedynie etapem wstępnym realizacji własnego badania. Jakość tego badania w decydującym stopniu zależy od jakości systematycznego przeglądu literatury. Pominięcie etapu przeglądu literatury lub przeprowadzenie go na podstawie kilkunastu przypadkowo dobranych źródeł może spowodować, że przeprowadzone badanie będzie [30]:

- niepotrzebne (odpowiedź na pytanie badawcze jest od dawna znana),
- błędnie zaplanowane (nie uwzględniono ważnych zmiennych, o których wiadomo, że wywierają wpływ na badane zjawisko; użyto metod, o których wiadomo, że nie sprawdzają się w danym typie badania),

- niewystarczająco osadzone w dotychczasowym dorobku empirycznym (autor badania nie będzie w stanie pokazać, czy uzyskane przez niego/nią wyniki pozostają w zgodzie z dotychczasowymi rezultatami, czy je podważają),
- niewystarczająco osadzone w dotychczasowych teoriach (autor badania nie uwzględnia ważnych perspektyw teoretycznych lub błędnie łączy ze sobą wyniki uzyskane w ramach odrębnych podejść teoretycznych, które różnią się np. przyjętymi założeniami).

Systematyczny przegląd literatury z każdym rokiem staje się ważniejszy. Jeszcze kilkadziesiąt lat temu badacz mógł na bieżąco śledzić wszystkie interesujące go publikacje i tym samym opierać swoje badania na intuicyjnym rozpoznaniu literatury. W ostatnich latach liczba badań rośnie w niewiarygodnym tempie, co sprawia, że śledzenie wszystkich publikacji staje się niewykonalne. Wymogiem staje się, aby każdy projekt badawczy poprzedzony był sporządzeniem rzetelnego przeglądu literatury.

Procedura sporządzania systematycznego przeglądu literatury składa się z sześciu etapów [30]:

- Etap 1. Sformułowanie tematu przeglądu.
- Etap 2. Ustalenie kryteriów wyszukiwania i kwalifikacji badań do przeglądu.
- Etap 3. Wyszukiwanie publikacji w bazach danych.
- Etap 4. Kwalifikacja publikacji na podstawie tytułów i streszczeń.
- Etap 5. Kwalifikacja i analiza badań na podstawie pełnych tekstów.
- Etap 6. Przygotowanie raportu z przeglądu literatury.

Systematyczny przegląd literatury, jako metoda badawcza dostarcza informacji na temat wybranego zjawiska w szerokim zakresie. Zachowanie w/w reguł i przestrzeganie kilku podstawowych zasad pozwala na trafną ocenę, czy kierunek prowadzonych badań był już omawiany w literaturze. Jest to niezwykle ważne w przypadku, gdy chcemy udowodnić, że prowadzone prace badawcze będą nowatorskie.

3.2. Plan realizacji systematycznego przeglądu literatury

Plan systematycznego przeglądu literatury zawierał następujące czynności:

- określenie pytań badawczych,
- identyfikacja słów kluczowych,
- opracowanie reguł wyszukiwania,
- identyfikacja baz danych,
- wybór zastosowanych kryteriów,
- wyszukiwanie publikacji,
- analizy ilościowe i jakościowe,
- omówienie wyników.

Na potrzeby realizacji systematycznego przeglądu literatury zostały postawione następujące pytania badawcze:

- Jakie matematyczne modele są prezentowane w literaturze w zastosowaniu do mapowania strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych?
- Jak często temat matematycznego modelowania jest omawiany w połączeniu z mapowaniem strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych?

Na podstawie zidentyfikowanych pytań badawczych zostały wyodrębnione słowa kluczowe niezbędne w dalszej fazie analizy do zdefiniowania reguły wyszukiwania. Zidentyfikowano następujące słowa kluczowe, które w procesie wyszukiwania zostały użyte w wersji angielskiej:

- “model matematyczny” lub “modele matematyczne” (ang. “*mathematical model*” or “*mathematical models*”),
- “mapowanie strumienia wartości” lub „strumień wartości” (ang. „*value stream mapping*” or „*value stream*”),
- “elastyczny system produkcji” lub „elastyczne systemy produkcyjne” (ang. „*flexible manufacturing system*” or „*flexible production systems*”).

Na podstawie wyodrębnionych słów kluczowych opracowano następującą regułę wyszukiwania:

(„model matematyczny” lub „modele matematyczne”) i („mapowanie strumienia wartości” lub „strumień wartości”) i („elastyczny system produkcji lub elastyczne systemy produkcyjne”)

ang. (“*mathematical model*” OR “*mathematical models*”) AND (“*value stream mapping*” OR “*value stream*”) AND (“*flexible manufacturing system*” OR “*flexible production systems*”)

Do przeszukania wybrano następujące bazy danych:

- Web of Science,
- Scopus,
- Science Direct.

Proces wyszukiwania opierał się na przeglądzie tytułu, streszczenia i słów kluczowych. Istotne było przeszukanie artykułów związanych z mapowaniem strumienia wartości w odniesieniu do elastycznych systemów produkcyjnych.

Wyszukiwanie literatury ograniczało się do artykułów z czasopism, konferencji i książek napisanych w języku angielskim. W wyniku wyszukiwania nie znaleziono ani jednej pozycji literatury w w/w trzech bazach danych wykorzystując przedstawioną regułę wyszukiwania. Dlatego też w kolejnym kroku ograniczono słowa kluczowe do „model matematyczny”, i „mapowanie strumienia wartości” w celu weryfikacji czy temat matematycznego modelowania jest omawiany w połączeniu z mapowaniem strumienia wartości. Na podstawie wyodrębnionych słów kluczowych opracowano drugą regułę wyszukiwania, a mianowicie:

(„model matematyczny” lub „modele matematyczne”) i („mapowanie strumienia wartości lub strumień wartości”)

ang. (“*mathematical model*” OR “*mathematical models*”) AND (“*value stream mapping*” OR “*value stream*”)

Proces wyszukiwania tak jak poprzednio opierał się na przeglądzie tytułu, streszczenia i słów kluczowych. Liczba wyszukanych publikacji dla każdej z baz danych przedstawiona jest w tabeli 3.1.

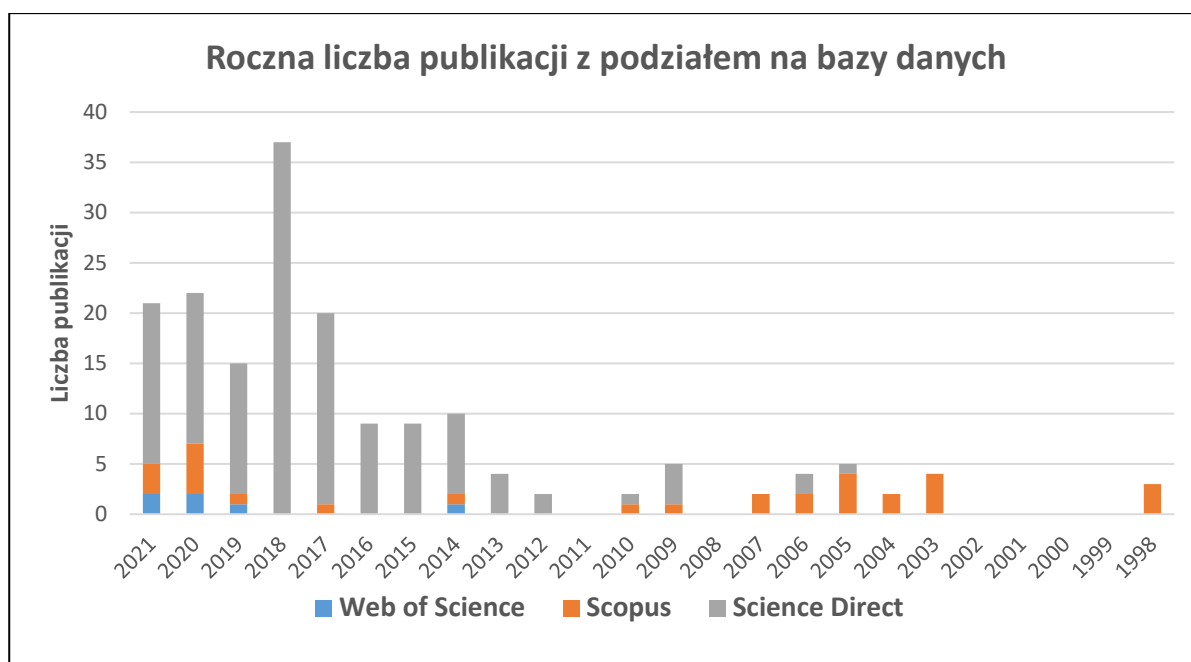
Tabela 3.1. Liczba wyszukanych publikacji z podziałem na bazy danych;
Źródło: opracowanie własne

Baza danych	Liczba publikacji
Web of Science	6
Scopus	30
Science Direct	140

W tabeli 3.2 zaprezentowano wyniki wyszukiwania z podziałem na bazy danych i lata pojawienia się publikacji. Z każdym rokiem zainteresowanie tematyką modelowania przepływu strumienia wartości rośnie co szczególnie da się zauważyć w ostatnich pięciu latach. Rysunek 3.1 przedstawia w sposób graficzny roczną liczbę publikacji z podziałem na bazy danych.

Tabela 3.2. Liczba wyszukanych publikacji z podziałem na lata publikacji;
Źródło: opracowanie własne

Rok:	Web of Science	Scopus	Science Direct	Razem
2021	2	3	16	21
2020	2	5	15	22
2019	1	1	13	15
2018			37	37
2017		1	19	20
2016			9	9
2015			9	9
2014	1	1	8	10
2013			4	4
2012			2	2
2011				0
2010		1	1	2
2009		1	4	5
2008				0
2007		2		2
2006		2	2	4
2005		4	1	5
2004		2		2
2003		4		4
2002				0
2001				0
2000				0
1999				0
1998		3		3
Razem	6	30	140	176



Rysunek 3.1. Wykres liczby publikacji z podziałem na bazy danych i lata wystąpienia;
Źródło: opracowanie własne

3.3. Wyniki systematycznego przeglądu literatury

W wyniku wykonanego systematycznego przeglądu literatury oraz dokonaniu oceny jakościowej otrzymanych wyników wyodrębniono 29 publikacji do przeprowadzenia szczegółowej analizy. 27 artykułów zostało wyszukanych w bazie Science Direct, a tylko po jednym w bazach Web of Science i SCOPUS (tabela 3.3). Wykaz wyszukanych publikacji poddanych szczegółowej analizie przedstawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.3. Liczba wyszukanych publikacji z podziałem na bazy danych;
Źródło: opracowanie własne

Baza danych	Liczba publikacji
Web of Science	1
Scopus	1
Science Direct	27

Tabela 3.4. Wykaz artykułów poddanych szczegółowej analizie;
Źródło: opracowanie własne

Artykuł Nr.	Tytuł oryginalny	Autor/autorzy	Czasopismo / Książka / Konferencja	Rok	Baza danych	Pełny tekst dostępny TAK/ NIE
1	Applying Aggregated Line Modeling Techniques to Optimize Real World Manufacturing Systems	S. Lidberg, L. Pehrsson, M. Frantzén [44]	Procedia Manufacturing	2018	Science Direct	Tak
2	A new vision of LARG Manufacturing — A trail towards Industry 4.0	M. S. Amjad, M. Z. Rafique, S. Hussain, M. A. Khan [3]	CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology	2020	Science Direct	Tak
3	A state-of-the-art survey of TOPSIS applications	M. Behzadian, S. K. Otaghsara, M. Yazdani, J. Ignatius [10]	Expert Systems with Applications	2012	Science Direct	Tak
4	A multi-attribute decision model for setting production planning parameters	I. Pergher, A. T. de Almeida [58]	Journal of Manufacturing Systems	2017	Science Direct	Tak
5	Index - Lean Tools in Apparel Manufacturing	N/D	Woodhead Publishing	2021	Science Direct	Nie
6	A Development of Flexible Manufacturing System using POLMAN T-100 Vise Casting Component as a Case Study	M. Nurdin, A. L. Hakim [53]	Procedia Manufacturing	2015	Science Direct	Tak
7	Analytic network process: An overview of applications	S. Kheybari, F. M. Rezaie, H. Farazmand [38]	Applied Mathematics and Computation	2020	Science Direct	Tak
8	Index - Advanced Applications in Manufacturing Engineering	N/D	Woodhead Publishing	2019	Science Direct	Nie
9	An integrated performance driven manufacturing management strategy based on overall system effectiveness	B. A. Nicholds, J. P.T. Mo, L. O’Rielly [51]	Computers in Industry	2018	Science Direct	Tak
10	12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing	N/D	IFAC Proceedings Volumes	2006	Science Direct	Nie

Artykuł Nr.	Tytuł oryginalny	Autor/autorzy	Czasopismo / Książka / Konferencja	Rok	Baza danych	Pełny tekst dostępny TAK/ NIE
11	Key factors for operational performance in manufacturing systems: Conceptual model, systematic literature review and implications	M. Battesini, C. Schwengber ten Caten, D. A. J. Pacheco [9]	Journal of Manufacturing Systems	2021	Science Direct	Tak
12	Leveraging Optimized and Cleaner Production through Industry 4.0	M. S. Amjad, M. Z. Rafique, M. A. Khan [4]	Sustainable Production and Consumption	2021	Science Direct	Tak
13	Performance Analysis of New Product Development Process through Timed Coloured Petri Nets	G. Mazzuto, M. Bevilacqua, F.E. Ciarapica [48]	IFAC-PapersOnLine	2018	Science Direct	Tak
14	Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review	S. Phuyal, D. Bista, R. Bista [59]	Sustainable Futures	2020	Science Direct	Tak
15	Design Considerations and Architecture for Cooperative Smart Factory: MAPE/BD Approach	B. Jeon, S.-H. Suh [36]	Procedia Manufacturing	2018	Science Direct	Tak
16	Industrial information integration—A literature review 2006–2015	Y. Chen [16]	Journal of Industrial Information Integration	2016	Science Direct	Tak
17	Cost assessment of a production system – A method targeting a product’s aggregated value stream costs	C. Windmark, C. Andersson [73]	Procedia Manufacturing	2018	Science Direct	Tak
18	Evaluation of cutting processes using geometric physically-based process simulations in view of the electric power consumption of machine tools	A. Wirtz, M. Meißner, P. Wiederkehr, D. Biermann, J. Myrzik [74]	Procedia CIRP	2019	Science Direct	Tak
19	Analysis of drivers for solving facility layout problems: A Literature review	S. Q. D. Al-Zubaidi, G. Fantoni, F. Failli [2]	Journal of Industrial Information Integration	2021	Science Direct	Tak

Artykuł Nr.	Tytuł oryginalny	Autor/autorzy	Czasopismo / Książka / Konferencja	Rok	Baza danych	Pełny tekst dostępny TAK/ NIE
20	Evaluating flexibility in discrete manufacturing based on performance and efficiency	G. Seebacher, H. Winkler [66]	International Journal of Production Economics	2014	Science Direct	Tak
21	Design and management of manufacturing systems for production quality	M. Colledani, T. Tolio, A. Fischer, B. Iung, G. Lanza, R. Schmitt, J. Váncza [17]	CIRP Annals - Manufacturing Technology	2014	Science Direct	Tak
22	A Software Tool for the Analysis and Management of Resource Consumptions and Environmental Impacts of Manufacturing Plants	C. Favi, M. Germani, M. Mandolini, M. Marconi [25]	Procedia CIRP	2017	Science Direct	Tak
23	Towards Developing Sustainable Reconfigurable Manufacturing Systems	A. Huang, F. Badurdeen, I.S. Jawahir [31]	Procedia Manufacturing	2018	Science Direct	Tak
24	Digital Twin Driven Smart Design	Ning Zhao, Jiapeng Guo, Hu Zhao	Academic Press	2020	Science Direct	Nie
25	Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems	V. Alcácer, V. Cruz-Machado [1]	Engineering Science and Technology, an International Journal	2019	Science Direct	Tak
26	Analysing manufacturing enterprises to identify opportunities for automation and guide implementation - a review.	J. Walker, S. Childe, Y. Wang [72]	IFAC-PapersOnLine	2019	Science Direct	Tak
27	Simulation in Manufacturing: Review and Challenges	D. Mourtzis, M. Doukas, D. Bernidaki [50]	Procedia CIRP	2014	Science Direct	Tak
28	Research on Fault Diagnosis of Flexible Material R2R Manufacturing System Based on Quality Control Chart and SoV	Y. Deng, N. Zhou, X. Liu, Q. Lu [22]	Mathematical Problems in Engineering	2018	Web Of Science	Tak
29	Applied Mechanics and Materials	N/D	Brak danych	2013	SCOPUS	Nie

Po przeprowadzeniu weryfikacji dostępności pełnego tekstu, do szczegółowej analizy wybrano 24 publikacje z ogólnej liczby 29.

3.4. Wnioski z przeprowadzonych badań literaturowych

Dokonując analizy wyników przeprowadzonych badań literaturowych można stwierdzić, że tematyka związana z matematycznymi modelami w zastosowaniu do mapowania strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych nie jest szeroko omawiana w literaturze. Na postawione pytanie „*Jak często temat matematycznego modelowania jest omawiany w połączeniu z mapowaniem strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych?*” można odpowiedzieć, że nie wyszukano ani jednej publikacji w trzech bazach danych: Web of Science, Scopus, i Science Direct. Dlatego też w kolejnym kroku systematycznego przeglądu literatury ograniczono słowa kluczowe do „model matematyczny” i „mapowanie strumienia wartości” w celu weryfikacji czy temat matematycznego modelowania jest omawiany w połączeniu z mapowaniem strumienia wartości. Z każdym rokiem zainteresowanie tematyką modelowania przepływu strumienia wartości rośnie co pokazuje przedstawiona wcześniej tabela 3.2, natomiast brak jest powiązania z elastycznymi systemami produkcyjnymi. Wskazuje to na przestrzeń do przeprowadzenia badań w obszarze nieopisanym dotąd w literaturze lub opisanym niedostatecznie dokładnie.

3.5. Wybór metody modelowania przepływu strumienia wartości

Na podstawie przeprowadzonego systematycznego przeglądu literatury oraz dokonania oceny wyników badań literaturowych została zidentyfikowana przestrzeń badawcza, która nie jest opisana w literaturze lub niezbyt dokładnie jest opisana. Do niniejszej pracy wybrana została symulacja komputerowa, jako matematyczny model w zastosowaniu do mapowania strumienia wartości w kontekście elastycznych systemów produkcyjnych.

Zakłady produkcyjne chcąc podejmować decyzje biznesowe oparte na szczegółowej analizie danych coraz częściej sięgają po narzędzia symulacyjne, które znajdują coraz szersze zastosowanie. Największą ich zaletą jest brak ograniczeń dotyczących struktury i stopnia skomplikowania analizowanego systemu [34]. Symulacja komputerowa przepływu materiałów w produkcji jest coraz powszechniej stosowana przed uruchomieniem nowych linii produkcyjnych lub w celu umożliwienia kontroli produkcji. Zastosowana w niniejszej pracy

symulacja dyskretna opiera się na numerycznym rozwiązaniu problemów kolejkwania. Główne korzyści z niej płynące to zrozumienie zachowania systemu przed jego zbudowaniem, odkrycie nieoczekiwanych niezgodności i możliwość badania różnych zastosowań scenariuszy przypadków [5]. Symulacja daje również możliwość sprawdzenia skutków danego usprawnienia jeszcze przed jego wdrożeniem. Analiza wszystkich rozwiązań pozwala na wybór tego optymalnego, w krótkim okresie czasu. Do symulacji wykorzystywane są dane historyczne, jednak dzięki zastosowaniu metod statystycznych i zapisaniu charakterystyk pracy maszyn i urządzeń w postaci języka matematycznego, możliwe jest również symulowanie przyszłości z bardzo dużym przybliżeniem. Tym samym analizowany problem sprowadzany jest do postaci ogólnej, a jego rozwiązanie uwzględnia również interakcje pomiędzy pozostałymi elementami systemu, a nie jedynie jego szczególny wycinek. Symulacja umożliwia przedstawienie zachowania się systemu produkcyjnego po wprowadzeniu zmian i zidentyfikowanie możliwych problemów. Symulacja jest narzędziem wspomagającym planowanie i zarządzanie produkcją. Ponadto możliwość zastosowania animacji przedstawiającej proces produkcyjny ułatwia zrozumienie zachodzących interakcji pomiędzy poszczególnymi elementami procesu. Możliwe jest wykrycie i usunięcie wszystkich potencjalnych strat podczas wykonywania planu produkcyjnego przed jego fizyczną realizacją. Komputerowa symulacja produkcji jest przedstawieniem wirtualnej rzeczywistości funkcjonowania testowego systemu produkcyjnego.

W czasie projektowania lub optymalizacji systemów produkcyjnych, jak również w trakcie zarządzania produkcją pojawia się wiele niewiadomych, których rozwiązanie tradycyjnymi metodami nie przynosi oczekiwanych rezultatów. Duża liczba możliwych wariantów i ich złożoność utrudnia poprawną ocenę. Bardzo często się zdarza, że możliwe jest uzyskanie tzw. efektu lokalnej optymalizacji bez możliwości oceny, jak zmiana skutkuje na najbliższe otoczenie. Uwzględnienie wszystkich możliwych zdarzeń bezpośrednio podczas produkcji często sprawia, że optymalizacja staje się zbyt pracochłonna, a co za tym idzie i kosztowna. Aby uniknąć opisanych wcześniej problemów warto przeprowadzić symulację komputerową zarówno na etapie projektowania nowego systemu produkcyjnego, jak i później w procesie optymalizacji.

Obszary zastosowania symulacji komputerowej [41]:

- analiza i doskonalenie produkcji we wszystkich sektorach gospodarki,
- wspomaganie procesów decyzyjnych,

- optymalizacja komunikacji i szkoleń,
- wspomaganie w pracach koncepcyjnych,
- wspomaganie w planowaniu i zarządzaniu produkcją np. lotniczą.

Dostępne są dwie metody symulacji komputerowej [5]:

- symulacja dyskretna,
- symulacja ciągła.

Symulacja dyskretna to technika stosowana do badania układów dynamicznych, w którym zmiana systemu w czasie jest serią dyskretnych zdarzeń. Wszystkie obiekty w symulacji są połączone regułami. Każde zdarzenie jest w określonym czasie i zmienia stan systemu, co pozwala na uwzględnienie efektów stochastycznych tych zdarzeń [5]. Symulacja ciągła jest przeciwieństwem symulacji dyskretniej. Opis upływu czasu realizowany jest za pomocą funkcji. W symulacji ciągłej stan systemu jest zwykle określany za pomocą układu równań różniczkowych w funkcji czasu. Metoda ta jest często wykorzystywana do analizy systemów o dużej liczbie zależności między komponentami [5].

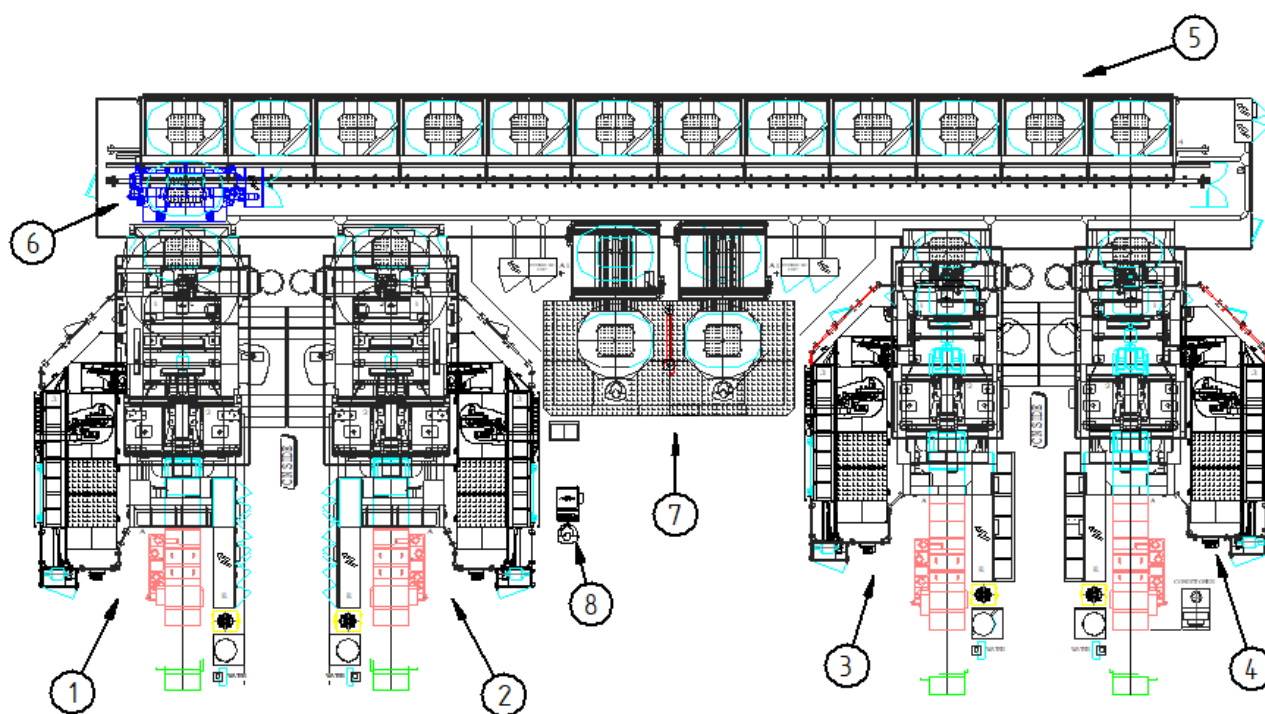
Porównując obie metody symulacji do niniejszej pracy wybrano symulację dyskretną. Zdarzenia opisane w procesie produkcyjnym mają odzwierciedlenie w czasie i pociągają za sobą szereg innych zdarzeń. Symulacja dyskretna jest adekwatną metodą do opisanie tych zdarzeń.

Za pomocą symulacji można sterować całym procesem produkcyjnym zaczynając od wprowadzenia planu produkcyjnego, uruchamiania zleceń produkcyjnych, ustalania wielkości serii i kolejności ich realizacji po planowanie remontów i losowych awarii. Na wykonanym modelu można zaplanować i przeprowadzić eksperymenty różniące się zadanymi parametrami wejściowymi. Każdy eksperyment symulacyjny reprezentuje inne założenie. Ich liczba jest niemal nieograniczona w modelu symulacyjnym. Jedynym ograniczeniem może być zdolność do ich oceny i wyboru najbardziej efektywnego i pożądanego rozwiązania.

4. Prezentacja obiektu badań

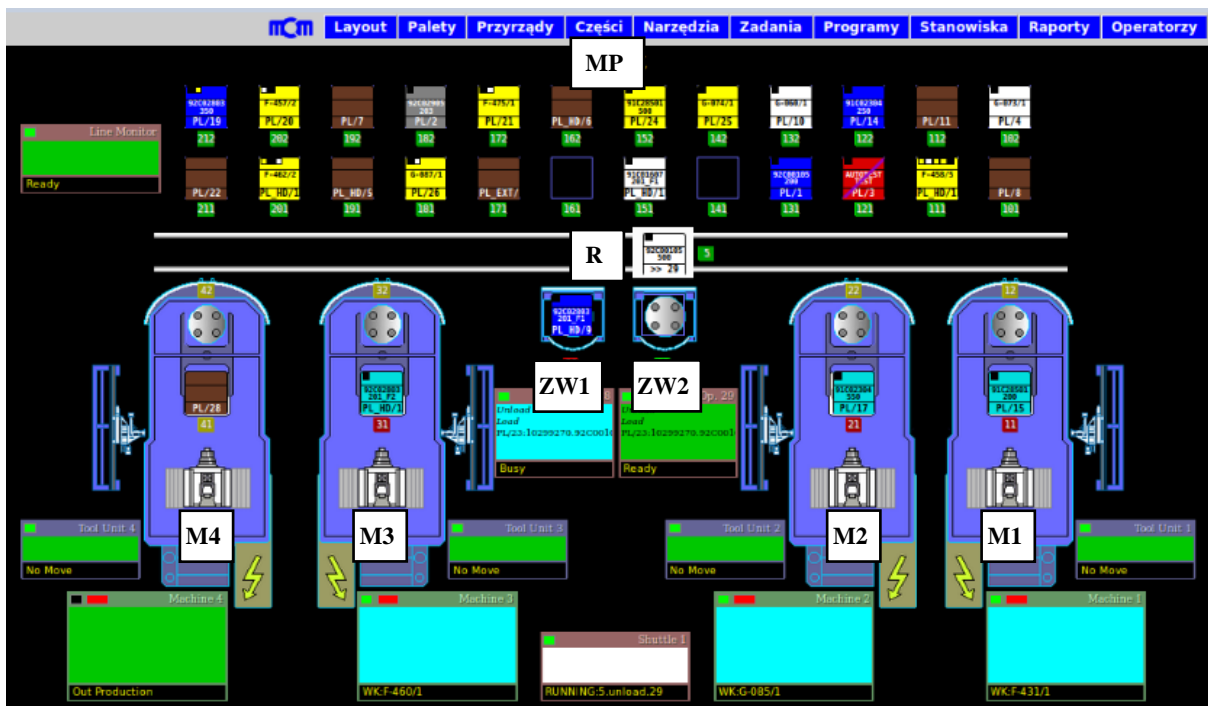
4.1. Layout linii produkcyjnej

Obiekt badań ulokowany jest w firmie lotniczej, jednego ze światowych liderów w produkcji przekładni akcesoriów (ang. *Accessory Drive Train – ADT*) dla samolotów powyżej 100 miejsc. Temat badań jest ściśle powiązany z działalnością operacyjną zakładu produkcyjnego. Zautomatyzowana linia produkcyjna włoskiej firmy MCM S.p.A. (ang. *Machining Centers Manufacturing*) do produkcji dużych kadłubów przekładni akcesoriów schematycznie przedstawiona na rysunku 4.1 składa się z 4 maszyn (1, 2, 3, 4) połączonych ze sobą robotem (6) i systemem palet (5). W centralnej części linii ulokowano 2 stanowiska załadowczo wyładowcze (7) oraz komputer centralny do zarządzania pracą ESP (8). Rysunek 4.1 przedstawia layout linii produkcyjnej.



Rysunek 4.1. Layout elastycznej linii produkcyjnej ESP;
Źródło: opracowanie własne na podstawie MCM S.p.A. - Machining Centers Manufacturing

Linia produkcyjna ESP sterowana jest za pomocą systemu JFMX. Operator ma do dyspozycji pulpit z widokiem wszystkich elementów linii wraz z informacją o ich statusie w trybie na żywo (ang. *on line*). Pulpit sterowania JFMX przedstawia rysunek 4.2.



Rysunek 4.2. Widok systemu sterowania linią produkcyjną JFMX;
Źródło: system JFMX sterowania linią ESP

Kolory oraz opisy na poszczególnych elementach informują operatora linii o aktualnie wykonywanym zadaniu. Widoczne są wszystkie cztery maszyny M1, M2, M3 i M4, stacje załadowczo-wyładowcze ZW1 i ZW2, robot R oraz magazyn palet MP.

4.2. Prezentacja wyrobów

Linia produkcyjna ESP została przeznaczona do produkcji komponentów lotniczych przekładni akcesoriów ADT (ang. *Accessory Drive Train*) takich jak kadłuby i pokrywy. Wysoka dokładność wykonania części oraz ich skomplikowany kształt i duże gabaryty powodują, że proces technologiczny jest niezwykle trudny i czasochłonny. Rysunek 4.3 przedstawia kadłub główny przekładni akcesoriów. Materiałem podstawowym jest odkuwka ze stopu aluminium o masie około 120 kg. Proces obróbki mechanicznej składa się z 4 operacji mechanicznych występujących jedna po drugiej. Łączny czas obróbki to około 23 godziny. Waga wyrobu gotowego wynosi około 18 kg. Na linii ESP są produkowane 4 tego typu kadłuby. Dwa z odkuwki i dwa z odlewu. Czas obróbki maszynowej dla obu kadłubów z odkuwki jest podobny, natomiast czas obróbki maszynowej kadłubów z odlewu jest znacznie krótszy i wynosi około 9 godzin.



Rysunek 4.3. Kadłub główny przekładni akcesoriów ADT;
Źródło: zdjęcie własne

Rysunek 4.4 przedstawia drugi typ części produkowanych na linii ESP – pokrywę. Materiałem podstawowym jest blok w formie płyty ze stopu aluminium. Proces obróbki mechanicznej składa się z 2 operacji występujących jedna po drugiej. Łączny czas obróbki mechanicznej to około 7 godzin. Na linii ESP produkowane są 4 tego typu części, a czas obróbki maszynowej jest zbliżony do siebie.



Rysunek 4.4. Pokrywa przekładni akcesoriów ADT;
Źródło: zdjęcie własne

Rysunek 4.5 przedstawia trzeci typ części produkowanych na linii ESP – korpus przekładni kątowej. Materiałem podstawowym jest odlew ze stopu aluminium. Proces obróbki mechanicznej składa się z 2 operacji występujących jedna po drugiej. Łączny czas obróbki mechanicznej to około 4 godziny. Na linii ESP są produkowane 2 części tego typu, dla których przebieg procesu technologicznego jest taki sam a czas obróbki mechanicznej jest zbliżony do siebie.



Rysunek 4.5. Korpus przekładni kątowej,
element przeniesienia napędu przekładni akcesoriów ADT;
Źródło: zdjęcie własne

Zaprezentowane wyroby po zakończeniu procesu produkcyjnego są przekazywane na montaż. Kompletny moduł ADT prezentuje rysunek 4.6.



Rysunek 4.6. Kompletny moduł przekładni akcesoriów ADT na stojaku montażowym;
Źródło: zdjęcie własne

Wszystkie operacje mechaniczne na zaprezentowanych wyrobach wykonywane są na analizowanej linii ESP.

4.3. Przepływ produktów

Do identyfikacji wszystkich istotnych elementów procesu został zastosowany diagram SIPOC (ang. *Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers*). Pozwoliło to na wysoki poziom wglądu w proces i jego analizę. Stwierdzono, że diagram jest doskonałym narzędziem dającym możliwość identyfikacji obszaru procesu, w którym pojawia się jakiś problem. Pozwala też dogłębnie zrozumieć podprocesy i zależności zachodzące między nimi. Z tych powodów diagram jest często wykorzystywany do ulepszenia procesu w metodach ciągłego doskonalenia. Sporządzenie tego schematu przed przystąpieniem do pracy znacząco ułatwiło identyfikację obszarów wymagających zmian. SIPOC dla stanu początkowego przedstawia tabela 4.1.

Tabela 4.1 Diagram SIPOC dla stanu początkowego procesu obróbki części kadłub na elastycznej linii produkcyjnej;
Źródło: opracowanie własne

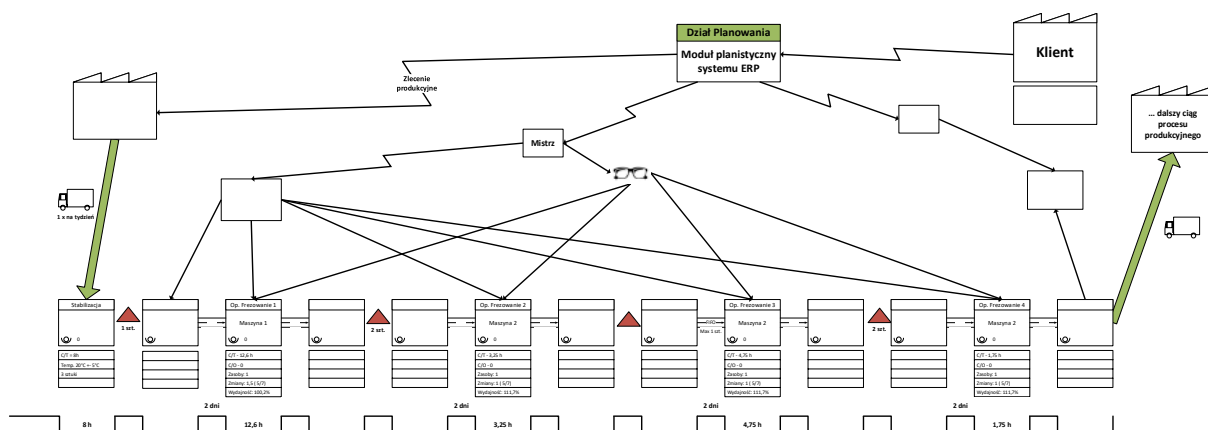
DOSTAWCA	WEJŚCIA x	Symbol [jednostka]	Sposób rejestracji	PROCES	WYJŚCIA y	Symbol [jednostka]	Sposób rejestracji	KLIENT
Centrum Logistyczne	Półfabrykat (odkuvka)	OW1 [szt.]	System ERP	Transport	Półfabrykat (odkuvka)	OW2 [szt.]	System ERP	Wydział produkcyjny
System klimatyzacji pomieszczenia	Temperatura pomieszczenia	T [°C]	Automatyczny pomiar temperatury	Stabilizacja	Temperatura 20°C +/-2°C	T [°C]	Automatyczny pomiar temperatury	Wydział produkcyjny
Miejsce odkładcze	Półfabrykat o temperaturze innej niż temperatura otoczenia	Czas [min]	Ręczny w systemie ERP	Stabilizacja	Półfabrykat o temperaturze otoczenia	Czas [min]	Ręczny w systemie ERP	Załadunek
Stabilizacja	Stanowisko załadowcze/wyładowcze	Czas [min]	Ręczny w systemie ERP	Załadunek	Półfabrykat zamontowany w przyrządzenie i gotowy do obróbki	Czas [min]	Ręczny w systemie ERP	Frezowanie 1
Załadunek	Półfabrykat zamontowany w przyrządzenie i gotowy do obróbki operacji Frezowanie 1	Czas [min]	Automatyczny	Frezowanie 1	Czas procesu	Czas [min]	Automatyczna rejestracja czasu pracy maszyny	Maszyna
Maszyna	Operacja Frezowanie 1 wykonana	Czas [min]	Automatyczna rejestracja czasu pracy maszyny	Transport	Stanowisko załadowcze/wyładowcze	Czas [min]	Automatyczny	Rozładunek
Załadunek	Półfabrykat zamontowany w przyrządzenie i gotowy do obróbki Frezowanie 2	Czas [min]	Ręczny w systemie ERP	Frezowanie 2	Czas procesu	Czas [min]	Automatyczna rejestracja czasu pracy maszyny	Maszyna
Maszyna	Operacja Frezowanie 2 wykonana	Czas [min]	Automatyczna rejestracja czasu pracy maszyny	Transport	Stanowisko załadowcze/wyładowcze	Czas [min]	Automatyczny	Rozładunek

DOSTAWCA	WEJŚCIA x	Symbol [jednostka]	Sposób rejestracji	PROCES	WYJŚCIA y	Symbol [jednostka]	Sposób rejestracji	KLIENT
Załadunek	Półfabrykat zamontowany w przyrządzenie i gotowy do obróbki Frezowanie 3	Czas [min]	Ręczny w systemie ERP	Frezowanie 3	Czas procesu	Czas [min]	Automatyczna rejestracja czasu pracy maszyny	Maszyna
Maszyna	Operacja Frezowanie 3 wykonana	Czas [min]	Automatyczna rejestracja czasu pracy maszyny	Transport	Stanowisko załadowczo/wyładowcze	Czas [min]	Automatyczny	Rozładunek
Załadunek	Półfabrykat zamontowany w przyrządzenie i gotowy do obróbki Frezowanie 4	Czas [min]	Ręczny w systemie ERP	Frezowanie 4	Czas procesu	Czas [min]	Automatyczna rejestracja czasu pracy maszyny	Maszyna
Maszyna	Operacja Frezowanie 4 wykonana	Czas [min]	Automatyczna rejestracja czasu pracy maszyny	Transport	Stanowisko załadowczo/wyładowcze	Czas [min]	Automatyczny	Rozładunek
Linia ESP	Część wykonana na gotowo	[szt.]	Ręczny w systemie ERP	Ręczny pomiar części	Wyniki pomiarów	[szt.]	Ręczny w systemie ERP	Operacja ślusarska

Wykonany diagram SIPOC został wykorzystany również do opracowania mapy przepływu strumienia wartości.

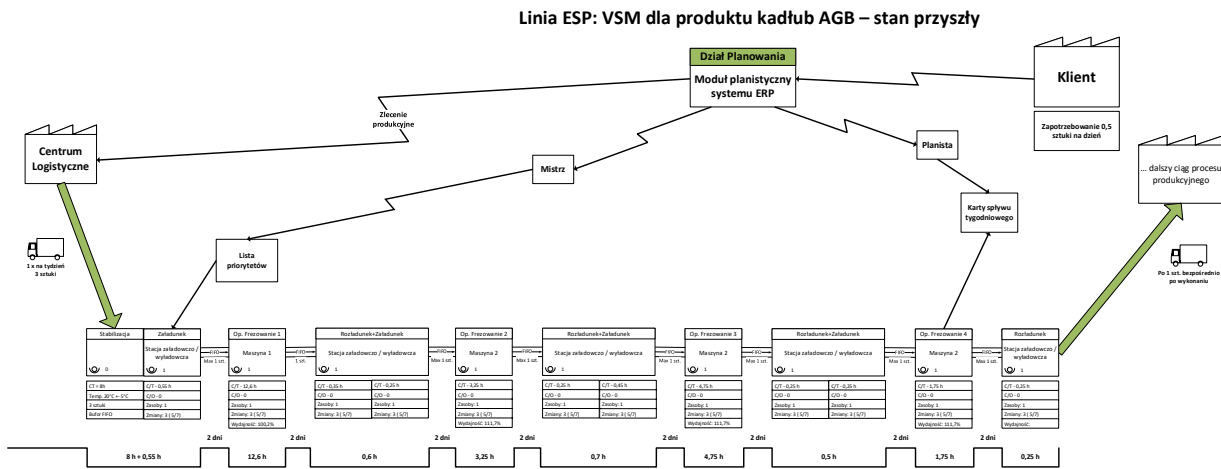
4.4. Mapa przepływu strumienia wartości

Mapę przepływu strumienia wartości dla stanu aktualnego opracowano na podstawie zidentyfikowanego przepływu produkcji w diagramie SIPOC (rysunek 4.7). Mapa zamieszczona jest również w załączniku 1 do niniejszej pracy.



Rysunek 4.7. Mapa VSM dla produktu kadłub – stan aktualny;
Źródło: opracowanie własne

Po dokonaniu analizy stanu obecnego i zaproponowaniu zmian organizacyjnych opracowano propozycję stanu przyszłego (rysunek 4.8). Mapa stanu przyszłego zamieszczona jest również w załączniku 2 do niniejszej pracy.



Rysunek 4.8. Mapa VSM dla produktu kadłub – stan przyszły;
Źródło: opracowanie własne

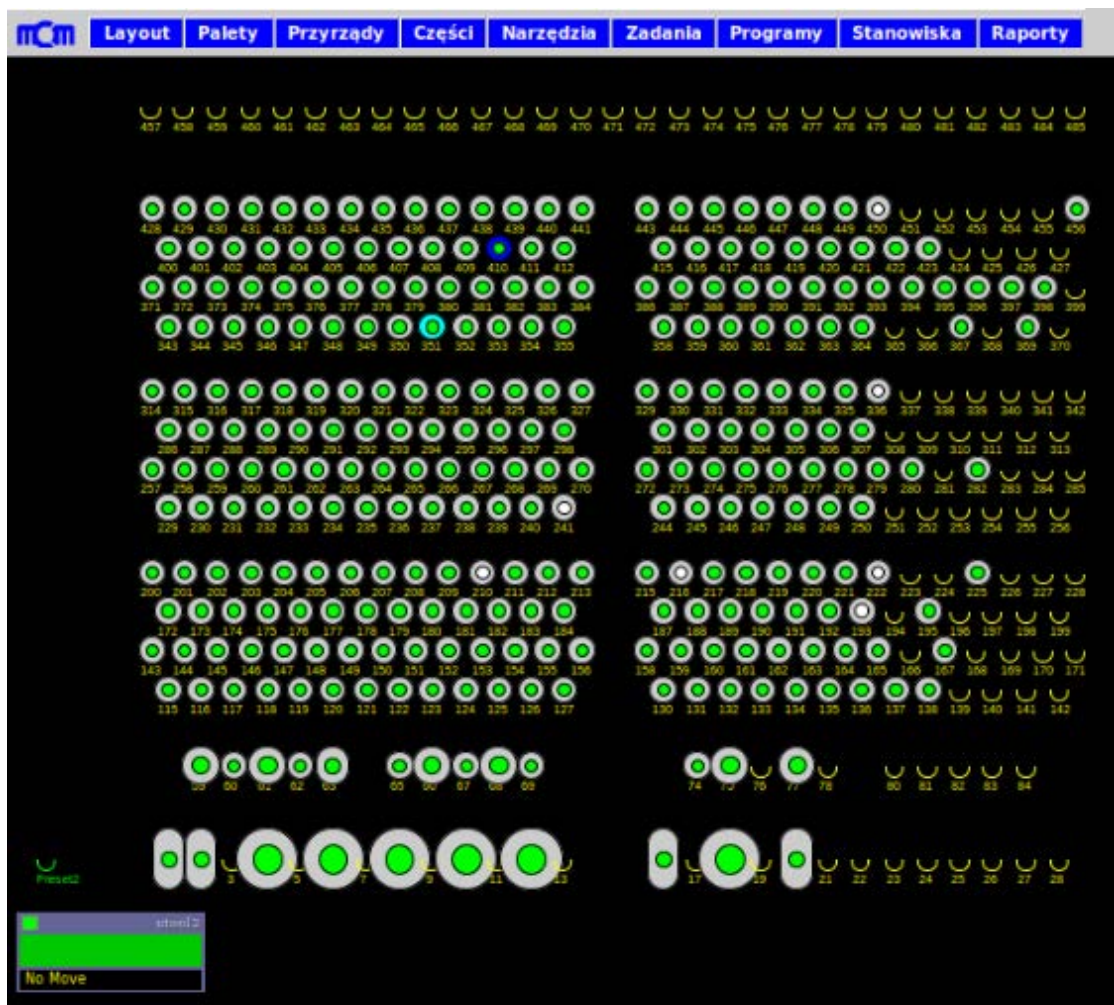
Mapa VSM dla stanu przyszłego zostanie wykorzystana podczas opracowywania wirtualnego modelu linii ESP.

4.5. Gospodarka narzędziowa

Narzędzia obróbcze stanowią kluczowy element w obróbce maszynowej. Liczba dostępnych narzędzi jest zwykle niewystarczająca do zapewnienia pełnej elastyczności linii ESP. Stosowane są dwa rozwiązania magazynów narzędzi:

- centralny magazyn narzędzi obsługujący wszystkie maszyny,
- indywidualny magazyn narzędzi przypisany do maszyny.

W prezentowanej linii ESP zastosowane jest drugie rozwiązanie. Zarządzanie gospodarką narzędziową w obrębie linii odbywa się za pomocą systemu sterowania JFMX. Wszystkie narzędzia mają unikalny numer, który jest zapisany wraz z danymi narzędzia (geometria i czas pracy) na chipie wklejonym w korpus narzędzia. Rysunek 4.9 przedstawia widok pulpitu do zarządzania narzędziami w magazynie.



Rysunek 4.9. Widok pulpitu sterowania narzędziami na linii produkcyjnej JFMX;
Źródło: system JFMX sterowania linią ESP

Rysunek 4.10 przedstawia widok rzeczywisty tego samego magazynu narzędzi. Na zdjęciu widoczny jest regał magazynu z indywidualnymi miejscami na narzędzia oraz robot, który przenosi narzędzia do strefy wymiany narzędzia podczas wykonywania operacji, jak również do strefy załadunku i rozładunku narzędzi. Pracę w strefie załadunku i rozładunku wykonuje operator obsługujący linię ESP. W ramach czynności wykonywanych przez operatora jest wymiana narzędzi ze zużytych na nowe oraz załadunek nowych narzędzi. System sterowania JFMX pozwala na wykonywanie wymian narzędzi ze zużytych na nowe podczas pracy maszyny. Minimalizuje to przerwy w pracy linii.



Rysunek 4.10. Widok magazynu narzędzi na linii ESP;
Źródło: zdjęcie własne

Narzędzia są przypisane do programów obróbczych NC i mogą występować zarówno tylko w jednym programie dla pojedynczej operacji, jak i mogą być wykorzystywane w wielu programach NC. Ważne jest, że bez względu na to w ilu programach jest wykorzystywane narzędzie danego typu i na ilu maszynach to zawsze ma ten sam niepowtarzalny numer i geometrię. Dla każdego narzędzia opracowana jest Karta Ustawcza Narzędzia w celu precyzyjnej identyfikacji składowych zestawu i podstawowych ustawień geometrii. Przykładową kartę przedstawia rysunek 4.11.

KARTA USTAWCZA NARZĘDZIA				Stanowisko robocze linki sterow.	Arkusze i sheet 1/1	UWAGI	
Numer zestawu set number		Numer części part number		00	Kierunek obrotów M3		
					Chłodziwo M8 / M7		
3			Płytki skrawająca R0.8				4
2			Głowica frezarska D50				1
1			Oprawka bazowa HSK100 L160				1
L.p.	SYMBOL PRODUCENTA	NAZWA CZĘŚCI					ILOSC

Rysunek 4.11. Karta Ustawcza Narzędzia;
Źródło: opracowanie własne na podstawie Karty Ustawczej Narzędzi

Karta Ustawcza Narzędzia jest integralną częścią technologii. Podlega nadzorowi pod względem wydania i edycji oraz jest archiwizowana razem z procesem technologicznym. Każda zmiana jest rejestrowana w celu pełnej identyfikowalności (ang. *Traceability*). Z zaprezentowanej karty usunięto dane wrażliwe producentów narzędzi skrawających oraz dane firmy.

Do zarządzania narzędziami w obszarze całej linii ESP została opracowana matryca uzbrojenia maszyn (tabela 4.2) z podziałem na poszczególne części i operacje technologiczne. Matryca jest na bieżąco aktualizowana przez technologów programistów i stanowi narzędzie do zarządzania zarówno pojemnością magazynów narzędzi, jak i optymalizacją liczby narzędzi w poszczególnych maszynach. Optymalizacja narzędzi skrawających w poszczególnych magazynach narzędzi realnie wpływa na koszty uzbrojenia, jak i poziom wykorzystania maszyn.

Tabela 4.2 Matryca uzbrojenia maszyn w narzędzia obróbcze dla poszczególnych części i operacji technologicznych – fragment;
Źródło: opracowanie własne

Nr narzędzia	Nazwa Części Numer części Nazwa narzędzia ↓ Nr operacji → Liczba narzędzi w operacji	K1				K2				K3				K4				K5		K6		P1		P2		P3		P4	
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14	
		Op.1	Op.2	Op.3	Op.4	Op.1	Op.2	Op.3	Op.4	Op.1	Op.2	Op.3	Op.4	Op.1	Op.2	Op.3	Op.4	Op.1	Op.2	Op.1	Op.2	Op.1	Op.2	Op.1	Op.2	Op.1	Op.2	Op.1	Op.2
T001	70001	1				1						1																	
T002	70002											1																	
T003	70003											1																	
T005	70005	1										1																	
T006	70006			1																									
T009	70009		1										1																
T011	70011	1										1	1																
T012	70012											1																	
T028	70028	1	1									1	1																
T030	70030					1																							
T031	70031				1																								
T034	70034	1																											
T082	70082	1	1																										
T086	70086				1																								
T105	70105			1										1															
T120	70120											1																	
T133	70133											1																	
T187	70187													1															
T201	70201														1														
T202	70202																												
T203	70203																												
T204	70204																												
T205	70205																												
T206	70206																												
T207	70207																												
T208	70208																												
T209	70209																												
T210	70210																												
T211	70211																												
T212	70212																												
T213	70213																												
T214	70214																												
T215	70215																												
T216	70216																												
T217	70217																												
T218	70218																												
T219	70219	1																											
T220	70220				1	1																							
T221	70221																												
T222	70222																												
T223	70223																												
T224	70224																												
T225	70225																												
T226	70226																												
T227	70227				1																								
T228	70228																												
T229	70229																												
T230	70230																												
T231	70231																												
T232	70232																												
T233	70233																												
T234	70234																												
T235	70235																												
T236	70236																												
T237	70237																												
T238	70238																												
T239	70239																												
T240	70240																												
T241	70241																												
T242	70242																												
T243	70243																												
T244	70244																												
T246	70246																												
T247	70247																												
T248	70248																												
T249	70249																												
T250	70250																												
T251	70251																												
T252	70252																												
T254	70254																												
T257	70257																												
T258	70258																												
T259	70259																												
T260	70260																												

Z uwagi na duży rozmiar matrycy w tabeli pokazano tylko jej niewielką część. Na dzień 15 kwietnia 2022 w obrębie całej linii ESP było zarejestrowanych 527 zestawów narzędziowych. Matryca pozwala monitorować poziom zajętości poszczególnych magazynów pod kątem możliwości wdrożenia kolejnych operacji zachowując pełną kontrolę

wykorzystywanych narzędzi. Status dostępności miejsca w poszczególnych magazynach narzędzi pokazuje tabela 4.3.

Tabela 4.3 Matryca dostępności miejsca w poszczególnych magazynach narzędzi;
Źródło: opracowanie własne

		Wolne vs zajęte miejsce w magazynie narzędzi				Dostępne miejsce w magazynie narzędzi
		M1	M2	M3	M4	
M 1	Liczba wolnych miejsc w magazynie narzędzi	285				475
	Liczba zajętych miejsc w magazynie narzędzi	190				
M 2	Liczba wolnych miejsc w magazynie narzędzi		185			475
	Liczba zajętych miejsc w magazynie narzędzi		290			
M 3	Liczba wolnych miejsc w magazynie narzędzi			153		475
	Liczba zajętych miejsc w magazynie narzędzi			322		
M 4	Liczba wolnych miejsc w magazynie narzędzi				310	475
	Liczba zajętych miejsc w magazynie narzędzi				165	

Z powyższych danych wynika, że maszyny **M1** i **M4** mają największe możliwości pod względem dobrojenia w dodatkowe zestawy narzędziowe, a co za tym idzie wdrożenie kolejnych części i operacji technologicznych na maszynach, które z tych magazynów korzystają, w celu zwiększenia elastyczności i uzyskania maksymalnego wykorzystania maszyn.

4.6. Zarządzanie danymi

Za zarządzanie danymi w obszarze linii ESP odpowiedzialny jest system JFMX. Rejestruje on pracę linii w każdym z jej elementów. Wszystkie dane są dostępne w formie raportów. Na ich podstawie można analizować pracę linii oraz dokonywać stosownych zmian w celu optymalizacji pracy poszczególnych maszyn oraz pozostałych elementów ESP.

4.7. Stosowane wskaźniki oceny

Do oceny pracy omawianego elastycznego systemu produkcyjnego z opisanych wskaźników KPI w punkcie 1.5 wybrano trzy:

- produktywność,
- wykorzystanie,
- wydajność.

Produktywność (P) jest jednym z najczęstszych używanych wskaźników do oceny efektywności pracy systemów produkcyjnych. Zalicza się do wskaźników podstawowych i wyliczana jest na podstawie czasu standardowego i czasu dostępnego (wzór 7) [56].

$$P = \frac{\sum \text{Czas standardowy}}{\sum \text{Czas dostępnny}} \quad (7)$$

Czas stanowi kluczowy parametr dla większości wskaźników. W prezentowanej linii ESP rejestracja czasu rzeczywistego odbywa się automatycznie, co w znacznym stopniu eliminuje ewentualne błędy w ocenie wskaźników. Czas standardowy jest skalkulowany przez technologa i programistę. Zawiera wszystkie czynności od założenia części do przyrzędu obróbczego, aż do zdjęcia jej po skończonej operacji i odłożenia na miejsce składowania. Zwykle w skład wystandaryzowanych czynności zalicza się uruchomienie programu NC, obsługę w trakcie ewentualnych zatrzymań realizacji programu (np. w celu usunięcia wiórów, przeprowadzenia pomiarów, wprowadzania korekcji dla narzędzi obróbczych), pomiary części po jej wykonaniu, rejestrację wymiarów rzeczywistych w systemie SPC i konserwację. W przypadku omawianej elastycznej linii produkcyjnej czas standardowy jest skalkulowany na podstawie wygenerowanego programu NC właściwego dla danej operacji technologicznej i nie zawiera powyżej opisanych czynności. Obsługa linii odbywa się tylko w obszarze stacji załadowczo-wyładowczych. Czas, który jest na to poświęcony nie wpływa na produktywność linii pod warunkiem, że jest to wykonywane w trakcie pracy maszyn. Suma czasów standardowych jest zatem sumą wszystkich czasów standardowych przypisanych do poszczególnych operacji wykonanych części w danym przedziale czasu.

Wykorzystanie (U) jest wskaźnikiem informującym o tym, w jakim stopniu dany system produkcyjny jest wykorzystywany do produkcji. Do obliczenia niezbędny jest rzeczywisty czas pracy maszyn i czas dostępnny (wzór 8) [56].

$$U = \frac{\sum \text{Czas rzeczywisty}}{\sum \text{Czas dostępnny}} \quad (8)$$

Wskaźnik wykorzystania maszyn na linii ESP będzie kluczowym wskaźnikiem w niniejszej pracy badawczej. Posłuży on do oceny zarówno stanu obecnego wdrożenia i konfiguracji elastycznej linii produkcyjnej, jak i zostanie wykorzystany w ocenie skuteczności proponowanych zmian w konfiguracji. Czas rzeczywisty pracy maszyn jest pozyskiwany bezpośrednio z systemu sterującego JFMX. Pozwala to na pozbawioną błędów ocenę poziomu wykorzystania zarówno pojedynczej maszyny jak i całej linii ESP.

Wydajność (Eff) to kolejny wskaźnik z grupy wskaźników podstawowych. Do obliczenia wymagany jest czas standardowy i czas rzeczywisty (wzór 9) [56].

$$\text{Eff} = \frac{\sum \text{Czas standardowy}}{\sum \text{Czas rzeczywisty}} \quad (9)$$

Czas standardowy jest stosowany między innymi do celów planistycznych oraz do wykonania wyceny wyrobu. Od dokładności, z jaką jest skalkulowany decyduje jakość planowania produkcji. W przypadku analizowanej elastycznej linii produkcyjnej czas rzeczywisty jest automatycznie rejestrowany dla każdej z maszyn przez system JFMX, co wyklucza jakiegokolwiek błędy w ocenie wskaźnika. Wydajność 100% oznaczać będzie zatem, że czas standardowy jest równy czasowi rzeczywistemu. W przypadku, gdy proces produkcyjny jest realizowany w cyklu automatycznym bez wpływu człowieka to można przyjąć czas standardowy za rzeczywisty. Czas standardowy jest zatem użyty tylko na początku opracowywania procesu technologicznego, a po wdrożeniu i optymalizacji powinien być rekalkulowany do czasu rzeczywistego.

5. Prezentacja problemu badawczego / problemów występujących na linii

Problem badawczy występujący na elastycznej linii produkcyjnej jest odzwierciedlony w postawionym celu dla niniejszej pracy i jest związany z brakiem optymalnej organizacji pracy linii. Niewłaściwa organizacja pracy linii uniemożliwia osiągnięcie maksymalnego stopnia wykorzystania czasu pracy maszyn (wskaźnik U), nie pozwala na zoptymalizowanie czasu przejścia wyrobu przez cały proces produkcyjny w obszarze elastycznego systemu produkcyjnego (wskaźnik LT) oraz nie pozwala na minimalizowanie kosztów utrzymania produkcji w toku (wskaźnik WIP). Wszystkie te elementy powodują, że niemożliwe staje się poprawne zaplanowanie produkcji pod przyszłe zwiększone potrzeby klienta.

Do rozwiązania problemów występujących na linii ESP niezbędne jest zrealizowanie wszystkich dziewięciu celów cząstkowych oraz zadań szczegółowych postawionych w rozdziale 2. Wykonane w tym celu eksperymenty dadzą odpowiedź i rekomendację do podjęcia decyzji, który kierunek optymalizacji elastycznej linii produkcyjnej będzie właściwy.

6. Przygotowanie do badań

6.1. Przygotowanie narzędzi do zbierania danych

Dane niezbędne do przeprowadzenia badań pochodzą z kilku źródeł i obejmują:

- **System ERP:**
 - potrzeby klienta wyrażone w liczbie zamówionych części ulokowane na osi czasu jako terminy dostaw,
 - zlecenia produkcyjne generowane na podstawie planu produkcyjnego i procesu technologicznego.
- **Proces technologiczny:**
 - układ operacji technologicznych występujących w ściśle określonej kolejności, indywidualny dla każdej części,
 - ustandaryzowany czas jednostkowy dla wszystkich operacji występujących w procesie technologicznym.
- **System sterowania linią ESP** – program komputerowy **JFMX** wraz z zestawem komputerów i sterowników do zarządzania linią ESP oraz automatycznego zapisu parametrów i zdarzeń:
 - identyfikacja maszyny, na której wykonywana jest określona operacja,
 - rzeczywisty czas trwania operacji,
 - rzeczywisty czas trwania awarii,
 - liczba wykonanych części.

Zamówienia klienta wraz z wymaganymi terminami dostaw są eksportowane z zamówień do systemu ERP. Następnie na podstawie standardowych cykli produkcyjnych, które są zdefiniowane w systemie, generowane są zlecenia produkcyjne. Po dostarczeniu zlecenia wraz z półfabrykatami na linię ESP, każde zlecenie z chwilą rozpoczęcia pierwszej operacji jest rejestrowane w systemie sterowania linią **JFMX**. Rozpoczęcie pierwszej operacji procesu produkcyjnego jest powiązane z załadunkiem półfabrykatu na przyrząd obróbczy w jednej ze stacji załadowczo-wyładowczej. Zakończenie zlecenia w obszarze linii ESP jest równoznaczne ze zdemontowaniem i odłożeniem na miejsce odkładcze wyrobu po ostatniej operacji procesu produkcyjnego.

6.2. Przygotowania danych historycznych do analizy

Dane historyczne do analizy zostały pobrane z systemu JFMX i zapisane w formie tygodniowych raportów wygenerowanych automatycznie. Obejmują okres od 9 sierpnia 2021 roku do 15 kwietnia 2022 roku. Pliki z danymi zapisywane są w formacie *.html. Zawierają one trzy grupy danych:

- produkcja – dane dotyczące czasu wykonania kompletnych części (raport typu *Produkcja*),
- obróbki – dane dotyczące czasu wykonania poszczególnych operacji (raport typu *Obróbki*),
- wydział – dane dotyczące wykorzystania czasu dostępnego maszyn (raport typu *Wydział*).

Wszystkie dane z raportów zostały poddane analizie i zapisane w plikach Excel, w których dokonano szczegółowej analizy.

Raport typu *Produkcja* prezentuje dane, które są sumą czasów obróbki mechanicznej wszystkich części wykonanych w wybranym przedziale czasu (Tabela 6.1). Liczba części w kolumnie *Obróbki* jest sumą części z kolumn *Wykonane* i *Wykonane z błędem* (ang. *Faileds*). Liczba części w kolumnie *Wykonane* oznacza liczbę części wykonanych bez zakłóceń w trakcie realizacji programu NC (ang. *Numerical Control*), natomiast liczba części w kolumnie *Faileds* oznacza liczbę części, gdzie podczas realizacji programu NC wystąpiły zakłócenia/anomalie, bez wpływu na jakość wykonywanej części. Mogły to być zarówno awarie, które skutkowały zatrzymaniem realizacji programu, jak również informacja z jednego ze sterowników urządzenia peryferyjnego (np. chłodziarka chłodziwa, transporter wiórów itp.) o nieprawidłowym działaniu bez zatrzymania programu. Należy wspomnieć, że linia ESP w okresie, z którego pochodzą dane historyczne była w trakcie instalacji i uruchomienia ostatniej czwartej maszyny. Trwały testy poprawności działania wszystkich elementów linii po jej skompletowaniu oraz testy i wdrożenie poszczególnych operacji technologicznych. Czas trwania wdrażanego programu obróbczego jest kilkukrotnie dłuższy niż docelowy czas obróbki. Wymaga wielu zatrzymań programu, kontroli parametrów i nanoszenia poprawek. To również skutkowało zarejestrowaniem przez system JFMX zakłóceń. Informacje te zostały wyfiltrowane i rekordy zawierające te dane zostały wyeliminowane z zestawu danych historycznych. Do analizy natomiast użyto tylko te, które są zapisane w trybie pracy

automatycznej bez żadnych przerw i zakłóceń. Tabela 6.1 przedstawia przykład raportu tygodniowego (7 dni kalendarzowych) dla danych typu *Produkcja*.

Tabela 6.1. Przykład raportu tygodniowego danych typu *Produkcja* z systemu JFMX;
Źródło: system JFMX sterowania linią ESP

Raport: 31_10_2021.jl1-00641 Go ◀ ▶									
Autor:		Firma:		z: 21-10-31 23:00		Czas Trwania: 7 d 00 h 00 m 00 s			
Data: 2021-11-08 02:00:02		Wydział:		do: 21-11-07 23:00					
Produkcja									
Zadanie	Obróbki	Wykonane	FAILED	Zaladowana	Czas Obróbki	średni Czas	Czas efektywny	Czas Zaladunku	
10281940.91C28501.500	8	8	0	0	0 d 02 h 16 m 57 s	0 d 00 h 17 m 08 s	0 d 02 h 16 m 54 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10281968.91C02404.202	4	1	3	0	0 d 08 h 49 m 43 s	0 d 08 h 49 m 43 s	0 d 05 h 33 m 54 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284303.92C02803.450	2	1	1	0	0 d 04 h 42 m 41 s	0 d 04 h 42 m 41 s	0 d 04 h 26 m 43 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284303.92C02803.550	1	1	0	0	0 d 01 h 30 m 55 s	0 d 01 h 30 m 55 s	0 d 01 h 29 m 56 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284304.92C02803.450	1	1	0	0	0 d 04 h 46 m 23 s	0 d 04 h 46 m 23 s	0 d 04 h 33 m 48 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284304.92C02803.550	1	1	0	0	0 d 01 h 28 m 49 s	0 d 01 h 28 m 49 s	0 d 01 h 28 m 48 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284439.91C02304.250	4	4	0	0	1 d 02 h 17 m 17 s	0 d 06 h 35 m 17 s	1 d 01 h 41 m 15 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284439.91C02304.550	5	5	0	0	0 d 06 h 04 m 43 s	0 d 00 h 42 m 04 s	0 d 06 h 04 m 40 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284722.91C28501.200	2	2	0	0	0 d 03 h 22 m 29 s	0 d 01 h 41 m 14 s	0 d 03 h 22 m 28 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284722.91C28501.500	8	8	0	0	0 d 02 h 16 m 45 s	0 d 00 h 17 m 05 s	0 d 02 h 16 m 42 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284724.91C28501.200	8	8	0	0	0 d 13 h 27 m 02 s	0 d 01 h 40 m 52 s	0 d 13 h 26 m 59 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284724.91C28501.500	8	8	0	0	0 d 02 h 24 m 38 s	0 d 00 h 17 m 04 s	0 d 02 h 16 m 34 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284725.92C00105.200	2	2	0	0	0 d 03 h 30 m 50 s	0 d 01 h 45 m 25 s	0 d 03 h 30 m 49 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10284725.92C00105.500	6	6	0	0	0 d 02 h 26 m 06 s	0 d 00 h 24 m 21 s	0 d 02 h 26 m 04 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285187.91C02304.250	3	3	0	0	0 d 20 h 06 m 39 s	0 d 06 h 48 m 02 s	0 d 19 h 19 m 23 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285187.91C02304.550	2	2	0	0	0 d 01 h 24 m 17 s	0 d 00 h 42 m 08 s	0 d 01 h 24 m 16 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285680.92C02803.201_F1	1	1	0	0	0 d 02 h 00 m 52 s	0 d 02 h 00 m 52 s	0 d 01 h 42 m 35 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285680.92C02803.201_F2	1	1	0	0	0 d 11 h 52 m 10 s	0 d 11 h 52 m 10 s	0 d 11 h 49 m 00 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285680.92C02803.201_F3	1	1	0	0	0 d 00 h 35 m 26 s	0 d 00 h 35 m 26 s	0 d 00 h 35 m 26 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285680.92C02803.350	1	1	0	0	0 d 02 h 14 m 03 s	0 d 02 h 14 m 03 s	0 d 02 h 14 m 03 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285680.92C02803.450	2	1	1	0	0 d 05 h 11 m 32 s	0 d 05 h 11 m 32 s	0 d 04 h 31 m 24 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285680.92C02803.550	1	1	0	0	0 d 01 h 24 m 49 s	0 d 01 h 24 m 49 s	0 d 01 h 24 m 48 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285820.92C09204.201_F1	1	1	0	0	0 d 00 h 05 m 47 s	0 d 00 h 05 m 47 s	0 d 00 h 05 m 47 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285820.92C09204.201_F2	1	1	0	0	0 d 00 h 47 m 37 s	0 d 00 h 47 m 37 s	0 d 00 h 46 m 42 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285820.92C09204.301	1	1	0	0	0 d 00 h 21 m 40 s	0 d 00 h 21 m 40 s	0 d 00 h 15 m 02 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285820.92C09204.401_F1	1	1	0	0	0 d 03 h 52 m 08 s	0 d 03 h 52 m 08 s	0 d 02 h 40 m 18 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285820.92C09204.401_F2	1	1	0	0	0 d 01 h 28 m 20 s	0 d 01 h 28 m 20 s	0 d 01 h 28 m 18 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285820.92C09204.501	1	1	0	0	0 d 01 h 03 m 47 s	0 d 01 h 03 m 47 s	0 d 01 h 03 m 46 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285821.92C09204.201_F1	1	1	0	0	0 d 00 h 05 m 50 s	0 d 00 h 05 m 50 s	0 d 00 h 05 m 49 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285821.92C09204.201_F2	1	1	0	0	0 d 00 h 42 m 48 s	0 d 00 h 42 m 48 s	0 d 00 h 42 m 47 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285821.92C09204.301	1	1	0	0	0 d 01 h 03 m 46 s	0 d 01 h 03 m 46 s	0 d 00 h 23 m 52 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285822.92C09204.201_F1	1	1	0	0	0 d 00 h 05 m 46 s	0 d 00 h 05 m 46 s	0 d 00 h 05 m 45 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285822.92C09204.201_F2	1	1	0	0	0 d 00 h 46 m 04 s	0 d 00 h 46 m 04 s	0 d 00 h 44 m 46 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285944.92C00105.200	4	4	0	0	0 d 06 h 59 m 57 s	0 d 01 h 45 m 06 s	0 d 06 h 59 m 55 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285945.91C28501.200	8	8	0	0	0 d 13 h 38 m 27 s	0 d 01 h 40 m 55 s	0 d 13 h 28 m 07 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285945.91C28501.500	2	1	1	0	0 d 00 h 32 m 55 s	0 d 00 h 32 m 55 s	0 d 00 h 32 m 26 s	0 d 00 h 00 m 00 s	
10285946.91C28501.200	8	8	0	0	0 d 13 h 55 m 55 s	0 d 01 h 41 m 20 s	0 d 13 h 40 m 14 s	0 d 00 h 00 m 00 s	

Raport typu *Obróbki* to dane przedstawiające czas wykonania poszczególnych operacji ze zleceń produkcyjnych wykonanych w wybranym przedziale czasu. Kolumny *Data Początkowa* i *Data Zakoń.* to odpowiednio data i godzina startu oraz data i godzina zakończenia wykonywania operacji zarejestrowana automatycznie przez system JFMX. Kolumna *MC* prezentuje numer maszyny, na której wykonywana była operacja, a kolumna *Zadanie* wskazuje

na numer zlecenia produkcyjnego, części i operacji. Kolumna *Przyrząd* wskazuje numer przyrządu, na którym była wykonywana operacja. Liczba części w kolumnie *Części* jest zawsze 1 co oznacza, że w przyrządzie jest mocowana zawsze tylko jedna część. Kolumna *Status* prezentuje stan realizacji zadania natomiast kolumna *Problemy* przedstawia jakość przebiegu programu obróbczego. Do analizy danych historycznych, tak jak w przypadku raportu typu *Produkcja*, użyto tylko tych, których przebieg był bez zakłóceń. Zakłócenia były spowodowane głównie przez czynniki zewnętrzne, takie jak prace instalacyjne i wdrożeniowe. Brak ich wyeliminowania spowodowałby błędną interpretację danych historycznych. Tabela 6.2 przedstawia przykład raportu tygodniowego (7 dni kalendarzowych) dla typu danych *Obróbki*.

Tabela 6.2. Przykład raportu tygodniowego danych typu *Obróbki* z systemu JFMX;
Źródło: system JFMX sterowania linią ESP

Raport: 31_10_2021.jl1-00641 Go ◀ ▶									
Autor:		Firma:	z: 21-10-31 23:00	Czas Trwania: 7 d 00 h 00 m 00 s					
Data: 2021-11-08 02:00:02		Wydział:	do: 21-11-07 23:00						
Obróbki									
Data Początkowa	Data Zakoń.	MC	Zadanie	Przyrząd	Części	Status	Problemy	Efektywny	Czas teoret.
21-11-02 12:57:52	21-11-02 13:15:23	mc1	10281940.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-02 13:31:53	21-11-02 13:48:58	mc1	10281940.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-02 14:08:48	21-11-02 14:25:49	mc1	10281940.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-02 14:41:02	21-11-02 14:58:04	mc1	10281940.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-02 15:18:01	21-11-02 15:35:04	mc1	10281940.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-02 16:18:06	21-11-02 16:35:11	mc1	10281940.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-02 16:52:01	21-11-02 17:09:07	mc1	10281940.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-02 17:26:17	21-11-02 17:43:21	mc1	10281940.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-02 17:51:30	21-11-02 19:32:57	mc1	10284722.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,31%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-02 19:46:44	21-11-02 21:27:46	mc1	10284722.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,73%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-02 23:12:47	21-11-03 00:53:30	mc1	10284724.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	102,05%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-03 01:06:33	21-11-03 02:47:21	mc1	10284724.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,97%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-03 03:06:29	21-11-03 04:47:11	mc1	10284724.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	102,08%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-03 05:02:44	21-11-03 06:43:27	mc1	10284724.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	102,06%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-03 07:00:34	21-11-03 08:41:36	mc1	10284724.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,72%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-03 09:07:45	21-11-03 09:24:53	mc1	10284722.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-03 09:59:36	21-11-03 10:16:42	mc1	10284722.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-03 11:09:57	21-11-03 11:27:01	mc1	10284722.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-03 12:19:06	21-11-03 12:36:11	mc1	10284722.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-03 12:50:33	21-11-03 13:07:37	mc1	10284722.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-03 13:30:02	21-11-03 13:47:10	mc1	10284722.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-03 14:09:26	21-11-03 14:26:31	mc1	10284722.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-03 14:43:51	21-11-03 15:00:56	mc1	10284722.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-03 15:01:47	21-11-03 16:42:45	mc1	10284724.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,82%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-03 17:42:37	21-11-03 19:23:44	mc1	10284724.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,64%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-03 19:41:48	21-11-03 21:22:47	mc1	10284724.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,78%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-03 22:36:26	21-11-04 00:17:22	mc1	10285945.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,83%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-04 00:37:58	21-11-04 02:30:12	mc1	10285945.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	Alarm	100,85%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-04 02:52:05	21-11-04 04:32:47	mc1	10285945.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	102,07%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-04 04:46:15	21-11-04 06:26:55	mc1	10285945.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	102,10%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-04 06:47:00	21-11-04 08:27:55	mc1	10285945.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,85%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-04 10:11:49	21-11-04 10:28:53	mc1	10284724.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-04 10:35:07	21-11-04 12:16:07	mc1	10285945.91C28501.200	F-431/1	1	Zakończony	OK	101,76%	0 d 01 h 42 m 47 s
21-11-04 13:20:01	21-11-04 13:45:07	mc1	10284724.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	Lokalny	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-04 14:22:16	21-11-04 14:39:20	mc1	10284724.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-04 14:52:39	21-11-04 15:09:42	mc1	10284724.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-04 15:28:52	21-11-04 15:45:56	mc1	10284724.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s
21-11-04 16:39:50	21-11-04 16:56:54	mc1	10284724.91C28501.500	F-432/1	1	Zakończony	OK	0,00%	0 d 00 h 00 m 00 s

Raport typu *Wydział* prezentuje dane zbiorcze i indywidualne dla wszystkich maszyn elastycznego systemu produkcyjnego w wybranym przedziale czasu. Kolumna *Status* dzieli czas dostępny na cztery kategorie:

- Przestój Planowany: suma czasów wyłączenia zasilania i planowanych przeglądów,
- Przestój Nieplanowany: suma czasów przestojów spowodowanych awariami, oczekiwaniem na służby utrzymania ruchu (ang. *Maintenance*) i nieplanowanymi przeglądami,
- Oczekiwanie: suma czasów przestojów nie będących przestojami nieplanowanymi, takich jak przestój poza produkcją, oczekiwanie na narzędzia lub przyrządy, tryb oszczędzania energii (ang. *Standby*) i inne,
- Produkcja: suma czasów, jakie maszyna/maszyny poświęciły na produkcję.

Na podstawie tych danych został obliczony procentowy udział poszczególnych statusów w odniesieniu do czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu. Tabela 6.3 przedstawia przykład raportu tygodniowego (7 dni kalendarzowych) dla danych typu *Wydział* dla wszystkich maszyn z linii ESP.

Tabela 6.3. Przykład raportu tygodniowego danych typu *Wydział* z systemu JFMX dla wszystkich maszyn elastycznego systemu produkcyjnego;
Źródło: system JFMX sterowania linią ESP

Status	Czas	%	Bar
Niezmana	0 d 00 h 51 m 34 s	0.13	
Przestój Planowany	15 d 19 h 41 m 50 s	56.5	
Wylącz. Zasilania	15 d 19 h 41 m 50 s	56.5	
Planowany Maintenance	0 d 00 h 00 m 00 s	0.0	
Przestój Nieplanowany	0 d 09 h 05 m 30 s	1.35	
Alarm	0 d 09 h 05 m 30 s	1.35	
Oczekiwanie na Maintenance	0 d 00 h 00 m 00 s	0.0	
Nieplanowany Maintenance	0 d 00 h 00 m 00 s	0.0	
Oczekiwanie	2 d 02 h 36 m 07 s	7.53	
Poza Produkcją	0 d 01 h 21 m 47 s	0.2	
Oczekiwanie na Narzędzia	0 d 01 h 01 m 07 s	0.15	
Oczekiwanie na Przyrządy	1 d 18 h 02 m 52 s	6.26	
STANDBY_WP	0 d 04 h 11 m 30 s	0.62	
Inne	0 d 00 h 12 m 42 s	0.03	
Lokalne	0 d 01 h 46 m 09 s	0.26	
Produkcja	9 d 15 h 44 m 59 s	34.49	
W Obróbce	8 d 18 h 01 m 58 s	31.25	
W Ruchu	0 d 03 h 52 m 51 s	0.58	
Lokalny	0 d 17 h 50 m 10 s	2.65	

Jak widać z tabeli 6.3 dominującym statusem (zdarzeniem) jest Przesztyj Planowany, który odzwierciedla brak napełnienia produkcji, jakie miało miejsce w przedstawionym przedziale czasu. Tabela 6.4 przedstawia przykład raportu tygodniowego (7 dni kalendarzowych) dla danych typu *Wydział* indywidualnie dla każdej z maszyn. Na tej podstawie można szybko ocenić poziom wykorzystania każdej z nich. Jest to bezpośrednio powiązane ze stanem wdrożeń operacji technologicznych dla poszczególnych części.

Tabela 6.4. Przykład raportu tygodniowego danych typu *Wydział* z systemu JFMX indywidualnie dla każdej z maszyn elastycznego systemu produkcyjnego;
Źródło: system JFMX sterowania linią ESP

Status	Czas	%	Bar
Przesztyj Planowany	3 d 09 h 33 m 43 s	48.55	
Wylącz. Zasilania	3 d 09 h 33 m 43 s	48.55	
Planowany Maintenance	0 d 00 h 00 m 00 s	0.0	
Przesztyj Nieplanowany	0 d 01 h 20 m 59 s	0.8	
Alarm	0 d 01 h 20 m 59 s	0.8	
Oczekiwanie na Maintenance	0 d 00 h 00 m 00 s	0.0	
Nieplanowany Maintenance	0 d 00 h 00 m 00 s	0.0	
Oczekiwanie	0 d 23 h 46 m 50 s	14.16	
Poza Produkcją	0 d 00 h 30 m 41 s	0.3	
Oczekiwanie na Narzędzia	0 d 00 h 24 m 00 s	0.24	
Oczekiwanie na Przyrządy	0 d 19 h 21 m 49 s	11.53	
STANDBY_WP	0 d 02 h 25 m 30 s	1.44	
Inne	0 d 00 h 03 m 07 s	0.03	
Lokalne	0 d 01 h 01 m 43 s	0.61	
Produkcja	2 d 13 h 18 m 28 s	36.49	
W Obróbce	2 d 09 h 49 m 43 s	34.42	
W Ruchu	0 d 02 h 26 m 53 s	1.46	
Lokalny	0 d 01 h 01 m 52 s	0.61	

Stany Stanowiska: [mc1](#)

Status	Czas	%	Bar
Przesztyj Planowany	3 d 00 h 46 m 28 s	43.32	
Wylącz. Zasilania	3 d 00 h 46 m 28 s	43.32	
Planowany Maintenance	0 d 00 h 00 m 00 s	0.0	
Przesztyj Nieplanowany	0 d 01 h 53 m 36 s	1.13	
Alarm	0 d 01 h 53 m 36 s	1.13	
Oczekiwanie na Maintenance	0 d 00 h 00 m 00 s	0.0	
Nieplanowany Maintenance	0 d 00 h 00 m 00 s	0.0	
Oczekiwanie	0 d 11 h 10 m 09 s	6.65	
Poza Produkcją	0 d 00 h 09 m 22 s	0.09	
Oczekiwanie na Narzędzia	0 d 00 h 02 m 59 s	0.03	
Oczekiwanie na Przyrządy	0 d 09 h 17 m 09 s	5.53	
STANDBY_WP	0 d 00 h 52 m 49 s	0.52	
Inne	0 d 00 h 03 m 25 s	0.03	
Lokalne	0 d 00 h 44 m 25 s	0.44	
Produkcja	3 d 10 h 09 m 47 s	48.91	
W Obróbce	3 d 06 h 04 m 15 s	46.47	
W Ruchu	0 d 00 h 37 m 26 s	0.37	
Lokalny	0 d 03 h 28 m 06 s	2.06	

Stany Stanowiska: [mc2](#)

Raporty *Obróbki* i *Wydział* przedstawione w niniejszym rozdziale zostały wykorzystane w analizie danych historycznych.

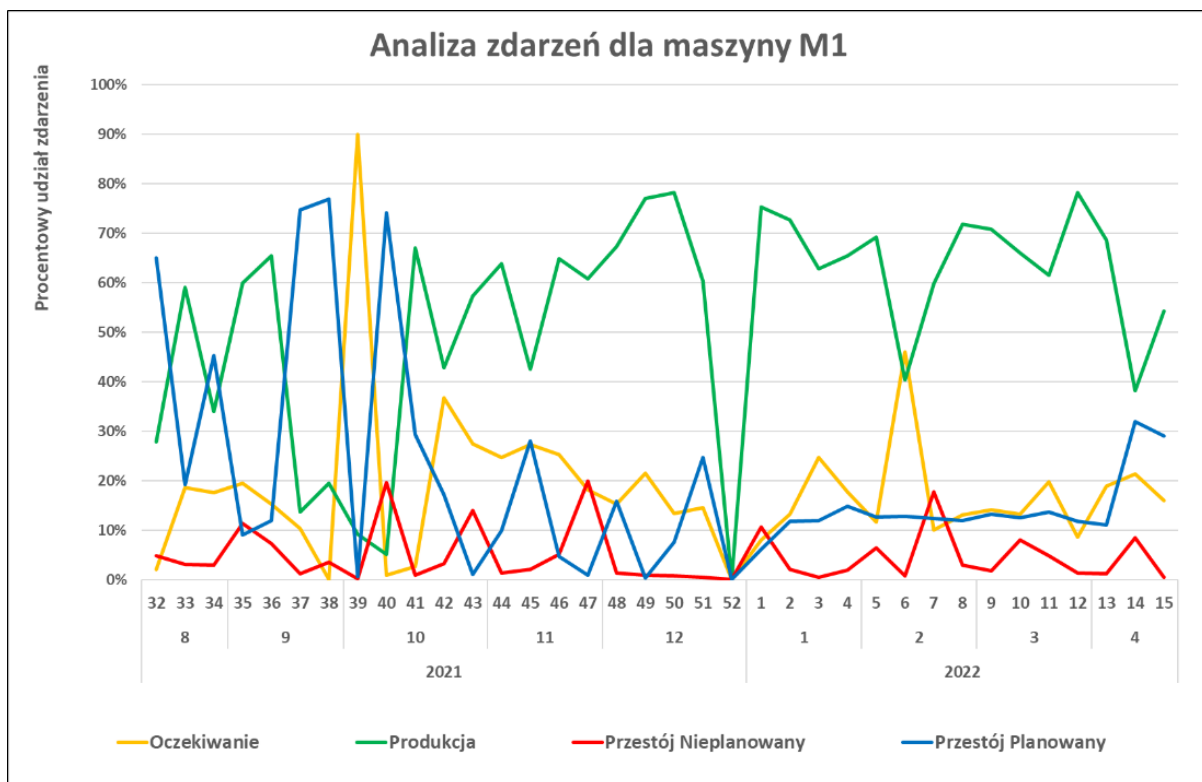
6.3. Analiza danych historycznych

Dane historyczne z linii ESP, które zostały poddane analizie pochodzą z okresu od 9 sierpnia 2021 do 15 kwietnia 2022. W analizie wykorzystane zostały dwa raporty z systemu **JFMX**. Raport typu *Obróbki* (tabela 6.2), w którym zawarte są szczegóły związane z czasem wykonania poszczególnych operacji zleceń produkcyjnych wykonanych na elastycznej linii produkcyjnej oraz raport typu *Wydział* (tabele 6.3 i 6.4) przedstawia dane zbiorcze i szczegółowe dla wszystkich maszyn linii. Celem analizy danych historycznych było zdefiniowanie na ich podstawie danych wejściowych do wirtualnego modelu linii ESP.

Wszystkie dane historyczne w pierwszej kolejności zostały poddane analizie poprawności danych. Do dalszych analiz zostały wybrane tylko te dane historyczne, podczas rejestracji których nie pojawiły się błędy. Błędy w rejestracji danych, jak wspomniano wcześniej były wynikiem prac instalacyjnych i konfiguracyjnych linii oraz awarii maszyny/maszyn lub innych elementów linii ESP mających wpływ na poprawny przebieg obróbki. Było to efektem procesu uruchamiania i konfiguracji maszyn oraz poszczególnych elementów elastycznej linii produkcyjnej, takich jak magazyn palet, stacje załadowczo-wyładowcze, czy magazyny narzędzi. Należy wspomnieć, że linia ESP będąca obiektem badań jest w ciągłym etapie konfiguracji i uruchamiania. Ostatnia maszyna została dostarczona, zainstalowana i uruchomiona w październiku 2021. Od tego czasu zostały rozpoczęte intensywne prace związane z uzbrajaniem maszyn (w narzędzia skrawające i palety z oprzyrządowaniem mocującym półfabrykaty) oraz wdrażaniem poszczególnych operacji technologicznych. Praca na linii ESP była uzależniona od liczby zamówionych części przez klienta. Spadek zamówień spowodowany kryzysem w branży lotniczej (COVID 19) mocno się odbił się na poziomie produkcji. Założeniem dla Linii ESP podczas podejmowania decyzji o jej zakupie było, że będzie pracować w trybie ciągłym (7 dni w tygodniu, 3 zmiany) od początku 2020 roku. Wykorzystanie dla wszystkich maszyn planowane było na poziomie 86%. Negatywne skutki kryzysu nie pozwoliły zrealizować pierwotnego planu. W analizowanym okresie czasu poziom wykorzystania dla całej linii ESP nie przekraczał średnio 41%. Całkowity czas dostępny został obliczony na podstawie dostępności operatorów i wynosił w okresie od 9 sierpnia 2021 do 9 stycznia 2022 średnio 120 godzin tygodniowo (3 zmiany, 5 dni

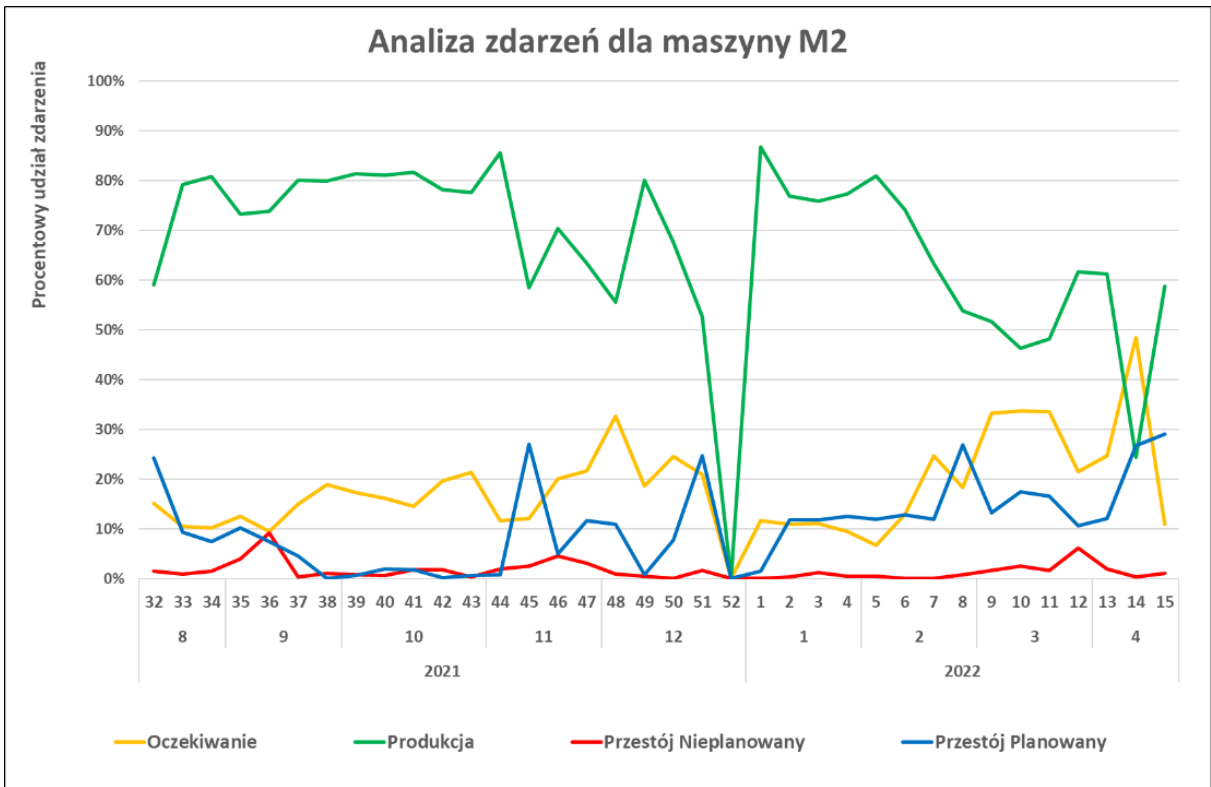
w tygodniu), a od 10 stycznia 2022 do 15 kwietnia 2022 średnio 144 godziny tygodniowo (3 zmiany, 6 dni w tygodniu).

Rysunki odpowiednio 6.1 dla maszyny M1, 6.2, dla maszyny M2, 6.3 dla maszyny M3, 6.4 dla maszyny M4 i 6.5 dla całej linii ESP przedstawiają na wykresach procentowy udział zdarzeń w całkowitym dostępnym czasie dla linii. Poprzez zdarzenie zdefiniowany jest rodzaj wykorzystanego czasu dostępnego. Zdarzenie *Produkcja* odpowiada poziomowi wykorzystania maszyn i jest sumą czasu poświęconego przez maszyny na obróbkę części.



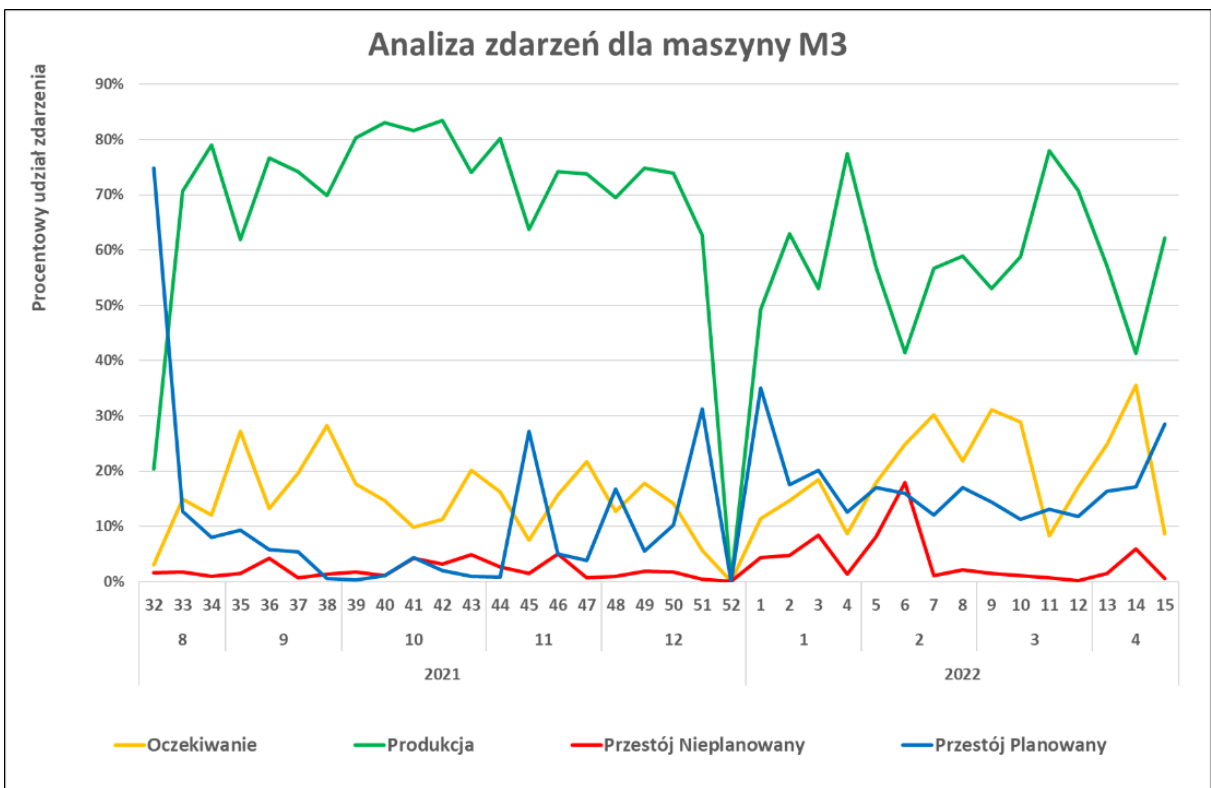
Rysunek 6.1. Procentowy udział zdarzeń dla maszyny M1 w odniesieniu do czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu;

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych



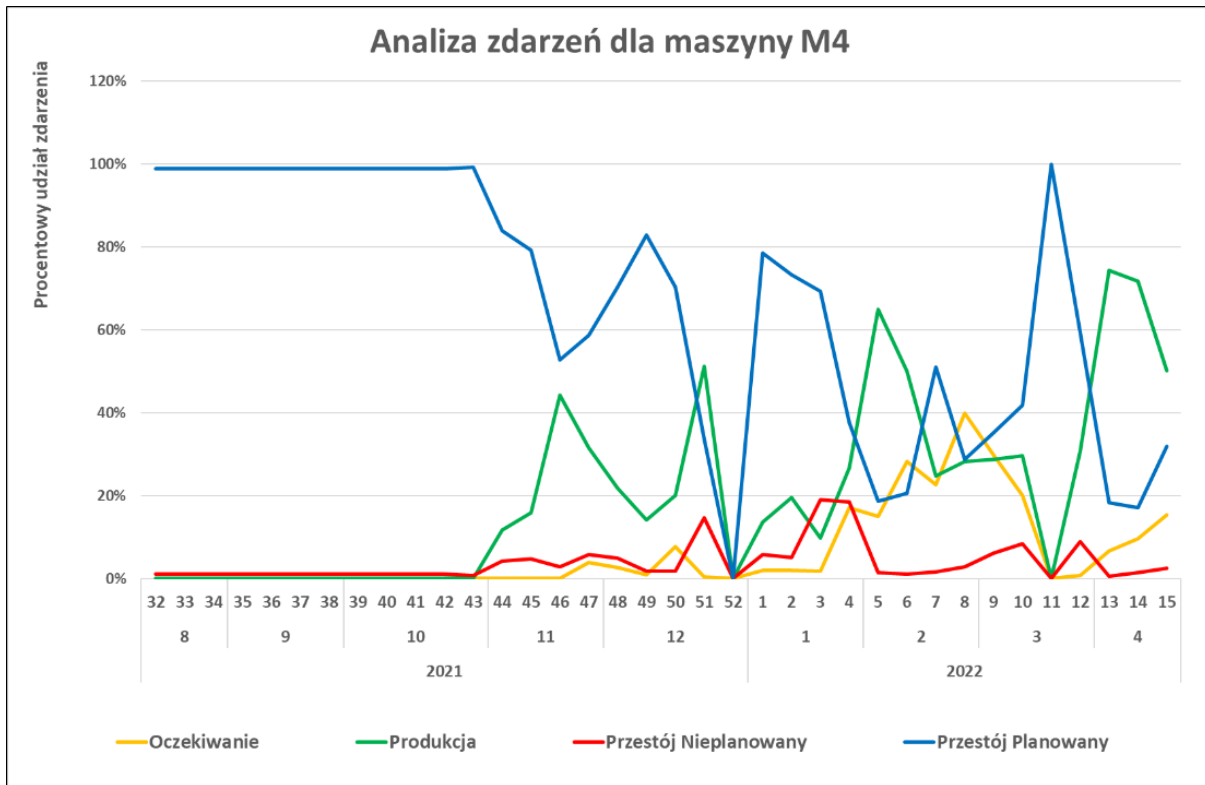
Rysunek 6.2. Procentowy udział zdarzeń dla maszyny **M2** w odniesieniu do czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu;

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych

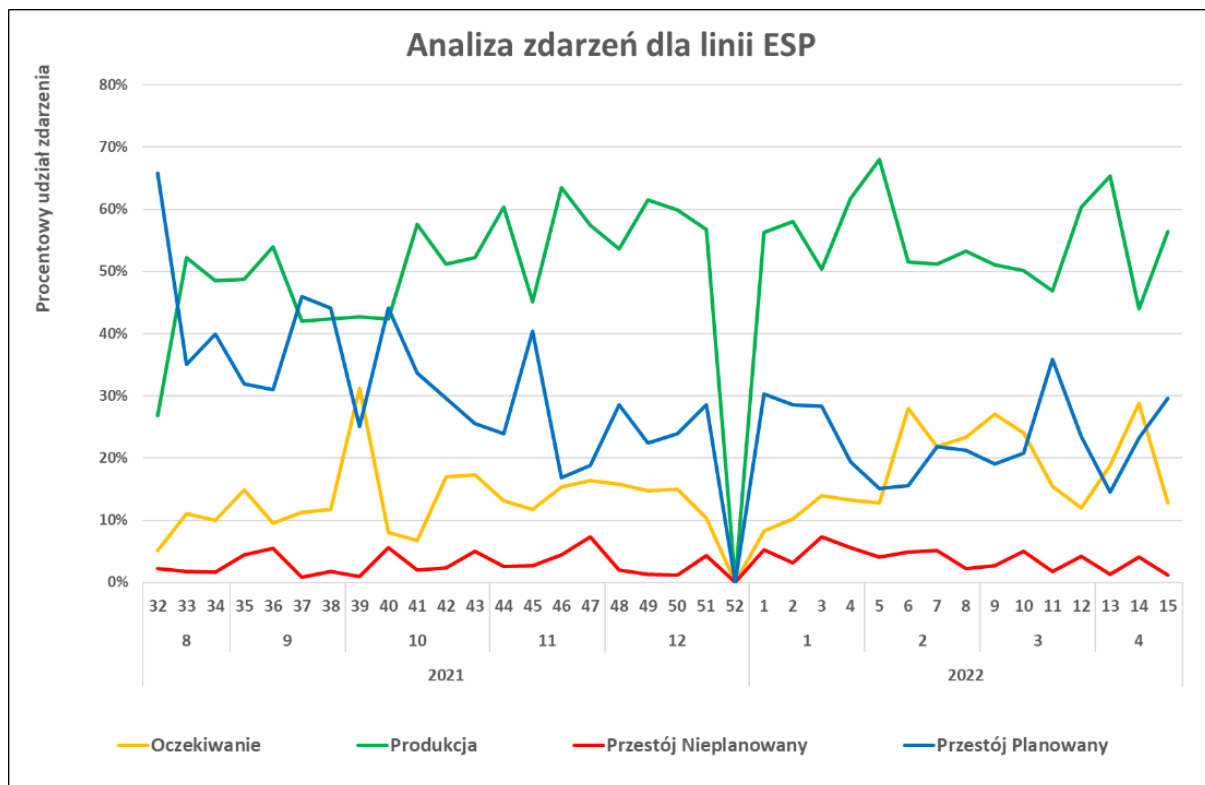


Rysunek 6.3. Procentowy udział zdarzeń dla maszyny **M3** w odniesieniu do czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu;

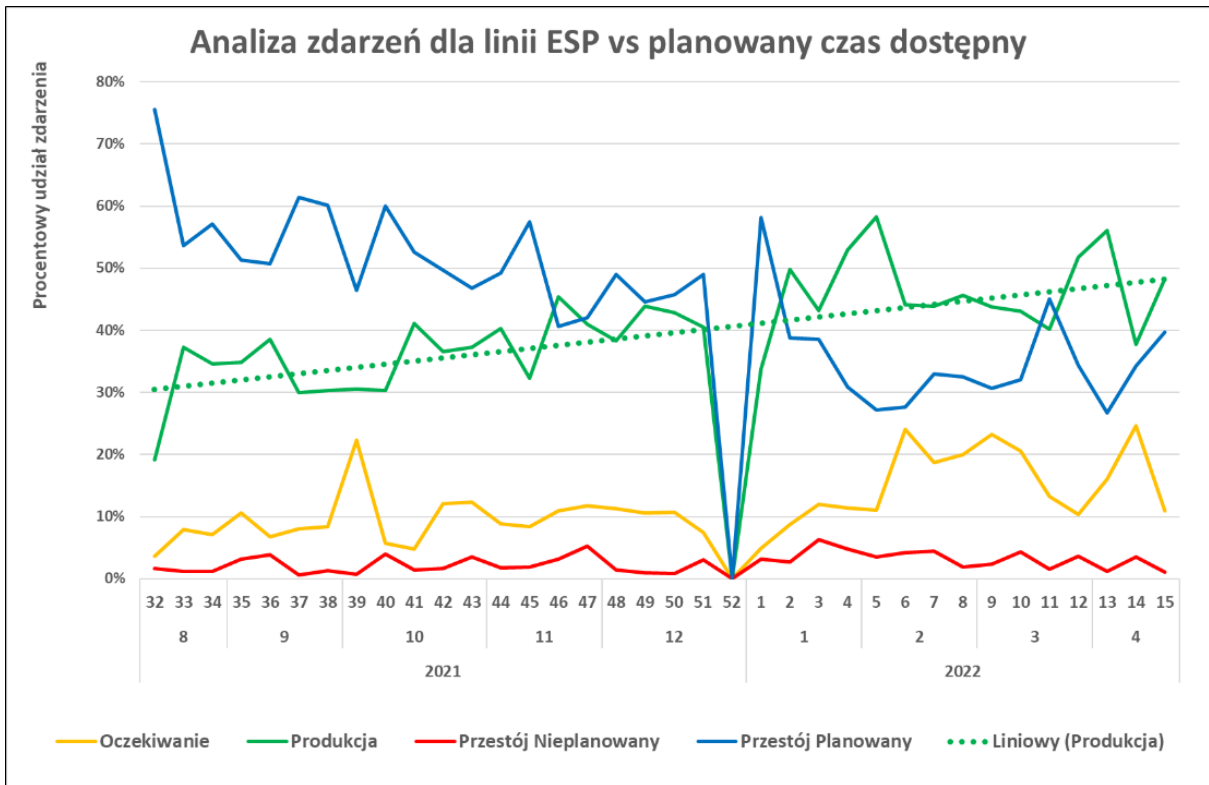
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych



Rysunek 6.4. Procentowy udział zdarzeń dla maszyny **M4** w odniesieniu do czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu;
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych



Rysunek 6.5. Procentowy udział zdarzeń dla linii **ESP** w odniesieniu do rzeczywistego czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu;
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych



Rysunek 6.6. Analiza zdarzeń dla linii ESP w analizowanym okresie czasu w odniesieniu do planowanego czasu dostępnego, średnio 168 godzin tygodniowo dla wszystkich maszyn łącznie;
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych

Rysunek 6.6 przedstawia sumę zdarzeń dla całej linii w odniesieniu do czasu dostępnego planowanego w przyszłości, czyli średnio 168 godzin tygodniowo dla wszystkich maszyn. Porównując dane z wykresów przedstawionych na rysunkach 6.5 i 6.6 można zauważyć dużą różnicę pomiędzy poziomami wykorzystania linii dla zdarzenia *Produkcja*. Porównanie zostało wykonane w celu pokazania, jaki potencjał ma linia ESP. Czas dostępny w przypadku analizowanych danych historycznych był warunkowany wielkością produkcji.

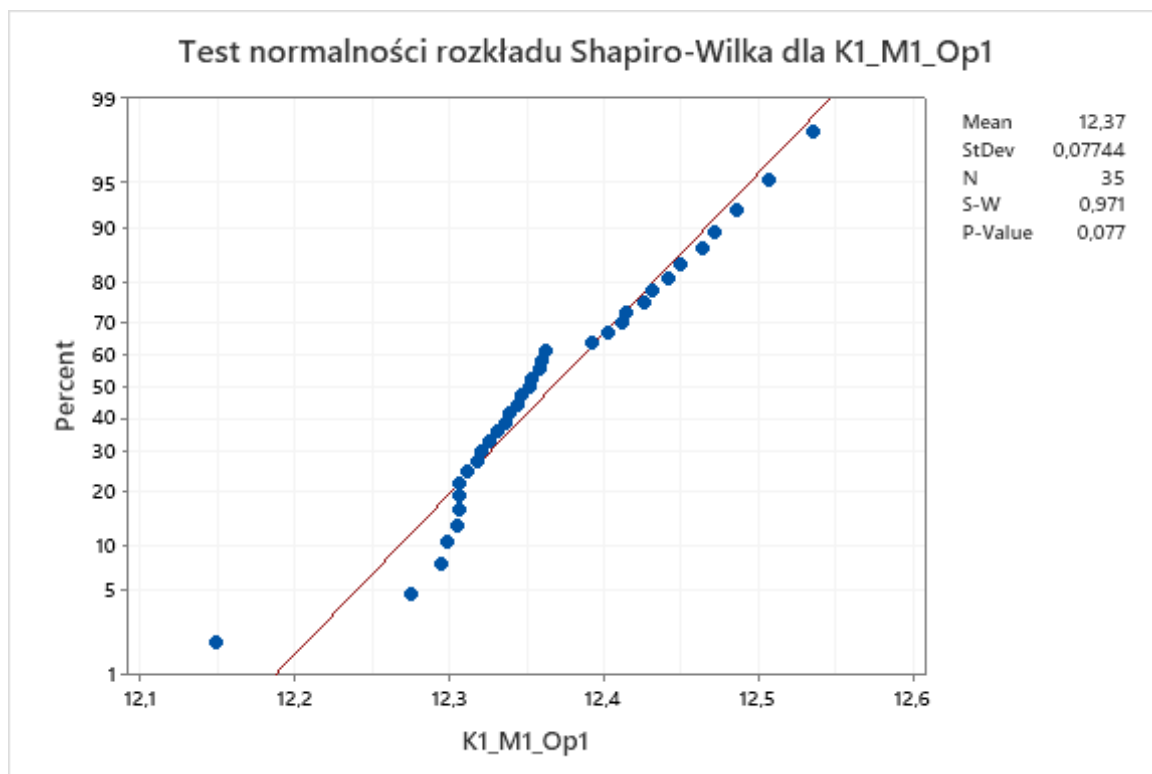
Po przeanalizowaniu danych historycznych pod kątem ich poprawności, kolejnym etapem było sprawdzenie, czy dane te nadają się do użycia w symulacji. W tym celu został przeprowadzony test normalności rozkładu dla zarejestrowanych poszczególnych czasów operacji każdej części z podziałem na maszyny, na których dana operacja była wykonywana.

Z wielu dostępnych testów normalności rozkładu w praktyce wybiera się pomiędzy kilkoma. W niniejszej pracy test normalności rozkładu wykonano w programie statystycznym Minitab, wersja 20.1.3. Posiada on wbudowany moduł, w którym do wyboru są trzy testy:

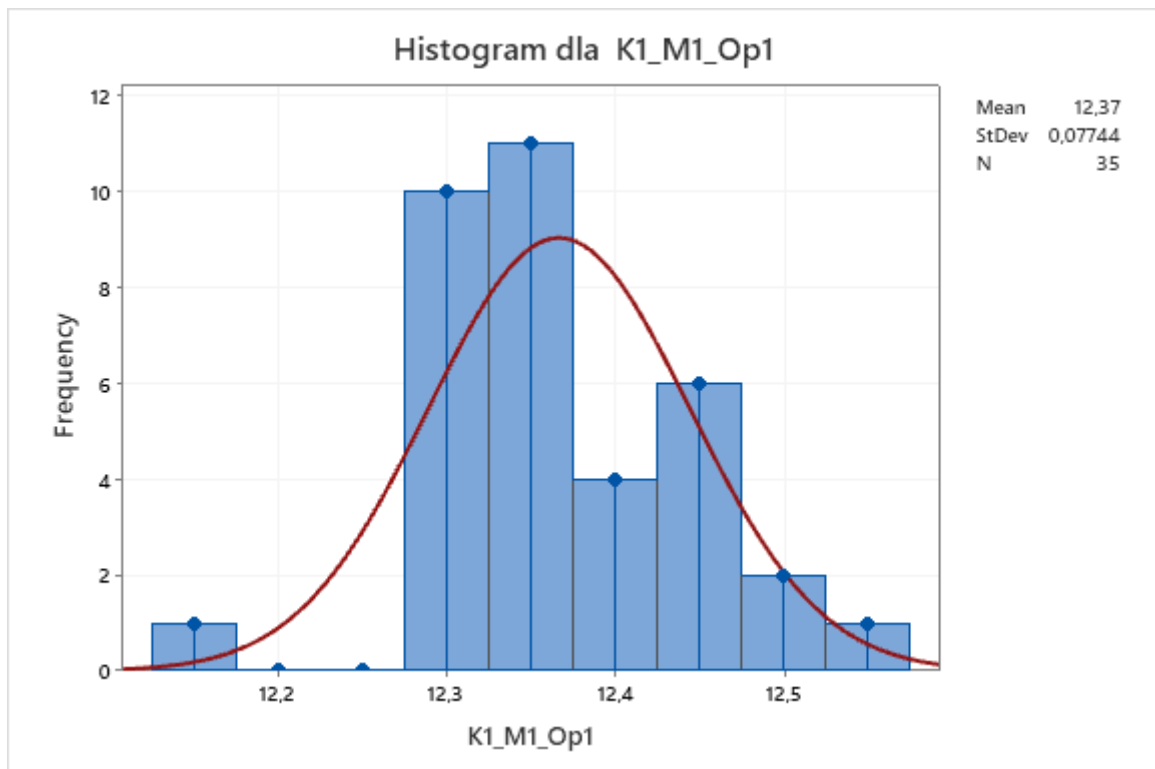
- Andersona-Darlinga,
- Ryana-Joinera (podobny do Shapiro-Wilka),

- Kolmogorova-Smirnova.

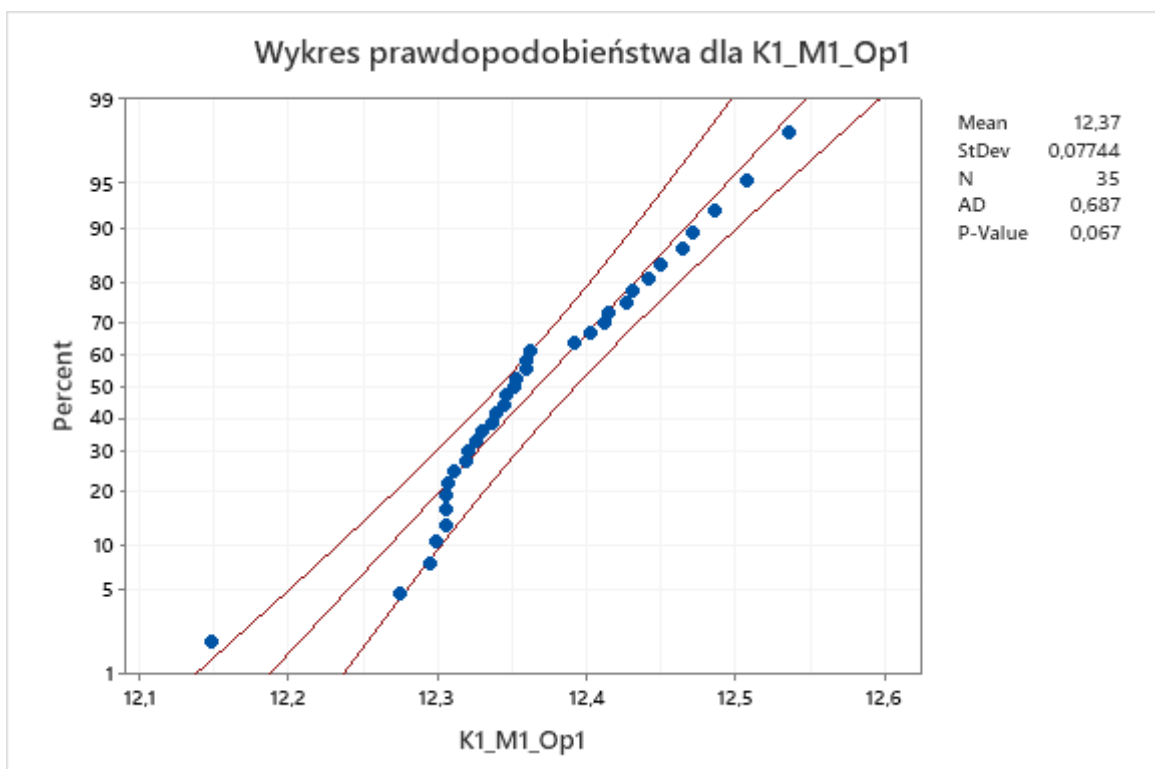
Do testu została wybrana metoda Ryan-Joiner. Jest to metoda podobna do metody Shapiro-Wilka. Hipoteza zerowa testu zakłada, że próba badawcza pochodzi z populacji o rozkładzie normalnym, jeśli test osiąga istotność statystyczną $P > 0,05$. Świadczy to o rozkładzie zbliżonym do krzywej Gaussa. Rysunki 6.7 – test normalności rozkładu, 6.8 – histogram i 6.9 – wykres prawdopodobieństwa przedstawiają wyniki analizy danych historycznych dla czasów wykonania operacji 1 części K1 na maszynie M1. Wartość $P = 0,077$ i jest większa od minimum, jakie musi osiągnąć w celu spełnienia warunku, co świadczy o tym, że próba badawcza pochodzi z populacji o rozkładzie normalnym. Jest to jeden z 28 testów normalności rozkładu jakie wykonano na posiadanych danych historycznych dla zarejestrowanych czasów wykonania operacji. Dla wszystkich wykonanych testów wartość P była większa od 0,05.



Rysunek 6.7. Test normalności rozkładu dla czasów wykonania części K1, Op1 na maszynie M1;
Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab



Rysunek 6.8. Histogram dla czasów wykonania części K1, Op1 na maszynie M1;
Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab



Rysunek 6.9. Wykres prawdopodobieństwa dla czasów wykonania części K1, Op1 na maszynie M1;
Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab

W ostatnim etapie analizy danych historycznych dokonano przeglądu stanu uzbrojenia maszyn w narzędzia skrawające z podziałem na poszczególne części i operacje. Informacje na ten temat przedstawia tabela 6.5, gdzie 1 oznacza pełną dostępność narzędzi do wykonania operacji.

Tabela 6.5. Dostępność narzędzi skrawających na poszczególnych maszynach z podziałem na części i operacje technologiczne;

Źródło: opracowanie własne

Nazwa części	K_1				K_2				K_3				K_4				K_5		K_6		P_1		P_2		P_3		P_4
Numer operacji	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Dostępność narzędzi w M1	1	1	1	1													1	1	1	1							
Dostępność narzędzi w M2		1	1	1													1	1	1	1	1	1	1	1			1
Dostępność narzędzi w M3	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1									1	1	
Dostępność narzędzi w M4	1	1							1	1	1	1															

Zapewnienie dostępności narzędzi dla poszczególnych operacji jest pierwszym etapem w procesie wdrożenia części na linię ESP. Kolejnym krokiem jest wdrożenie programu obróbczego i zatwierdzenie go do produkcji. Proces walidacji programu obróbczego jest ściśle powiązany z wdrożeniem procesu technologicznego. Stan wdrożenia poszczególnych operacji z podziałem na części przedstawia tabela 6.6, gdzie 1 oznacza wdrożony i zatwierdzony do produkcji program obróbczy.

Tabela 6.6. Status wdrożenia operacji technologicznych na poszczególnych maszynach z podziałem na części;

Źródło: opracowanie własne

Nazwa części	K_1				K_2				K_3				K_4				K_5		K_6		P_1		P_2		P_3		P_4
Numer operacji	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Wdrożona operacja na M1	1	1	1	1													1	1	1	1							
Wdrożona operacja na M2		1	1	1													1	1	1	1	1	1	1	1			1
Wdrożona operacja na M3	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1									1	1	
Wdrożona operacja na M4									1	1																	

Możliwości wdrożenia kolejnych części na poszczególnych maszynach są uzależnione od dostępności miejsc w magazynach narzędzi, jak i od liczby brakujących narzędzi dla poszczególnych operacji. Proces optymalizacji używanych narzędzi podczas wdrażania części pozwala niewielkim kosztem dobroić maszynę, żeby była gotowa na kolejne wdrożenie. Tabela 6.7 przedstawia status brakujących narzędzi z podziałem na części i operacje. Zero oznacza, że dla danej operacji jest komplet narzędzi do jej wykonania.

Tabela 6.7. Status brakujących narzędzi dla poszczególnych operacji z podziałem na części;
Źródło: opracowanie własne

Nazwa części	K_1				K_2				K_3				K_4				K_5		K_6		P_1		P_2		P_3		P_4
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
Liczba brakujących narzędzi w magazynie M1	0	0	0	0	8	4	22	6	28	5	47	19	18	1	47	16	0	0	0	0	75	17	48	18	67	19	26
Liczba brakujących narzędzi w magazynie M2	16	0	0	0	10	4	21	6	30	6	46	19	18	1	46	16	0	0	0	0	0	0	0	0	36	15	0
Liczba brakujących narzędzi w magazynie M3	0	7	20	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	9	51	8	47	14	27	14	0	0	13
Liczba brakujących narzędzi w magazynie M4	0	0	35	16	7	5	34	17	0	0	0	0	13	1	19	3	38	9	51	8	47	15	27	14	0	0	13

Omówione dane historyczne w kolejnym etapie pracy zostały wykorzystane do opracowania założeń i planu eksperymentów.

6.4. Ocena możliwości automatycznego zbierania danych

W pełni automatyczny system zbierania danych będzie możliwy po zakupie i wdrożeniu dwóch systemów wspomagających procesy produkcyjne: MES (ang. *Manufacturing Executing System*) i MCS (ang. *Machine Control System*).

Pierwszy z nich (MES) jest swojego rodzaju łącznikiem pomiędzy systemem ERP, a pozostałymi systemami/programami wspomagającymi procesy produkcyjne. Dzięki funkcjonalności systemu można natychmiast otrzymać informacje zwrotne o kluczowych wskaźnikach produktywności i na bieżąco reagować podejmując właściwe decyzje biznesowe. Do typowych funkcji systemu MES można zaliczyć [35]:

- monitoring przepływu produkcji w czasie rzeczywistym oraz kontrolę jej wykonania na poziomie operacyjnym,
- monitoring czasu rzeczywistego pracy maszyn i ludzi,
- monitoring przestoju planowanych i nieplanowanych oraz ich rejestracja,
- planowanie produkcji z prognozą czasu wykonania,
- monitoring stanu zapasów wszystkich produktów na poziomie produkcji w toku i magazynów,
- generowanie automatycznych raportów dla każdego szczebla zarządczego w zakładzie,
- możliwość współpracy z innymi systemami – jakościowymi, monitorującymi pracę maszyn itp. w celu automatycznej wymiany danych i rozszerzenia możliwości MES.

Do korzyści zastosowania systemu MES zaliczyć można [47]:

- poprawę/wzrost wszystkich wskaźników KPI poprzez, między innymi, zwiększenie stopnia wykorzystania środków produkcji,
- poprawę wizualizacji produkcji w toku,
- obniżenie kosztów produkcji poprzez, między innymi, skrócenie cyklu produkcyjnego i obniżenie poziomu zapasów,
- automatyczne zbieranie danych do systemu wirtualnej symulacji Witness,
- szybkość podejmowania trafnych decyzji biznesowych na podstawie danych z systemu symulacji wirtualnej Witness.

Drugi z systemów (MCS) monitoruje pracę maszyn w czasie rzeczywistym dając informację o statusie każdej z nich. Cały proces jest rejestrowany i przedstawiany w formie raportów. Statusy maszyn są oznaczone kolorami podobnie jak w systemie Andon [75]. Liczba monitorowanych zdarzeń zależy od potrzeb poszczególnych szczebli zarządczych w zakładzie i może być dla nich odpowiednio dostosowana. Zdarzenia/status można podzielić na dwie kategorie:

- automatyczne pochodzące bezpośrednio z maszyn i urządzeń,
- ręczne pochodzące od pracowników.

Zdarzenia rejestrowane automatycznie bezpośrednio z maszyn odporne są na czynnik ludzki i dają rzeczywisty obraz ich wykorzystania. Odpowiednio sparametryzowane sygnały ze sterowania obrabiarki dają precyzyjną informację o tym, czy maszyna jest w stanie pracy, postoju, oczekiwania (ang. *standby*), czy też awarii.

Zdarzenia pochodzące od pracowników są rejestrowane ręcznie przez system przycisków z opisem stanu. Dają dodatkową informację, która jest uzupełnieniem informacji o zdarzeniach pochodzących bezpośrednio z maszyn. Na tej podstawie można przeanalizować np. składowe/powody postoju, takie jak przerwa śniadaniowa, przerwa fizjologiczna, operatywka, oczekiwanie na zlecenie/materiał, przebrojenie obrabiarki itp. Korzyści jakie daje system MCS to [64]:

- szczegółowy monitoring pracy maszyn pozbawiony wpływu człowieka,
- wysoka jakość/wiarygodność wskaźników KPI, takich jak *Wykorzystanie (U)* i *Produktywność (P)*,

- obniżenie kosztów produkcji poprzez efektywniejsze wykorzystanie czasu pracy maszyn,
- raportowanie w czasie rzeczywistym statusu maszyn dla każdego szczebla zarządczego zakładu,
- informacja do służb utrzymania ruchu o awarii lub stanie mogącym doprowadzić do awarii pobierana bezpośrednio z maszyny,
- automatyczne zbieranie danych do systemu wirtualnej symulacji Witness.

Zastosowanie w niedalekiej przyszłości wymienionych systemów pozwoli na automatyczne zbieranie danych. Dzięki temu symulacja wirtualna będzie mogła w czasie rzeczywistym wspomagać procesy decyzyjne bezpośrednio na poszczególnych stanowiskach pracy. Zwiększy to realnie poziom wykorzystania środków produkcji i obniży koszty.

7. Opracowanie modelu

7.1. Założenia do opracowania modelu

Celem niniejszego podrozdziału jest prezentacja ograniczeń występujących na analizowanej linii produkcyjnej oraz przyjęcie założeń do opracowania wirtualnego modelu elastycznego systemu produkcyjnego.

Założenia ogólne linii ESP zaprezentowane zostały w tabeli 7.1. Przedstawiają one stan obecny.

Tabela 7.1. Założenia ogólne elastycznej linii produkcyjnej ESP.

Źródło: opracowanie własne

Lp.	Założenie ogólne
1	Linia elastycznego systemu wytwarzania ESP jest elementem procesu produkcyjnego i traktowana jest jako jedno stanowisko produkcyjne.
2	Linia ESP wyposażona jest w system sterowania JFMX .
3	Linia ESP zawiera 4 maszyny połączone ze sobą za pomocą centralnego systemu sterującego JFMX .
4	Linia ESP jest wyposażona w dwa stanowiska załadowczo-wyładowcze
5	Linia ESP jest wyposażona w magazyn palet MP sterowany za pomocą centralnego systemu sterującego JFMX .
6	Magazyn palet jest połączony z maszynami za pomocą roboty i sterowany centralnym systemem sterującym JFMX . Liczba palet w magazynie jest ograniczona do 24 .
7	Na linii ESP jest jeden robot do transportu palet pomiędzy stanowiskami załadowczo-wyładowczymi, maszynami i magazynem palet .
8	Każda maszyna wyposażona jest w indywidualny magazyn narzędzi . Liczba narzędzi w magazynie każdej maszyny jest ograniczona do 475 .
9	Każde narzędzie występujące na linii ESP ma unikalny symbol identyfikacyjny i jest wyposażone w chip z zestawem danych: symbol narzędzia, geometria narzędzia i czas pracy .
10	Dla każdego wyrobu produkowanego na linii ESP generowane jest zlecenie produkcyjne w systemie ERP.
11	Jedno zlecenie produkcyjne to jednocześnie jedna seria produkcyjna .
12	Każde zlecenie produkcyjne zawiera wykaz operacji technologicznych do wykonania w określonej kolejności.
13	Liczba operacji technologicznych do wykonania jest ściśle określona w zleceniu produkcyjnym .
14	Kolejność wykonywania operacji technologicznych w zleceniu produkcyjnym jest określona numeracją operacji.
15	Dla każdego wyrobu i operacji technologicznej występującej w procesie technologicznym jest przypisany indywidualny program obróbczy z zestawem narzędzi .
16	Program obróbczy zawiera zestaw komend do wykonania kompletnej operacji.

Lp.	Założenie ogólne
17	Każda operacja ma przypisaną indywidualną paletę z kompletnym oprzyrządowaniem do zamocowania półfabrykatu.
18	Każda operacja technologiczna w zleceniu produkcyjnym ma zdefiniowany czas standardowy wykonania operacji.
19	Zlecenie produkcyjne wprowadzane do systemu sterującego linią ESP uruchamia rozpoczęcie pierwszej operacji.
20	Każde zlecenie produkcyjne po wprowadzeniu do systemu sterującego linią ESP ma ustawiany priorytet.
21	Do linii ESP dedykowani są operatorzy zapewniający pełną obsługę linii – dwóch operatorów na jedną zmianę.
22	Obsługa linii ESP przez operatorów odbywa się w obszarze dwóch stanowisk załadowczo-wyładowczych, magazynów narzędzi każdej z maszyn i konsoli systemu sterowania linią JFMX .
23	Czas pracy narzędzia jest automatycznie rejestrowany w systemie sterującym JFMX . Wymiana narzędzia zużytego na nowe nie powoduje konieczności zatrzymania pracy maszyny.
24	Czas rzeczywisty wykonania operacji na każdej maszynie jest automatycznie rejestrowany w systemie sterowania JFMX .
25	Czas przebrojenia (ang. <i>setup time</i>) dla każdej operacji procesu technologicznego równa się 0 (zero).
26	Jednocześnie mogą być mocowane dwa półfabrykaty na dwóch stanowiskach załadowczo-wyładowczych .
27	Jeden półfabrykat jest zamocowany w jednym przyrządzie .
28	Czas stabilizacji temperaturowej wynosi minimum 8 godzin i dotyczy wszystkich wyrobów produkowanych na linii ESP . Czas ten poprzedza rozpoczęcie wykonywania zlecenia produkcyjnego.
29	Czas stabilizacji temperaturowej nie wpływa na długość cyklu produkcyjnego procesu wykonywanego na linii ESP .
30	Maksymalnie w obszarze linii ESP (magazyn palet, maszyny i robot) może się znajdować 26 palet z półfabrykatami przed obróbką lub wyrobami gotowymi po obróbce. Jest to podyktowane limitem narzuconym w systemie sterowania linią ESP.
31	Każda maszyna posiada jedno miejsce przed strefą obróbki, w której może oczekiwać półfabrykat.

Do opracowania modelu w programie Witness zostały przyjęte założenia, które zaprezentowane zostały w tabeli 7.2. Odzwierciedlają one rzeczywisty stan linii ESP ze wszystkimi elementami mającymi udział w procesie produkcyjnym.

Tabela 7.2. Założenia do opracowania modelu wirtualnego w programie WITNESS;
Źródło: opracowanie własne

Lp.	Założenie wirtualnego modelu
1	4 maszyny M1, M2, M3 i M4
3	2 stanowiska załadowczo-wyładowcze ZW1 i ZW2
4	1 robot R
5	1 magazyn palet MP z 24 miejscami na palety: P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19, P20, P21, P22, P23, P24
6	10 części K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, P_1, P_2, P_3 i P_4 wdrożonych na linii ESP
7	Jeden bufor wejścia B_W
8	10 buforów międzyoperacyjnych B_MOp , po jednym dla każdej części
9	Jeden generator zleceń produkcyjnych Generator_ZP

Przyjęte założenia zostały wykorzystane do opracowania wirtualnego modelu linii produkcyjnej ESP.

7.2. Identyfikacja parametrów wejściowych

W następnej kolejności określono niezbędne dane wejściowe do modelu. Parametry wejściowe wirtualnego modelu przedstawiono w tabeli 7.3.

Tabela 7.3. Parametry wejściowe do opracowania wirtualnego modelu w programie Witness.
Źródło: opracowanie własne

Symbol	Opis parametru wejściowego
BazaAlt_Op	Zmienna całkowita definiująca aktywną maszynę dla danej operacji technologicznej
BazaPrzyrz	Zmienna całkowita definiująca liczbę dostępnych palet z kompletnym oprzyrządowaniem mocującym część dla pojedynczej operacji technologicznej
T_ZP	Zmienna rzeczywista – czas niezbędny dla pracownika działu planowania do wygenerowania w systemie ERP zlecenia produkcyjnego i przekazania na wydział [godz.]
Tjm	Zmienna rzeczywista – czas rzeczywisty wykonania operacji na maszynie [godz.]
TjZW	Zmienna rzeczywista – czas załadunku i rozładunku odpowiednio półfabrykatu i wyrobu gotowego na stanowisku załadowczo-wyładowczym [godz.]
BazaZmian_G_ZP	Zmienna rzeczywista definiująca harmonogram pracy (zmiany) Działu Planowania generującego zlecenia produkcyjne [godz.]
BazaZmian_MR	Zmienna rzeczywista definiująca harmonogram pracy (zmiany) dla maszyn i robota [godz.]
BazaZmian_P	Zmienna rzeczywista definiująca harmonogram pracy (zmiany) dla pracowników (operatorów) obsługujących linię ESP [godz.]

Symbol	Opis parametru wejściowego
Min_Max	Zmienna całkowita definiująca minimalny i maksymalny poziom liczby sztuk danej części w obszarze linii ESP
Wielkość serii	Zmienna całkowita definiująca liczbę sztuk w serii produkcyjnej
PlanProd	Zmienna całkowita definiująca roczny plan produkcyjny
IleW_ESP	Zmienna całkowita definiująca maksymalną liczbę palet wraz z kompletnym oprzyrządowaniem, jaka może się znajdować w obrębie linii ESP

7.3. Identyfikacja parametrów wyjściowych

Parametry wyjściowe przyjęte dla modelu przedstawiono w tabeli 7.4. Parametrami wyjściowymi są jednocześnie cele, jakie postawiono dla maksymalizacji wskaźników produkcyjnych linii ESP.

Tabela 7.4. Parametry wyjściowe wirtualnego modelu.

Źródło: opracowanie własne

Symbol	Opis parametru wyjściowego
LT	<p>LT – (ang. <i>Lead time</i>) cykl produkcyjny [godz.] – czas od rozpoczęcia do zakończenia realizacji procesu produkcyjnego jednej części zgodnie ze zleceniem produkcyjnym. Czas, który obejmuje realizację wszystkich wymaganych jednym zleceniem operacji produkcyjnych w ramach linii ESP.</p> <p>Cykl produkcyjny powinien dążyć do minimum.</p> <p>LT [godz.] = czas oczekiwania w buforze wejściowym + suma czasów przygotowania na stanowiskach załadowczo-wyładowczych + suma czasów transportu przez robota + suma czasów wykonywania operacji na maszynach/maszynie + suma czasów oczekiwania w magazynie palet + suma czasów oczekiwania w buforze maszyny + czas oczekiwania w buforze międzyoperacyjnym.</p> <p>LT [godz.] planowany ustalany jest na podstawie informacji o dacie i godzinie rozpoczęcia i zakończenia realizacji zlecenia produkcyjnego.</p>
WIP	<p>WIP – (ang. <i>Work in Process</i>) wartość produkcji w toku mierzona liczbą sztuk będących w produkcji.</p> <p>WIP [szt.] powinno dążyć do minimum.</p> <p>WIP = suma części w buforze wejściowym + suma części na stanowiskach załadowczo-wyładowczych + suma części w magazynie palet w tym aktualnie transportowanych przez robota + suma części w trakcie obróbki na maszynach + suma części w buforach maszyn + suma części w buforze międzyoperacyjnym.</p>
Eff	<p>Eff – (ang. <i>Efficiency</i>) wydajność [%] = $\frac{\sum \text{Czas Standardowy}}{\sum \text{Czas Rzeczywisty}}$</p> <p>Wydajność powinna dążyć do maksimum.</p>
U	<p>U – (ang. <i>Utilization</i>) wykorzystanie [%] = $\frac{\sum \text{Czas Rzeczywisty}}{\sum \text{Czas dostępny}}$</p> <p>Wykorzystanie powinno dążyć do maksimum.</p>
P	<p>P – (ang. <i>Productivity</i>) produktywność [%] = $\frac{\sum \text{Czas standardowy}}{\sum \text{Czas dostępny}}$</p> <p>Produktywność powinna dążyć do maksimum</p>

Symbol	Opis parametru wyjściowego
WG	Wyroby gotowe – liczba sztuk wyrobów gotowych jaka opuściła linię ESP .

Na potrzeby niniejszej pracy przyjęto, że strumień wartości przepływu produkcji części lotniczych na linii ESP definiowany jest poprzez:

- *U*,
- *WIP*,
- *LT*.

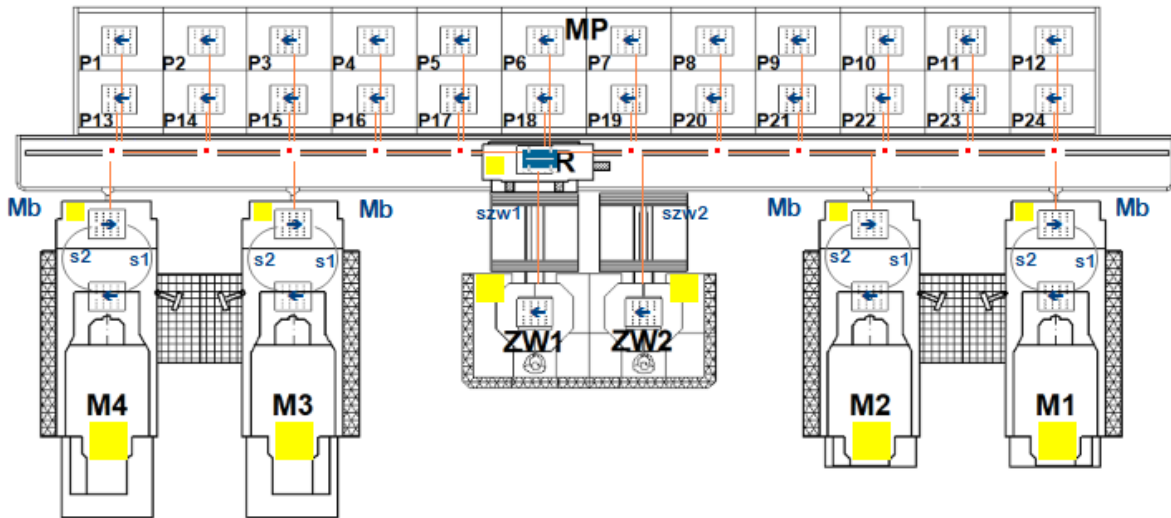
7.4. Opis modelu

Opracowanie modelu rozpoczęto od przygotowania planu rozmieszczenia linii produkcyjnej (ang. *Layout*) w programie CAD (ang. *Computer Aided Design*), a następnie zaimportowano rysunek do programu Witness. Plan sytuacyjny linii ESP został sparametryzowany i dopasowany wielkością do rozmiarów rzeczywistych w przyjętej skali. Miało to na celu poprawne zamodelowanie torowisk dla robota R. W kolejnym kroku dodano wszystkie elementy linii ESP:

- 4 maszyny **M1** do **M4** wraz z miejscami oczekiwania na obróbkę **Mb** i tzw. karuzelą **s1** i **s2** do załadunku i rozładunku maszyny pomiędzy strefą obróbki a miejscem oczekiwania,
- 1 robot **R**,
- 1 magazyn palet **MP** wraz z 24 miejscami odkładczymi dla palet od **P1** do **P24**,
- torowisko dla robota.

Widok linii ESP wykonany w programie Witness przedstawia rysunek 7.1.

Linia ESP



Rysunek 7.1. Layout linii ESP wykonany w programie Witness;
Źródło: opracowanie własne

Zbudowany model składa się z obiektów dostępnych w bibliotekach systemu Witness. Modelując przebieg procesu starano się maksymalnie dokładnie odzwierciedlić czynności i powiązania, które mają miejsce w trakcie realizacji produkcji. W trakcie tworzenia modelu zastosowano wiele zmiennych i atrybutów, których znaczenie i opis przedstawiono w dalszej części niniejszego rozdziału.

Zmienne i atrybuty, które zostały użyte w modelu można podzielić na następujące grupy:

- zmienne definiujące proces przedstawione w tabeli 7.3,
- zmienne generowane przez model na podstawie rozkładu statystycznego,
- zmienne pomocnicze,
- atrybuty sterowane zmiennymi definiujące proces,
- atrybuty dynamiczne rejestrujące przebieg procesu,
- atrybuty stałe definiujące proces i elementy procesu.

Pierwsza grupa zmiennych to parametry wejściowe, które definiują proces. Wartości tych zmiennych importowane są z plików w formacie .xlsx podczas uruchomienia symulacji w modelu. Pozwala to w prosty sposób sterować modelem bez konieczności ingerencji w kod programowania poszczególnych reguł wejścia i wyjścia elementów modelu.

Zmienne generowane przez model zastosowane są do wyliczania czasu obróbki dla poszczególnych operacji produkcyjnych na podstawie rozkładu statystycznego wygenerowanego z danych historycznych. Proces analizy danych historycznych i ich walidacja zostały opisane w podrozdziale 6.3.

Trzecia grupa zmiennych to elementy wspomagające przebieg symulacji. Są to różnego rodzaju liczniki i przełączniki, których wartości zmieniają się dynamicznie w trakcie symulacji i odpowiadają za prawidłową pracę modelu. W tej grupie znajdują się zmienne, które odpowiadają za prawidłowe obliczanie wskaźników *WIP* i *LT*.

Atrybuty sterowane zmiennymi przyjmują wartości z chwilą ich użycia i pozwalają na sterowanie procesem. Przykładem takich atrybutów jest para **atrNrMasz_M** i **atrLiczOper**, która w połączeniu ze zmiennymi **BazaAlt_Op** i **NrOp** steruje numerem maszyny, na której dana operacja jest wykonywana. Po wykonaniu danej operacji atrybut **atrNrMasz_M** przyjmuje wartość **NONE** i jest przygotowany do ponownego użycia.

Atrybuty dynamiczne zmieniają swoją wartość w trakcie wykonywania symulacji i używane są do monitorowania procesu. Przykładem takiego atrybutu jest **atrLT:6** monitorujący czas spędzony w obszarze linii **ESP** danej części. Liczba 6 przy atrybucie oznacza, że dla jednego atrybutu przypisanych jest sześć różnych wartości:

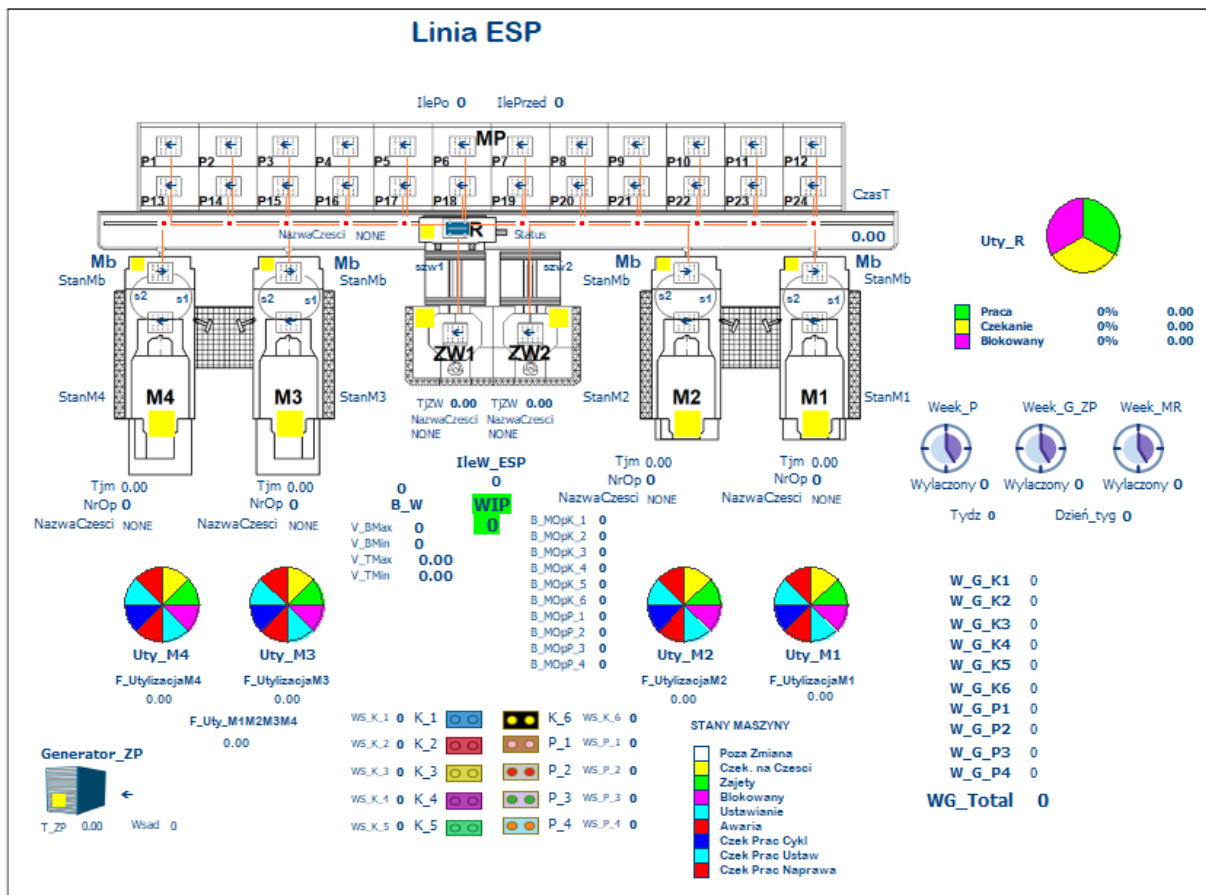
- (1) - czas startu pomiaru *LT* dla części,
- (2) - czas wejścia części do magazynu palet **MP**,
- (3) - *LT* chwilowy w trakcie cyklu produkcyjnego,
- (4) - chwilowy czas przebywania części w magazynie z atrybutem **Przed**,
- (5) - chwilowy czas przebywania części w magazynie z atrybutem **Po**,
- (6) - *LT* części po zakończeniu procesu w obszarze linii **ESP**.

Atrybuty **Przed** i **Po** definiują wartość zmiennej **Status** wykonania danej operacji, gdzie **Przed** oznacza, że dana operacja w procesie jeszcze nie została wykonana a **Po**, że operacja została wykonana. Zaprezentowany przykład pokazuje możliwości użycia w symulacji zmiennych i atrybutów do określania reguł w procesie.

Atrybuty stałe przypisują właściwości procesowe lub fizyczne danych elementów. Przykładem atrybutu przypisującego właściwości procesu dla elementu typu część jest **atrLiczOper:2**. Liczba 2 przy atrybucie oznacza, że dla jednego atrybutu przypisane są dwie różne wartości, które definiują i jednocześnie kontrolują liczbę operacji technologicznych, jaka jest do wykonania dla danej części gdzie:

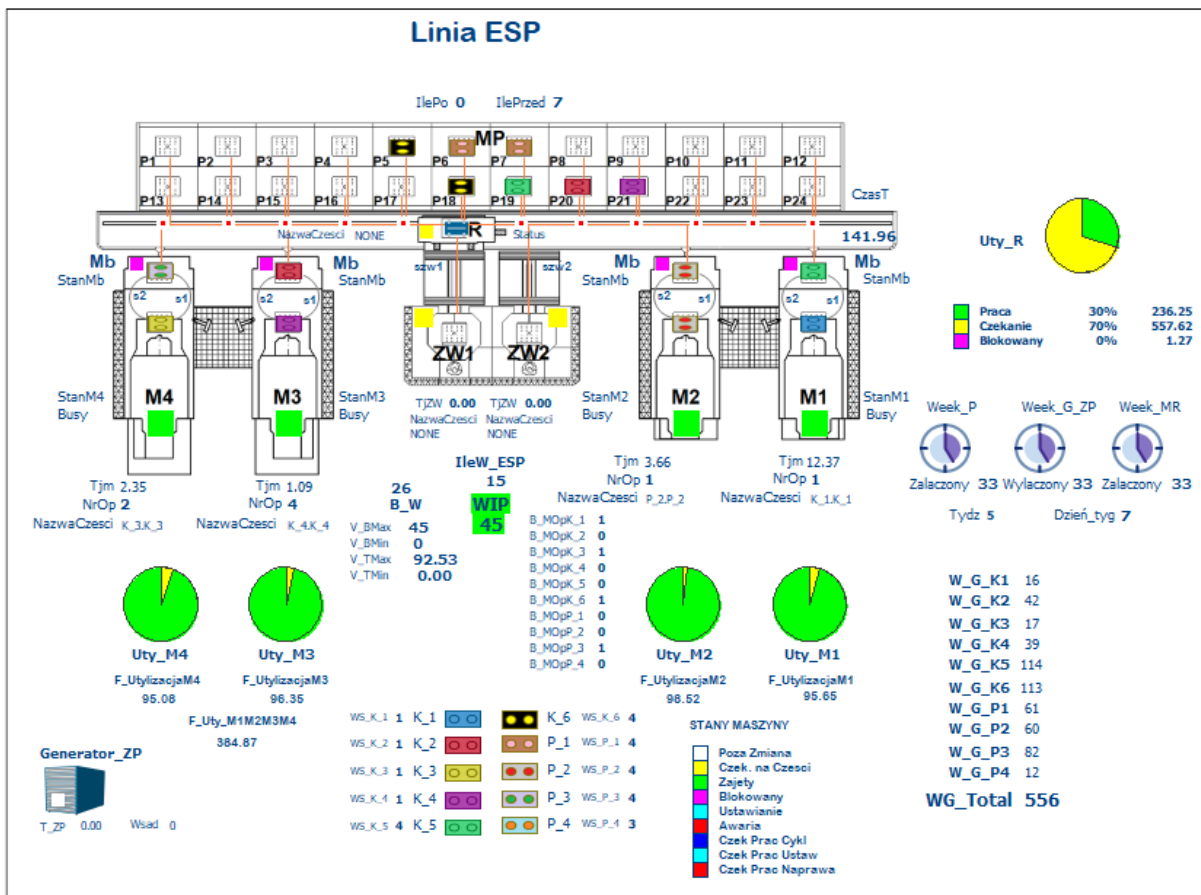
- (1) licznik wykonanych operacji w procesie technologicznym dla danej części,
- (2) liczba operacji w procesie technologicznym dla danej części.

Wszystkie elementy w modelu typu **Część, Maszyna i Bufor** zostały powiązane ze sobą regułami wejść i wyjść oraz kolejkowania i odzwierciedlają rzeczywisty przebieg procesu. Dla kolejkowania wszystkich buforów ustawiono regułę **FIFO** (ang. *First in, First out*). Załącznik nr 3 zawiera kod reguły wejścia i wyjścia do i z magazynu palet zarządzający atrybutem **atrLT:6**, który jest odpowiedzialny za kontrolę czasu jaki spędza w obszarze linii ESP każda część. Zastosowanie kodu umożliwiło prawidłowe działanie reguły FIFO zastosowanej w obszarze całego modelu. Weryfikację poprawności wyboru reguły kolejkowania przeprowadzono podczas weryfikacji i walidacji modelu. Widok kompletnego wirtualnego modelu linii ESP gotowego do rozpoczęcia symulacji opracowanego w programie Witness przedstawia rysunek 7.2.



Rysunek 7.2. Widok linii ESP wykonany w programie Witness;
Źródło: opracowanie własne

Rysunek 7.3 przedstawia ten sam model podczas symulacji. Widoczne są statusy poszczególnych elementów wirtualnej linii produkcyjnej oraz części na różnym etapie produkcji. Wykresy kołowe informują o wartości wskaźnika U (Uty_M1 , Uty_M2 , Uty_M3 i Uty_M4) dla maszyn M oraz dla robota R (Uty_R)



Rysunek 7.3. Widok linii ESP podczas pracy symulacji wykonany w programie Witness;
Źródło: opracowanie własne

W trakcie symulacji można obserwować wartości wskaźnika *WIP* (aktualna wartość to 45) oraz monitorować liczbę części gotowych opuszczających linię ESP globalnie (zmienna **WG_Total**, aktualna wartość to 556) i indywidualnie dla każdej części (zmiennne **W_G_K1** do **W_G_P4**). Ilość wyświetlanych informacji podczas symulacji zależy tylko i wyłącznie od użytkownika. Powyżej opisano tylko kilka z nich.

7.5. Weryfikacja modelu i analiza błędów

Weryfikację modelu przeprowadzano na każdym etapie jego opracowywania począwszy od wykonania planu rozmieszczenia linii a skończywszy na walidacji modelu. Sprawdzano czy części przemieszczają się wzdłuż odpowiednich dróg pomiędzy elementami. Zmienne sterujące procesem były parametryzowane w sposób uniemożliwiający wykonanie symulacji w celu kontroli reguł zastosowanych w poszczególnych elementach. Każdorazowo podczas wykrycia błędu dokonano szczegółowej analizy otoczenia i wielokrotnie sprawdzono różne scenariusze po poprawie elementu generującego błąd.

Przykładem weryfikacji błędu jest zastosowanie zmiennej **BazaAlt_Op** sterującej wyborem maszyn do wykonania poszczególnych operacji. Pierwotnie po zastosowaniu zmiennej i wykonaniu pierwszej weryfikacji okazało się, że pomimo ustawienia w danych wejściowych różnych kombinacji wyboru maszyn, w trakcie symulacji zawsze była wybierana wersja, że wszystkie operacje były możliwe do wykonania na każdej maszynie. Po przeanalizowaniu zastosowanych reguł okazało się, że zmienna pomimo kasowania wartości określającej numer maszyny po wykonaniu danej operacji, dalej przyjmuje wartość zadaną na początku procesu symulacji. Konieczne było przeprogramowanie reguł przyporządkowania maszyn do poszczególnych operacji i zastosowanie dodatkowych zmiennych i atrybutów w celu pełnej kontroli wyboru maszyn dla operacji. Poniżej przedstawiono przykład zweryfikowanego kodu reguły przyporządkowania maszyn do operacji dla części **K_5**. W zaprezentowanym kodzie reguły część **K_5** jest oznaczona jako **K_5.K_5**. Jest to podyktowane umiejscowieniem części w module o tej samej nazwie.

```

K_5.A_K5_1(1) = BazaAlt_Op(1, 17) !przypisanie zmiennych do atrybutów
K_5.A_K5_1(2) = BazaAlt_Op(2, 17)
K_5.A_K5_1(3) = BazaAlt_Op(3, 17)
K_5.A_K5_1(4) = BazaAlt_Op(4, 17)
K_5.A_K5_2(1) = BazaAlt_Op(1, 18)
K_5.A_K5_2(2) = BazaAlt_Op(2, 18)
K_5.A_K5_2(3) = BazaAlt_Op(3, 18)
K_5.A_K5_2(4) = BazaAlt_Op(4, 18)
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_1(1) = 1 AND atrLiczOper(1) = 0 !wybór maszyny dla operacji 1
    atrNrMasz_M1 = Str2Name("M" + Num2Str(K_5.A_K5_1(1)))
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_1(1) = 0 AND atrLiczOper(1) = 0
    atrNrMasz_M1 = Str2Name("")
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_1(2) = 1 AND atrLiczOper(1) = 0
    atrNrMasz_M2 = Str2Name("M" + Num2Str(K_5.A_K5_1(2) * 2))
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_1(2) = 0 AND atrLiczOper(1) = 0
    atrNrMasz_M2 = Str2Name("")
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_1(3) = 1 AND atrLiczOper(1) = 0
    atrNrMasz_M3 = Str2Name("M" + Num2Str(K_5.A_K5_1(3) * 3))
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_1(3) = 0 AND atrLiczOper(1) = 0
    atrNrMasz_M3 = Str2Name("")
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_1(4) = 1 AND atrLiczOper(1) = 0
    atrNrMasz_M4 = Str2Name("M" + Num2Str(K_5.A_K5_1(4) * 4))
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_1(4) = 0 AND atrLiczOper(1) = 0
    atrNrMasz_M4 = Str2Name("")
ENDIF
!
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_2(1) = 1 AND atrLiczOper(1) = 1 !wybór maszyny dla operacji 2
    atrNrMasz_M1 = Str2Name("M" + Num2Str(K_5.A_K5_2(1)))
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_2(1) = 0 AND atrLiczOper(1) = 1
    atrNrMasz_M1 = Str2Name("")
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_2(2) = 1 AND atrLiczOper(1) = 1
    atrNrMasz_M2 = Str2Name("M" + Num2Str(K_5.A_K5_2(2) * 2))
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_2(2) = 0 AND atrLiczOper(1) = 1
    atrNrMasz_M2 = Str2Name("")
ENDIF

```

```

IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_2(3) = 1 AND atrLiczOper(1) = 1
  atrNrMasz_M3 = Str2Name ("M" + Num2Str (K_5.A_K5_2(3) * 3))
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_2(3) = 0 AND atrLiczOper(1) = 1
  atrNrMasz_M3 = Str2Name (" ")
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_2(4) = 1 AND atrLiczOper(1) = 1
  atrNrMasz_M4 = Str2Name ("M" + Num2Str (K_5.A_K5_2(4) * 4))
ENDIF
IF TYPE = K_5.K_5 AND K_5.A_K5_2(4) = 0 AND atrLiczOper(1) = 1
  atrNrMasz_M4 = Str2Name (" ")
ENDIF

```

Wyodrębniono następujące zmienne i atrybuty użyte w kodzie reguły wyboru maszyny dla określonej operacji technologicznej:

- **K_5.A_K5_1(1...4)** – zmienna zwracająca numer maszyny dla pierwszej operacji części **K_5**, gdzie wartość zmiennej **1** oznacza, że dana maszyna, której dotyczy zmienna jest aktywna do wykonania operacji technologicznej (tzn. maszyna została wybrana w danej symulacji do realizacji określonej operacji technologicznej operacja technologiczna może być na tej maszynie zrealizowana), a wartość **0** oznacza maszynę nieaktywną dla danej operacji. Liczba w nawiasie obok zmiennej oznacza numer maszyny, której zmienna dotyczy.
- **K_5.A_K5_2(1...4)** – zmienna zwracająca numer maszyny dla drugiej operacji.
- **BazaAlt_Op(1...4, 17)** – zmienna definiująca proces wyboru maszyny dla pierwszej operacji, gdzie liczby w nawiasie wskazują numer wiersza (1..4) i numer kolumny (17) z tabeli 6.6. zawierającej status wdrożenia operacji technologicznych na poszczególnych maszynach z podziałem na części.
- **BazaAlt_Op(1...4, 18)** – zmienna definiująca proces wyboru maszyny dla drugiej operacji.
- **atrLiczOper(1) = 0** – atrybut numeru operacji, gdzie wartość **0** informuje, że część, dla której jest przypisany atrybut jest przed pierwszą operacją.
- **atrLiczOper(1) = 1** – atrybut numeru operacji, gdzie wartość **1** informuje, że część, dla której jest przypisany atrybut jest przed drugą operacją.
- **atrNrMasz_M1...M4** – atrybut przypisujący numer maszyny do określonej operacji. Atrybut przyjmuje wartości od **1** do **4** lub **NONE** gdzie **1**, **2**, **3** lub **4** oznacza numer aktywnej maszyny dla danej operacji, a **NONE** nieaktywną maszynę.

7.6. Ocena adekwatności modelu

Model wirtualny linii produkcyjnej ESP w swoim założeniu ma jak najdokładniej odzwierciedlać rzeczywistość. Dla sprawdzenia, czy opracowany model wystarczająco dokładnie odzwierciedla rzeczywistość przeprowadzono walidację modelu. Do tego celu użyto danych rzeczywistych z jednego tygodnia ciągłej pracy linii ESP. Dane rzeczywiste pochodzą z rejestru pracy linii ESP, który jest jednocześnie harmonogramem godzinowym wykonywanych zleceń produkcyjnych. Harmonogram został przygotowany przez Dział Planowania w pliku Excel. Po wygenerowaniu zlecenia produkcyjnego i przekazaniu na Wydział Produkcyjny, pracownik Działu Planowania jest zobowiązany zaktualizować go ustalając kolejność wykonywania poszczególnych części i operacji technologicznych. Zadaniem pracownika obsługującego linię ESP jest rejestracja startu i zakończenia wykonywania poszczególnych operacji. Na tej podstawie został opracowany raport z danymi niezbędnymi do walidacji modelu. Analizowany przedział czasu pracy linii ESP (łącznie 168 godzin) został podzielony na 41 czterogodzinnych okresów. Na koniec każdego z okresów został obliczony *WIP* dla produkcji w toku, która znajdowała się w obszarze linii ESP oraz średni *LT* dla części, które zakończyły proces produkcyjny w obszarze linii ESP. Dla każdego zlecenia produkcyjnego przyporządkowana jest jedna seria produkcyjna. Liczbę sztuk w serii produkcyjnej ustala Dział Planowania.

Przyjęto następujące założenia do obliczenia w/w wskaźników KPI z rejestru linii ESP:

- Start zlecenia produkcyjnego oznacza moment rozpoczęcia wykonywania pierwszej operacji procesu produkcyjnego na pierwszej sztuce z serii.
- Rozpoczęcie zlecenia produkcyjnego jest jednocześnie początkiem cyklu produkcyjnego (*LT*) dla wszystkich sztuk w zleceniu produkcyjnym.
- Cykl produkcyjny obliczony jest dla każdej części indywidualnie na podstawie rozpoczęcia zlecenia produkcyjnego i zakończenia ostatniej operacji procesu produkcyjnego.
- Liczba sztuk w zleceniu produkcyjnym z chwilą rozpoczęcia wykonywania pierwszej operacji procesu produkcyjnego na pierwszej sztuce z serii jest w całości dodawana do *WIP*.
- Po zakończeniu ostatniej operacji procesu produkcyjnego na określonej części na linii ESP, jest ona odejmowana z *WIP*.

Na podstawie w/w założeń został przeanalizowany raport z linii ESP. Obliczono wskaźniki *WIP* i *LT*. Wyniki analizy przedstawia tabela 7.5. Wartości *WIP* i *LT* w poszczególnych okresach oznaczają wartość wskaźnika na koniec danego okresu.

Tabela 7.5. Wartości *WIP* i *LT* w badanym przedziale czasu.
Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z linii ESP

Wartości wskaźników <i>WIP</i> i <i>LT</i> obliczonych na podstawie raportu z linii ESP					
Numer okresu kontrolnego	WIP [szt.]	LT [godz.]	Numer okresu kontrolnego	WIP [szt.]	LT [godz.]
Wartość początkowa	6	0,00	Okres 21	32	27,12
Okres 01	5	7,88	Okres 22	32	27,12
Okres 02	6	7,88	Okres 23	31	30,43
Okres 03	5	11,75	Okres 24	23	32,43
Okres 04	5	11,75	Okres 25	22	32,68
Okres 05	4	15,56	Okres 26	22	32,68
Okres 06	4	15,56	Okres 27	19	38,66
Okres 07	3	19,66	Okres 28	11	38,19
Okres 08	3	19,66	Okres 29	12	36,76
Okres 09	8	23,66	Okres 30	12	36,76
Okres 10	8	23,66	Okres 31	9	40,54
Okres 11	6	25,16	Okres 32	8	42,56
Okres 12	15	25,16	Okres 33	7	41,99
Okres 13	15	25,16	Okres 34	7	41,99
Okres 14	16	25,16	Okres 35	12	41,82
Okres 15	16	25,16	Okres 36	12	41,82
Okres 16	24	25,16	Okres 37	12	41,82
Okres 17	24	25,16	Okres 38	12	41,82
Okres 18	24	25,16	Okres 39	17	42,44
Okres 19	24	27,12	Okres 40	15	47,26
Okres 20	24	27,12	Okres 41	14	45,73
			Wartość końcowa	13	45,14

W kolejnym etapie z raportu wyodrębniono wszystkie zlecenia produkcyjne, które rozpoczynały się i były wykonywane w analizowanym przedziale czasu. Zlecenia zostały przypisane do poszczególnych okresów kontrolnych. Z całkowitej liczby 10 wdrożonych części na linii ESP w badanym okresie wykonywanych było 6 z nich. Były to części: **K_1**, **K_3**, **K_5**,

K_6, P_1 i P_3. Tabela 7.6 przedstawia szczegóły w/w zleceń produkcyjnych. Numer serii produkcyjnej odnosi się do poszczególnych części i został nadany na potrzeby niniejszej pracy.

Tabela 7.6. Dane dotyczące zleceń produkcyjnych przekazanych do produkcji i wykonywanych na linii ESP w badanym przedziale czasu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z linii ESP

Zlecenia produkcyjne przekazane do produkcji i wykonywane w analizowanym przedziale czasu			
Numer okresu kontrolnego	Nazwa części	Numer serii produkcyjnej	Liczba części w serii produkcyjnej
Wartość początkowa	P_1	P_1 / 1	6
Okres 02	K_3	K_3 / 1	1
Okres 09	P_3	P_3 / 1	6
Okres 12	K_1	K_1 / 1	1
	K_6	K_6 / 5	8
Okres 14	K_3	K_3 / 2	1
Okres 16	K_6	K_6 / 6	8
Okres 19	K_3	K_3 / 3	1
Okres 21	K_5	K_5 / 1	8
Okres 25	K_3	K_3 / 4	1
	P_1	P_1 / 2	6
Okres 29	K_1	K_1 / 2	1
	K_3	K_3 / 5	1
Okres 35	P_3	P_3 / 2	6
Okres 39	P_1	P_1 / 3	6

Z analizy zleceń produkcyjnych wynika, że w analizowanym okresie czasu do produkcji zostało przekazanych 14 partii produkcyjnych, a dodatkowo jedna seria produkcyjna części **P_1** oznaczona jako wartość początkowa w momencie rozpoczęcia zbierania danych była już w trakcie produkcji. Zakwalifikowanie tej serii produkcyjnej do analizy podyktowane zostało tym, że wszystkie części z serii **P_1 / 1** części **P_1** zostały wykonane w analizowanym okresie czasu i miały istotny wpływ na przebieg produkcji.

Kolejnym etapem analizy danych z raportu linii ESP było zidentyfikowanie i przypisanie do poszczególnych operacji produkcyjnych maszyn oraz palet z przyrządami obróbczymi. Tabela 7.7 prezentuje informacje o tym, które maszyny brały udział w produkcji poszczególnych operacji dla danych części, gdzie **1** oznacza, że operacja była wykonywana na

danej maszynie. Tabela 7.8 przedstawia informacje o liczbie palet z oprzyrządowaniem wykorzystanych podczas produkcji analizowanych zleceń produkcyjnych. Z informacji zawartej w tabeli 7.8 wynika, że dla każdej operacji produkcyjnej była wykorzystywana tylko jedna paleta z oprzyrządowaniem. Opracowane tabele 7.7 i 7.8 były jednocześnie wsadem danych dla zmiennych w środowisku symulacji programu Witness do sterowania alternatywnymi maszynami (**BazaAlt_Op**) i liczbą palet (**BazaPrzyrz**).

Tabela 7.7. Maszyny wykorzystane w poszczególnych operacjach dla części wyprodukowanych w analizowanym okresie czasu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z linii ESP

Nazwa części: Nr operacji Nr maszyny	K_1				K_2				K_3				K_4				K_5		K_6		P_1		P_2		P_3		P_4		
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1		
M1	1	1	1	1													1	1											
M2																			1	1	1	1							
M3											1	1													1	1			
M4									1	1																			

Tabela 7.8. Liczba palet z oprzyrządowaniem wykorzystanych dla części wyprodukowanych w analizowanym okresie czasu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z linii ESP

Nazwa części Nr operacji	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	P_1	P_2	P_3	P_4
1	1		1		1	1	1		1	
2	1		1		1	1	1		1	
3	1		1							
4	1		1							

Pozyskane dane rzeczywiste (z tabel: 7.6, 7.7 i 7.8) z raportu linii ESP zostały zaimportowane do plików Excel, które stały się jednocześnie danymi wejściowymi do wirtualnego modelu linii ESP. Start i koniec symulacji został ustawiony na tę samą datę i godzinę, jaka była wykazana w raporcie. W wirtualnym modelu została dodana funkcjonalność pozwalająca automatycznie zapisywać w pliku Excel dane wyjściowe (*WIP* i *LT*) w takich samych okresach czasu, jakie zostały zastosowane w raporcie.

Na podstawie danych wygenerowanych przez wirtualny model linii ESP został opracowany raport. Wartości wskaźników *WIP* i *LT* z modelu przedstawia tabela 7.9. Mając dane wyjściowe rzeczywiste i z wirtualnego modelu linii ESP można było przystąpić do analizy

statystycznej. Wirtualny model linii ESP ma w swoim założeniu jak najdokładniej odzwierciedlić rzeczywistość. Wykonana walidacja modelu wirtualnego ma za zadanie zweryfikować to założenie.

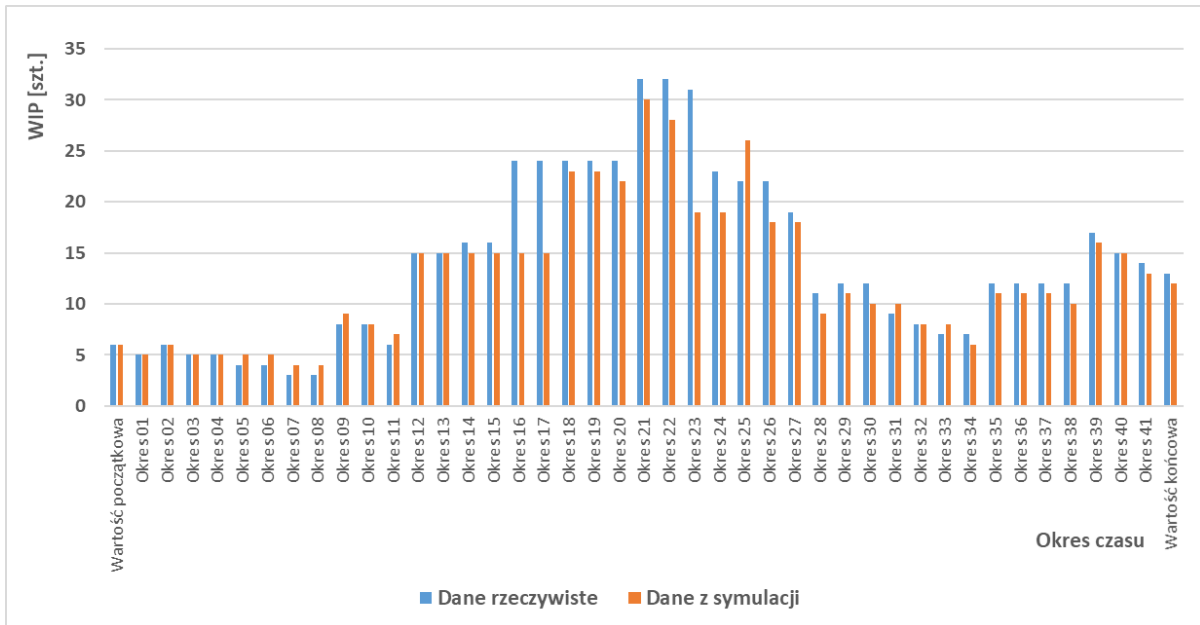
Tabela 7.9. Wartości wskaźników *WIP* i *LT* wygenerowanych automatycznie podczas symulacji w wybranym przedziale czasu do walidacji modelu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z wirtualnej symulacji linii ESP

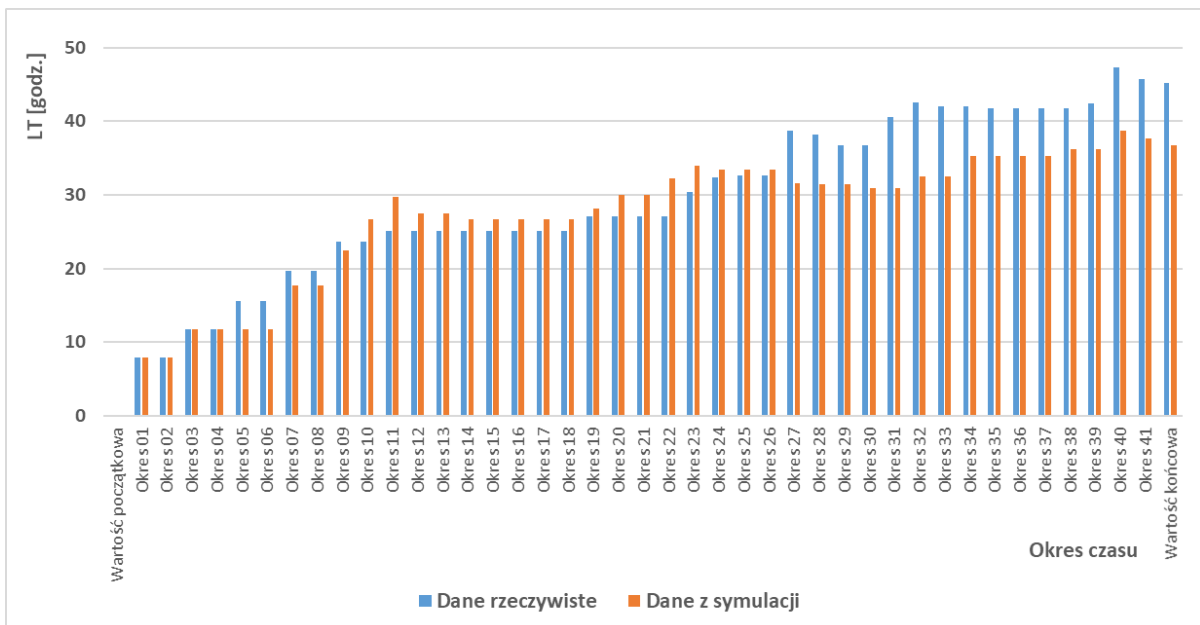
Wartości wskaźników <i>WIP</i> i <i>LT</i> wygenerowanych podczas symulacji przez wirtualny model linii ESP					
Numer okresu kontrolnego	WIP [szt.]	LT [godz.]	Numer okresu kontrolnego	WIP [szt.]	LT [godz.]
Wartość początkowa	6	0,00	Okres 21	30	30,01
Okres 01	5	7,96	Okres 22	28	32,25
Okres 02	6	7,96	Okres 23	19	33,90
Okres 03	5	11,74	Okres 24	19	33,39
Okres 04	5	11,74	Okres 25	26	33,39
Okres 05	5	11,74	Okres 26	18	33,39
Okres 06	5	11,74	Okres 27	18	31,60
Okres 07	4	17,67	Okres 28	9	31,39
Okres 08	4	17,67	Okres 29	11	31,39
Okres 09	9	22,42	Okres 30	10	30,90
Okres 10	8	26,70	Okres 31	10	30,90
Okres 11	7	29,72	Okres 32	8	32,44
Okres 12	15	27,48	Okres 33	8	32,44
Okres 13	15	27,48	Okres 34	6	35,26
Okres 14	15	26,64	Okres 35	11	35,26
Okres 15	15	26,64	Okres 36	11	35,26
Okres 16	15	26,64	Okres 37	11	35,26
Okres 17	15	26,64	Okres 38	10	36,22
Okres 18	23	26,64	Okres 39	16	36,22
Okres 19	23	28,15	Okres 40	15	38,65
Okres 20	22	30,01	Okres 41	13	37,66
			Wartość końcowa	12	36,67

Rysunki 7.4 i 7.5 przedstawiają w formie graficznej odpowiednio wskaźniki *WIP* i *LT* dla danych rzeczywistych i danych wygenerowanych przez model wirtualny. Zestawiając te dwa

zbiory danych można wykonać analizę korelacji. Wyniki analizy dadzą odpowiedź na postawione założenie, że wirtualny model odzwierciedla rzeczywistość i jest zdolny do przeprowadzenia eksperymentów, na podstawie których będzie można podejmować decyzje biznesowe związane z konfiguracją linii ESP.



Rysunek 7.4. Wartości wskaźnika *WIP* dla dwóch zestawów danych – rzeczywistych i z symulacji;
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 7.5. Wartości wskaźnika *LT* dla dwóch zestawów danych – rzeczywistych i z symulacji;
Źródło: opracowanie własne

Analizę korelacji dwóch zestawów wskaźników przeprowadzono w celu weryfikacji współzależności dwóch zmiennych. Brak tej zależności dyskwalifikowałby model jako narzędzie, w którym można tą rzeczywistość odzwierciedlić. Do analizy wybrano metodę Pearsona, która mówi o związku pomiędzy dwiema losowymi zmiennymi i jest miarą siły liniowego związku pomiędzy tymi zmiennymi. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona przedstawia wzór 10 [18]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

gdzie:

n – liczebność próbki,

\bar{x} – wartość średnia zmiennej X ,

\bar{y} – wartość średnia zmiennej Y ,

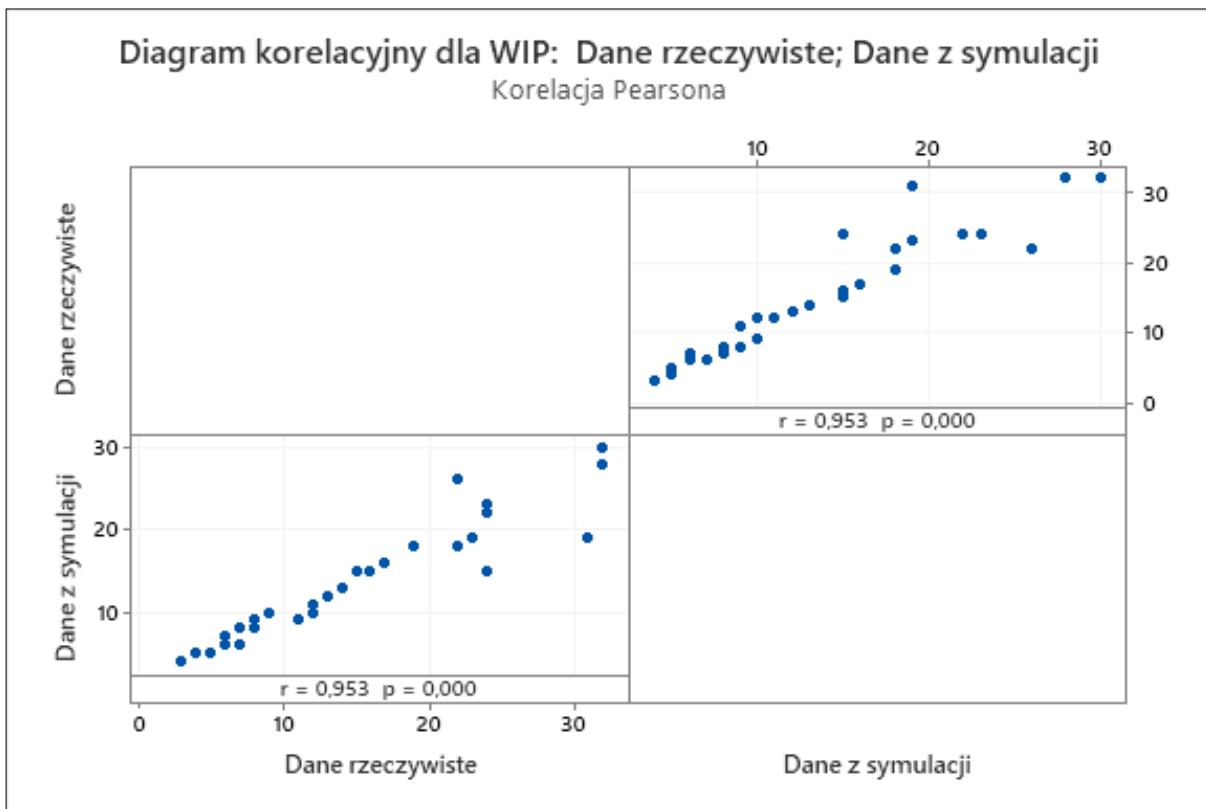
Współczynnik korelacji r przyjmuje wartości w przedziale pomiędzy -1 do 1. Korelacja liniowa dodatnia wskazuje, że wzrost wartości jednej cechy pociąga za sobą wzrost średnich wartości drugiej zaś korelacja ujemna wskazuje dokładnie odwrotną zależność. Wzrost wartości jednej zmiennej pociąga za sobą spadek wartości średnich drugiej. Wartość zerowa w analizie oznaczałaby brak korelacji liniowej pomiędzy zmiennymi [11]. W analizowanym przypadku oczekiwany jest dodatni współczynnik korelacji r . Tabela 7.10 przedstawia siłę dodatniego związku korelacji.

Tabela 7.10. Interpretacja wskaźnika r dla dodatniego związku korelacyjnego.

Źródło: Bojańczyk M, [11]

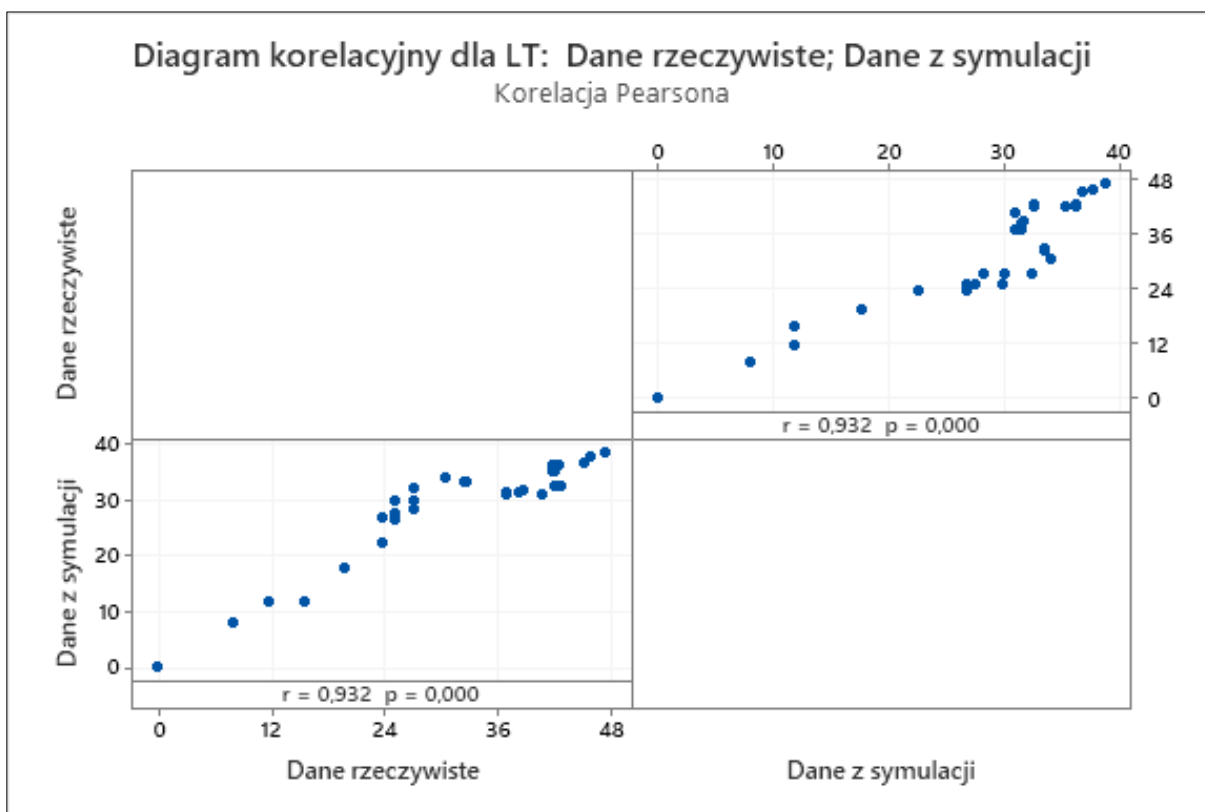
Współczynnik korelacji r	Siła dodatniego związku korelacyjnego
0,0 ÷ 0,2	brak korelacji, współzależność nie istnieje
0,2 ÷ 0,4	słaby stopień współzależności
0,4 ÷ 0,7	średnia siła współzależności
0,7 ÷ 0,9	silny stopień współzależności
0,9 ÷ 1,0	bardzo silny stopień współzależności
$r = 1$	korelacja całkowita

Analizę korelacji liniowej Pearsona przeprowadzono w programie statystycznym Minitab, wersja 20.1.3. Wyniki analizy wskaźnika *WIP* przedstawia rysunek 7.6 natomiast rysunek 7.7 przedstawia wyniki analizy wskaźnika *LT*.



Zmienna 1	Zmienna 2	N	<i>r</i>	<i>p</i> -Value
Dane z symulacji	Dane rzeczywiste	43	0,953	0,000

Rysunek 7.6. Analiza korelacji liniowej Pearsona zmiennych WIP;
Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab



Zmienna 1	Zmienna 2	N	r	p-Value
Dane z symulacji	Dane rzeczywiste	43	0,932	0,000

Rysunek 7.7. Analiza korelacji liniowej Pearsona zmiennych LT;
Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab

Wyniki przeprowadzonej analizy korelacji liniowej Pearsona jednoznacznie pokazują bardzo silny stopień współzależności zmiennych zarówno dla *WIP* jak i *LT*. Poziom istotności p (p -Value < 0,01) pozwala na twierdzenie, że zależność pomiędzy zmiennymi występuje [57].

W celu zbadania czy występuje istotna różnica pomiędzy dwoma populacjami wykonany został **2 sample T-Test** dla obu zestawów wskaźników *WIP* i *LT*. Test wykonany został w programie statystycznym Minitab, wersja 20.1.3.

Postawiono następującą hipotezę zerową:

Hipoteza zerowa (H_0): Nie ma istotnej różnicy pomiędzy danymi rzeczywistymi, a danymi pochodzącymi z symulacji.

Odrzucenie hipotezy zerowej skutkowałoby zaprzeczeniem jej i przyjęciem hipotezy alternatywnej (H_1):

Hipoteza alternatywna (H_1): Istnieje istotna różnica pomiędzy danymi rzeczywistymi, a danymi pochodzącymi z symulacji.

Dla wartości *p-Value* > 0,05 przyjmujemy Hipotezę 0 [23]. Wyniki dla **2 sample T-Test** w formie raportów przedstawiają odpowiednio dla *WIP* rysunek 7.8, a dla *LT* rysunek 7.9.

Method

μ_1 : population mean of Dane rzeczywiste
 μ_2 : population mean of Dane z symulacji
Difference: $\mu_1 - \mu_2$

Equal variances are assumed for this analysis.

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Dane rzeczywiste	43	13,74	8,07	1,2
Dane z symulacji	43	12,70	6,79	1,0

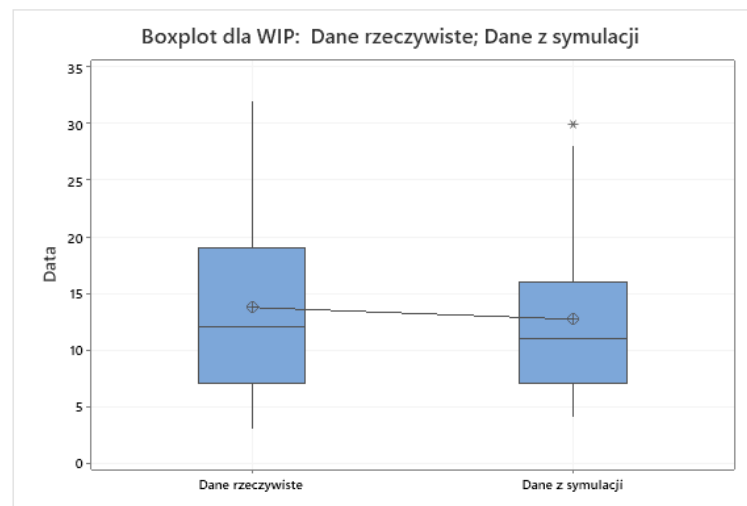
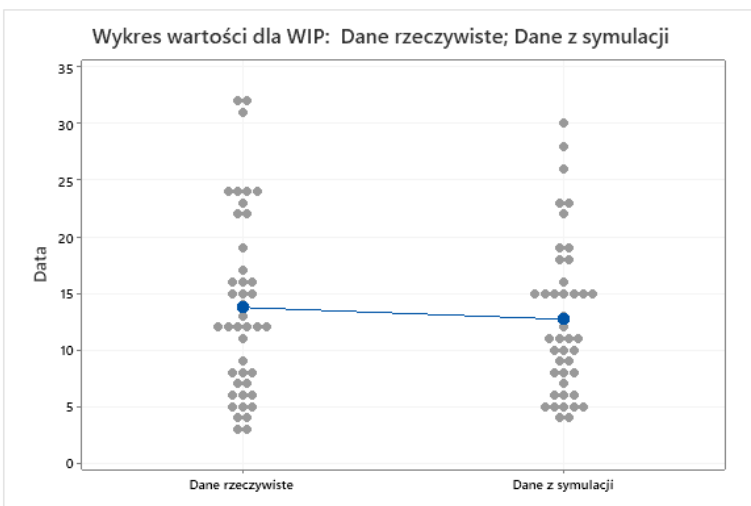
Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
1,05	7,46	(-2,15; 4,24)

Test

Null hypothesis $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Alternative hypothesis $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
0,65	84	0,517



Rysunek 7.8. Raport 2 sample T-Test dla WIP;
Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab

Method

μ_1 : population mean of Dane rzeczywiste
 μ_2 : population mean of Dane z symulacji
Difference: $\mu_1 - \mu_2$

Equal variances are assumed for this analysis.

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Dane rzeczywiste	43	29,3	11,7	1,8
Dane z symulacji	43	27,14	9,44	1,4

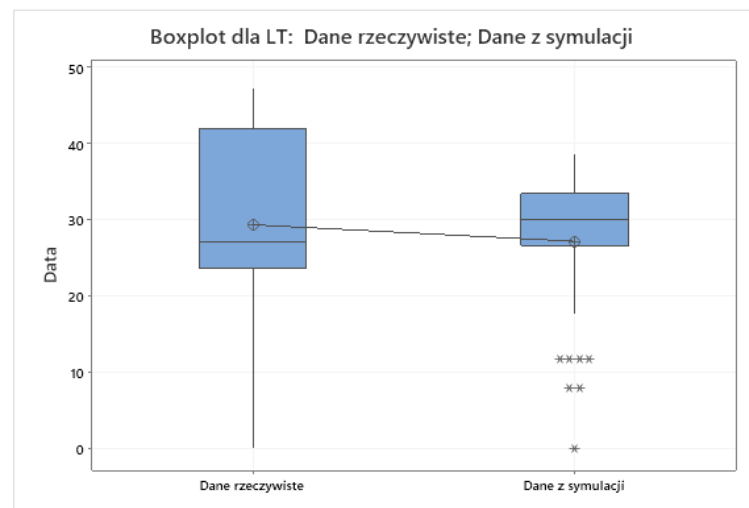
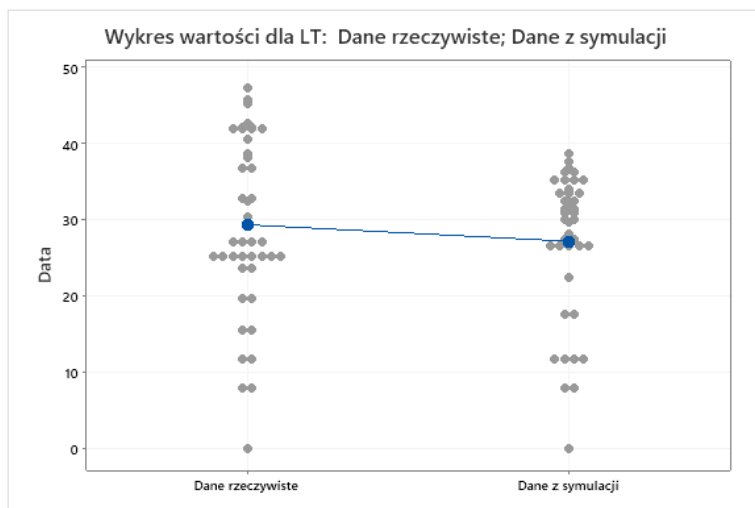
Estimation for Difference

Difference	Pooled StDev	95% CI for Difference
2,17	10,63	(-2,39; 6,73)

Test

Null hypothesis $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Alternative hypothesis $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

T-Value	DF	P-Value
0,94	84	0,348



Rysunek 7.9. Raport 2 sample T-Test dla LT;
Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab

Wartości *p-Value* dla analizowanych danych są większe od 0,05 i wynoszą odpowiednio 0,517 dla *WIP* i 0,348 dla *LT*. Wynik taki staje się więc podstawą do przyjęcia hipotezy zerowej świadczącej o tym, że nie ma statystycznie istotnej różnicy pomiędzy danymi rzeczywistymi i danymi pochodzącymi z symulacji [71].

Podsumowując przeprowadzoną walidację modelu pod kątem zdatności użycia do przeprowadzenia eksperymentów można jednoznacznie stwierdzić, że dane wyjściowe z wirtualnego modelu linii ESP nie wykazują istotnych różnic w stosunku do danych rzeczywistych pozyskanych bezpośrednio z wydziału produkcyjnego. Zarówno analiza *Korelacji Pearsona* jak i testy *2 sample T-Test* potwierdzają prawidłowość przygotowania wirtualnego modelu do symulacji. Przeprowadzone eksperymenty dadzą dane, które realnie będą wspierać decyzje biznesowe w obszarze linii ESP minimalizując ryzyko błędu.

8. Badania i eksperymenty symulacyjne

8.1. Założenia do badań eksperymentalnych

Głównym elementem/osią planu eksperymentów były koszty, jakie trzeba potencjalnie ponieść w celu rozszerzenia stanu obecnego o możliwość zastosowania kolejnych maszyn do realizacji określonych operacji produkcyjnych na określonych wyrobach dla zwiększenia elastyczności linii produkcyjnej poprzez maksymalizację wykorzystania czasu pracy maszyn. Plan eksperymentów oparto na kilku założeniach wynikających z analizy stanu obecnego, aspektów prawnych związanych z kodeksem pracy (czterobrygadowy system pracy operatorów) oraz ograniczeniami elastycznego systemu produkcyjnego.

Założenie 1 – możliwości magazynów narzędziowych (pojemność) nie pozwalają na zrealizowanie pełnej elastyczności linii ESP.

Każdy z magazynów narzędziowych posiada pojemność 475 narzędzi. Jest to limitowane konstrukcją magazynu narzędziowego i powierzchnią hali produkcyjnej. Dla 10 części, które są wykonywane w 27 operacjach technologicznych potrzeba byłoby 499 zestawów narzędziowych, żeby zapewnić dostępność narzędzi na każdej maszynie dla każdej operacji.

Założenie 2 – w celu redukcji ryzyka zatrzymania produkcji spowodowanej planowanym postojem maszyny (planowany przegląd/remont) lub nieplanowanym postojem maszyny (awaria) każda część będzie wdrożona, a jej proces produkcyjny zwalidowany na minimum dwóch maszynach dla wszystkich operacji.

Dostawy do klienta są priorytetem biznesowym każdego zakładu produkcyjnego. OTD (ang. *On Time Delivery*) jest wskaźnikiem dostaw na czas. Obok wskaźnika jakościowego jest to główny wskaźnik oceny firmy przez klienta. Przy poziomie planowanej produkcji bliskiej maksymalnej zdolności linii ESP, każdy przestój jednej z maszyn może spowodować opóźnienie skutkujące brakiem dostawy części na czas do klienta. Kwestia zapewnienia maksymalnego bezpieczeństwa dostaw do klienta i braku zatrzymania produkcji jest priorytetem. Cel jaki został postawiony w założeniu, to żeby każda część była wdrożona i zatwierdzona do produkcji na co najmniej dwóch maszynach.

Założenie 3 – w pierwszej kolejności wdrażane są brakujące operacje na maszynach, na których określone części już mogą być obrabiane w innych operacjach oraz dla których koszty wdrożenia są jak najmniejsze.

Koszty operacyjne są dla każdego zakładu kluczowe w celu utrzymania poziomu cen produktów. Każdy wzrost wydatków musi być precyzyjnie zaplanowany i skompensowany wzrostem produktywności. W tym przypadku za wzrost produktywności odpowiadać będzie wzrostowi wykorzystania maszyn. Przyjęto założenie, że rozszerzenie elastyczności o kolejne maszyny podniesie wskaźnik wykorzystania maszyn i zrekompensuje poniesione koszty zakupu dodatkowych zestawów narzędziowych. Weryfikacja tego założenia odbędzie się po przeprowadzeniu eksperymentów.

Założenie 4 – praca linii ESP zgodnie z planem będzie realizowana w trybie pracy czterobrygadowej (7 dni, 24 godziny).

Biznes plan zakładał, że linia ESP będzie pracować w systemie czterobrygadowym. Założenie to będzie stałe we wszystkich eksperymentach.

Założenie 5 – zlecenia produkcyjne będą zwalniane do produkcji w dniach od poniedziałku do piątku na pierwszej zmianie.

Praca Działu Planowania w zakładzie odbywa się tylko na pierwszej zmianie od poniedziałku do piątku. Jest to podyktowane liczbą zatrudnionych pracowników w poszczególnych obszarach Działu Planowania obsługujących różne produkty.

Założenie 6 – start każdego eksperymentu był ustawiony w wirtualnym modelu na 2 stycznia 2023 i trwał 20 tygodni odliczając pierwsze 24 godziny tzw. rozgrzewki, które nie były wliczane do wyników eksperymentów.

W nomenklaturze wirtualnego modelu czas rozgrzewki oznacza, że pomiar wskaźników w eksperymencie rozpoczyna się po zakończeniu rozgrzewki. Jest to istotne w przypadku, gdy plan produkcyjny eksperymentu rozpoczynał się od zerowego napełnienia produkcji w toku. W celu wyeliminowania wpływu braku *WIP* na mierzone i analizowane wskaźniki KPI wprowadzono w/w rozgrzewkę. Został ustalony taki sam czas trwania rozgrzewki dla wszystkich eksperymentów.

Założenie 7 – określone zostały trzy funkcje celu dla eksperymentów:

- *U* – dąży do maksimum,
- *WIP* – dąży do minimum,
- *LT* – dąży do minimum.

Założenie 8 – w symulacji nie uwzględniono części niezgodnych.

Oznacza to, że wszystkie części biorące udział w procesie produkcyjnym są uznawane za zgodne. Proces pomiaru części odbywa się poza obszarem linii ESP i nie wpływa na przepływ części przez linię, nie wpływa na *WIP*, ani *LT*.

Założenie 9 – w symulacji nie uwzględniono współczynnika awarii linii ESP.

Brak jest wystarczających danych historycznych do prawidłowego oszacowania poziomu awaryjności systemu ESP. W obecnej chwili jest to ograniczenie opracowanego modelu. W przyszłości po dłuższym użytkowaniu linii i zebraniu wystarczającej liczby danych współczynnik ten zostanie dodany do wirtualnego modelu linii ESP.

Założenie 10 – do planu eksperymentów wprowadzono 3 zmienne:

- **BazaAlt_Op** – zmienna definiująca aktywną operację dla części na danej maszynie. Wartość zmiennej **1** oznacza, że operacja jest aktywna tzn. wdrożona i zatwierdzona do produkcji natomiast wartość zmiennej **0** oznacza, że operacja jest nieaktywna tzn. niewdrożona do wykonania na danej maszynie. Tabela 8.1 przedstawia aktualny status zmiennych **BazaAlt_Op** dla każdej części pod kątem wdrożonych i zatwierdzonych do produkcji operacji. Tabela 8.2 przedstawia aktualny status zmiennych **BazaAlt_Op** dla każdej części i operacji pod kątem dostępności narzędzi obróbczych. Tabela 8.3 zwraca wartość **1** dla zmiennej **BazaAlt_Op** w przypadku, gdy jest możliwość wykonania kompletnej części (wszystkie operacje) na danej maszynie. Zgodnie z **Założeniem 2** celem jest możliwość obróbki kompletnej części, czyli możliwość wykonania wszystkich operacji produkcyjnych na co najmniej dwóch maszynach, zatem do eksperymentów zostanie użyty zestaw zmiennych z tabeli 8.3. Pozostałe dwie tabele zmiennych **BazaAlt_Op** posłużą do oszacowania ewentualnych kosztów, jakie trzeba byłoby ponieść w celu rozszerzenia elastyczności linii i spełnienia **Założenia 2**;

Tabela 8.1. Aktualny status zmiennej **BazaAlt_Op** definiujący możliwości wykonywania poszczególnych części i operacji na maszynach determinowany wdrożeniem operacji;

Źródło: opracowanie własne

Nazwa części:	K_1				K_2				K_3				K_4				K_5		K_6		P_1		P_2		P_3		P_4	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	
M1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
M3	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
M4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 8.2. Aktualny status zmiennej **BazaAlt_Op** definiujący możliwości wykonywania poszczególnych operacji na części na określonych maszynach determinowany dostępnością narzędzi.

Źródło: opracowanie własne

Nazwa części:	K_1				K_2				K_3				K_4				K_5		K_6		P_1		P_2		P_3		P_4	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	
M1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
M3	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
M4	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

Tabela 8.3. Aktualny status zmiennej **BazaAlt_Op** definiujący możliwości wykonywania kompletnych części (wszystkich operacji na części) na maszynach determinowany dostępnością narzędzi.

Źródło: opracowanie własne

Nr Maszyny / Nazwa części	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	P_1	P_2	P_3	P_4
M1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
M2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
M3	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
M4	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0

- **Min_Max** – zmienna definiująca minimalną i maksymalną liczbę sztuk danej części na linii ESP. *Minimum* oznacza minimalną liczbę sztuk dla danej części, przy osiągnięciu której generowane jest automatycznie zapotrzebowanie na kolejne zlecenie produkcyjne. *Maksimum* oznacza maksymalną liczbę sztuk dla danej części, jaka może znajdować się jednocześnie na linii ESP. Tabela 8.4 przedstawia status startowy zmiennych **Min_Max** ustalony przez Dział Planowania;

Tabela 8.4. Aktualny status zmiennej **Min_Max** definiujący minimalną i maksymalną liczbę sztuk części określonego rodzaju na linii ESP.

Źródło: opracowanie własne

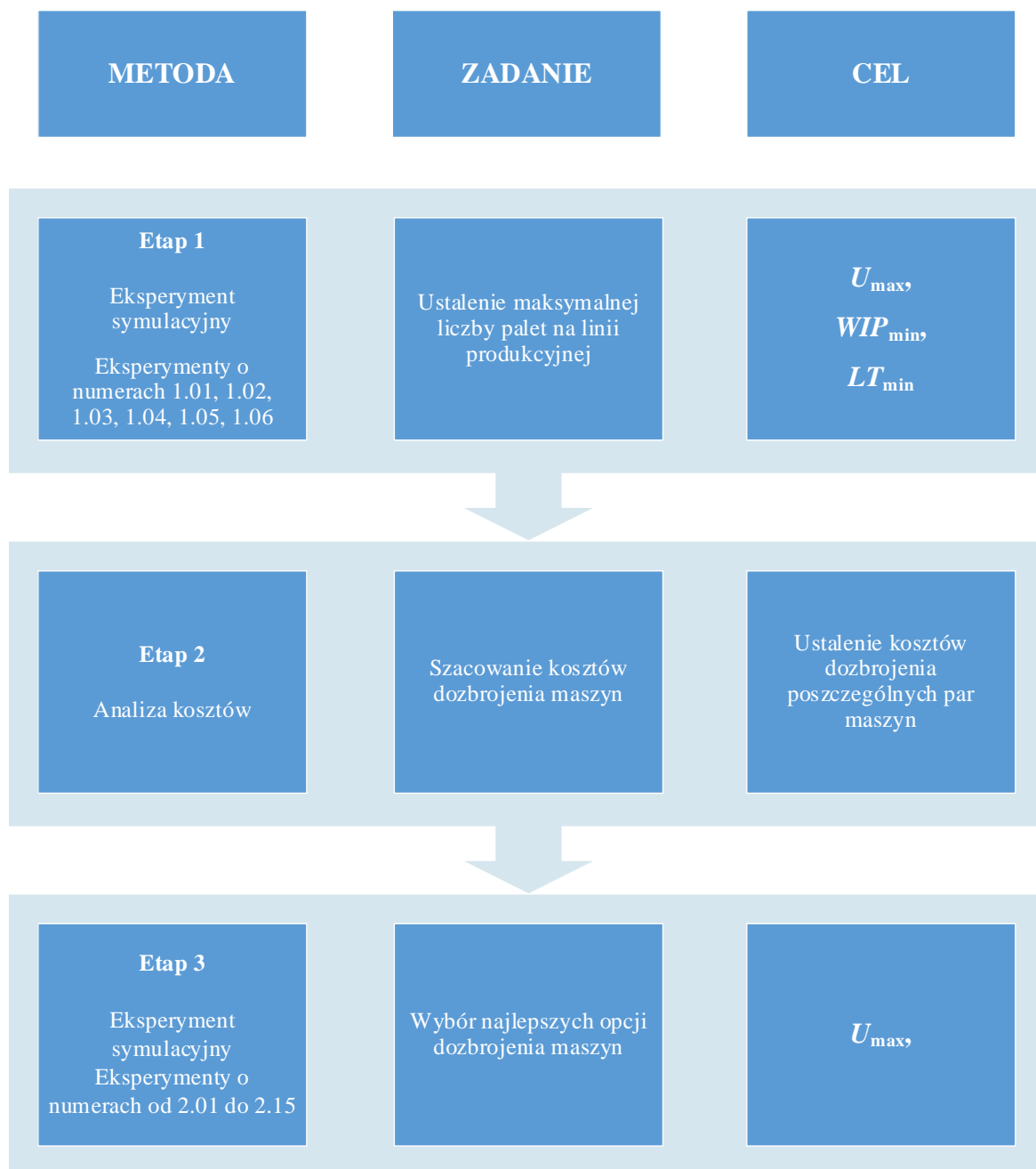
Nazwa części:	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	P_1	P_2	P_3	P_4
Min	1	2	1	2	4	4	4	4	4	0
Max	2	4	2	4	12	12	8	8	8	3

- **IleW_ESP** – zmienna ograniczająca maksymalną liczbę wszystkich części, jakie mogą się znajdować na linii ESP. Maksymalna pojemność w obszarze linii ESP to 26 palet z częściami.

8.2. Plan eksperymentów

Plan eksperymentów został podzielony na dwa zestawy eksperymentów. W pierwszym zestawie znajdują się eksperymenty badające stan obecny oraz pełną elastyczność linii ESP pod kątem ustalenia maksymalnej liczby palet na linii produkcyjnej (tabela 8.5). Wyniki były punktem odniesienia dla kolejnego etapu eksperymentów. W drugim zestawie zostały ujęte eksperymenty w celu wyboru najlepszej opcji dobrojenia maszyn dla części, dla których uzupełnienie brakujących zestawów narzędziowych będzie wiązało się z kontrolą ponoszonych kosztów dodatkowych zestawów narzędziowych (tabela 8.6). Tabele 8.5 i 8.6 prezentują łącznie wszystkie zaplanowane eksperymenty. Natomiast w dalszej części pracy omówione są szczegółowo poszczególne fragmenty planu eksperymentów wraz z motywacją dla wyboru wartości dla poszczególnych zmiennych wejściowych.

Plan eksperymentów miał charakter kroczący i może on zostać podzielony na dwa etapy, które były rozdzielone etapem pośrednim związanym z szacowaniem kosztów (rysunek 8.1). Celem pierwszego etapu badań symulacyjnych było ustalenie maksymalnej liczby palet na linii (eksperymenty o numerach 1.01, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05, 1.06). Celem etapu pośredniego było oszacowanie kosztów dobrojenia maszyn dla umożliwienia wykonania na nich wszystkich operacji na określonych wyrobach. Celem drugiego etapu badań symulacyjnych było przyjęcie najlepszego scenariusza wyboru dwóch maszyn pod realizację każdej z części za wyjątkiem części P_4, która jest produkowana w niewielkiej ilości (eksperymenty o numerach 2.01, 2.02, 2.03, 2.04, 2.05, 2.06, 2.07, 2.08, 2.09, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 i 2.15).



Rysunek 8.1. Plan badań;
 Źródło: opracowanie własne

W celu poprawnej identyfikacji eksperymentów zostały one ponumerowane według klucza:

- **1.**** - eksperymenty z pierwszego zestawu,
- **2.**** - eksperymenty z drugiego zestawu.

Tabela 8.5. Tabela zbiorcza eksperymentów pierwszego etapu od 1.01 do 1.06;
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	Zmienna	Sttus zmiennej [wartość]
1.01	BazaAlt_Op	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
1.02	BazaAlt_Op	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	25
1.03	BazaAlt_Op	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	24
1.04	BazaAlt_Op	1 dla wszystkich części
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
1.05	BazaAlt_Op	1 dla wszystkich części
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	25
1.06	BazaAlt_Op	1 dla wszystkich części
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	24

Tabela 8.6. Tabela zbiorcza eksperymentów etapu drugiego od 2.01 do 2.15;
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	Zmienna	Sttus zmiennej [wartość]
2.01	BazaAlt_Op K_1 dla M1	1
	BazaAlt_Op K_1 dla M2	1
	BazaAlt_Op K_1 dla M3	0
	BazaAlt_Op K_1 dla M4	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.02	BazaAlt_Op K_1 dla M1	1
	BazaAlt_Op K_1 dla M2	0
	BazaAlt_Op K_1 dla M3	1
	BazaAlt_Op K_1 dla M4	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.03	BazaAlt_Op K_1 dla M1	1
	BazaAlt_Op K_1 dla M2	0
	BazaAlt_Op K_1 dla M3	0
	BazaAlt_Op K_1 dla M4	1
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26

Nr eksperymentu	Zmienna	Sttus zmiennej [wartość]
2.04	BazaAlt_Op K_2 dla M3	1
	BazaAlt_Op K_2 dla M1	1
	BazaAlt_Op K_2 dla M2	0
	BazaAlt_Op K_2 dla M4	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.05	BazaAlt_Op K_2 dla M3	1
	BazaAlt_Op K_2 dla M1	0
	BazaAlt_Op K_2 dla M2	1
	BazaAlt_Op K_2 dla M4	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.06	BazaAlt_Op K_2 dla M3	1
	BazaAlt_Op K_2 dla M1	0
	BazaAlt_Op K_2 dla M2	0
	BazaAlt_Op K_2 dla M4	1
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.07	BazaAlt_Op K_4 dla M3	1
	BazaAlt_Op K_4 dla M4	1
	BazaAlt_Op K_4 dla M2	0
	BazaAlt_Op K_4 dla M1	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.08	BazaAlt_Op K_4 dla M3	1
	BazaAlt_Op K_4 dla M4	0
	BazaAlt_Op K_4 dla M2	1
	BazaAlt_Op K_4 dla M1	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.09	BazaAlt_Op K_4 dla M3	1
	BazaAlt_Op K_4 dla M4	0
	BazaAlt_Op K_4 dla M2	0
	BazaAlt_Op K_4 dla M1	1
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.10	BazaAlt_Op P_1 dla M2	1
	BazaAlt_Op P_1 dla M3	1
	BazaAlt_Op P_1 dla M4	0
	BazaAlt_Op P_1 dla M1	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26

Nr eksperymentu	Zmienna	Status zmiennej [wartość]
2.11	BazaAlt_Op P_1 dla M2	1
	BazaAlt_Op P_1 dla M3	0
	BazaAlt_Op P_1 dla M4	1
	BazaAlt_Op P_1 dla M1	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.12	BazaAlt_Op P_1 dla M2	1
	BazaAlt_Op P_1 dla M3	0
	BazaAlt_Op P_1 dla M4	0
	BazaAlt_Op P_1 dla M1	1
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.13	BazaAlt_Op P_2 dla M2	1
	BazaAlt_Op P_2 dla M3	1
	BazaAlt_Op P_2 dla M4	0
	BazaAlt_Op P_2 dla M1	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.14	BazaAlt_Op P_2 dla M2	1
	BazaAlt_Op P_2 dla M3	0
	BazaAlt_Op P_2 dla M4	1
	BazaAlt_Op P_2 dla M1	0
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26
2.15	BazaAlt_Op P_2 dla M2	1
	BazaAlt_Op P_2 dla M3	0
	BazaAlt_Op P_2 dla M4	0
	BazaAlt_Op P_2 dla M1	1
	BazaAlt_Op dla pozostałych M	Zgodnie z Tab. 8.3
	Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4
	IleW_ESP	26

Jak wcześniej wspomniano w pierwszym etapie zostały przeprowadzone eksperymenty badające stan obecny dla zmiennych **BazaAlt_Op** (opcja bezkosztowa) i **Min_Max** oraz w trzech wariantach dla zmiennej **IleW_ESP** – wartości **24**, **25** i **26** (eksperymenty o numerach: 1.1, 1.2 i 1.3). Następnie w celu porównania wyników dla wskaźnika U zostały przeprowadzone eksperymenty z pełną elastycznością linii ESP w takiej samej konfiguracji zmiennej **IleW_ESP** (eksperymenty o numerach: 1.4, 1.5 i 1.6).

Tabela 8.7 prezentuje plan dla pierwszego zestawu trzech eksperymentów. Zmianie podlega tylko zmienna **IleW_ESP** natomiast zmienne **BazaAlt_Op** i **Min_Max** pozostają na

poziomie stanu obecnego. Celem eksperymentu jest sprawdzenie jaki wpływ na wskaźnik *WIP* i *LT* ma zmienna **IleW_ESP** przy aktualnym stanie pozostałych zmiennych **BazaAlt_Op** i **Min_Max**. Miało to na celu sprawdzenie, czy gdy zostanie zmniejszona maksymalna liczba palet, które mogą znajdować się w systemie zmniejszy się również wartość *WIP* oraz skróci się *LT*. Wyniki zostaną użyte do porównania stanu obecnego z pełną elastycznością linii, czyli wynikami eksperymentów 1.4, 1.5 oraz 1.6.

Tabela 8.7. Plan trzech eksperymentów, zmienne **BazaAlt_Op** i **Min_Max** zgodne ze stanem obecnym;

Źródło: opracowanie własne

Numer eksperymentu:	1.01	1.02	1.03
Zmienna NAZWA	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ
BazaAlt_Op	Zgodnie z Tab. 8.3	Zgodnie z Tab. 8.3	Zgodnie z Tab. 8.3
Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4	Zgodnie z Tab. 8.4	Zgodnie z Tab. 8.4
IleW_ESP	26	25	24

Tabela 8.8 prezentuje plan kolejnych trzech eksperymentów, gdzie zmienna **BazaAlt_Op** przybiera wartość **1** dla wszystkich części (pełna elastyczność – każda operacja każdej części może być realizowana na każdej maszynie). Pozostałe zmienne tak, jak we wcześniejszym zestawie eksperymentów. Celem eksperymentu jest sprawdzenie, czy zmienna **IleW_ESP** ma wpływ na wszystkie trzy funkcje celu (U_{max} , WIP_{min} , LT_{min}) przy pełnej elastyczności linii ESP.

Wyniki eksperymentu zostaną użyte do określenia celu dla wskaźnika *U* dla każdej z maszyn indywidualnie, jak i dla całej linii ESP.

Tabela 8.8. Plan trzech eksperymentów, wartość zmiennej **BazaAlt_Op 1** dla wszystkich części i maszyn (pełna elastyczność), zmienna **Min_Max** zgodne ze stanem obecnym;

Źródło: opracowanie własne

Numer eksperymentu:	1.04	1.05	1.06
Zmienna NAZWA	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ
BazaAlt_Op	1 dla wszystkich części	1 dla wszystkich części	1 dla wszystkich części
Min_Max	Zgodnie z Tab. 8.4	Zgodnie z Tab. 8.4	Zgodnie z Tab. 8.4
IleW_ESP	26	25	24

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów zostaną poddane analizie i na ich podstawie zostanie wybrana maksymalna liczba palet na linii, która w kolejnych eksperymentach zostanie przyjęta za wartość stałą.

Ponadto, w kolejnych eksperymentach wartości zmiennej **Min_Max** pobierane są z Tabeli 8.4, a wartości zmiennej **BazaAlt_Op** dla maszyn, które nie biorą udziału w eksperymencie pobierane są z Tabeli 8.3.

Jak wspomniano wcześniej, w drugim etapie zostały zaplanowane i wykonane eksperymenty dla części, dla których uzupełnienie brakujących zestawów narzędziowych będzie wiązało się z kontrolą ponoszonych kosztów.

Po przeanalizowaniu stanu dostępności narzędzi na poszczególnych maszynach pod kątem ich braku i poniesienia potencjalnie kosztów w celu ich uzupełnienia została opracowana tabela 8.9. Na tej podstawie można określić koszt zakupu brakujących zestawów narzędziowych zarówno dla pojedynczej operacji, jak i wszystkich operacji dla określonej części. Jest to niezbędne dla prawidłowego zaplanowania kolejnych eksperymentów, aby było spełnione **Założenie 3** o minimalizowaniu kosztów podczas rozszerzania elastyczności linii ESP o kolejne maszyny i **Założenie 2** o wdrożeniu i zatwierdzeniu do produkcji każdej części dla wszystkich operacji na minimum dwóch maszynach.

Tabela 8.9. Zbiorcze wyniki dotyczące dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia w przypadku rozszerzenia elastyczności linii ESP;

Źródło: opracowanie własne

	K_1				K_2				K_3				K_4				K_5		K_6		P_1		P_2		P_3		P_4					
	1				2				3				4				5		6		7		8		9		10					
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1							
	Średni koszt zestawu narzędziowego [PLN]				4 341				4 009				4 132				4 009				3 508		3 508		2 448		2 448		2 448		2 448	
M 1	Liczba brakujących narzędzi na operację	0	0	0	0	8	4	22	6	28	5	47	19	18	1	47	16	0	0	0	0	75	17	48	18	67	19	26				
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	0	0	0	0	32072	16036	88198	24054	115696	20660	194204	78508	72162	4009	188423	64144	0	0	0	0	183600	41616	117504	44064	164016	46512	63648				
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	0				160 360				409 068				328 738				0		0		225 216		161 568		210 528		63 648				
	Procent brakujących narzędzi na operację	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	50,0%	44,4%	38,6%	23,1%	84,8%	31,3%	62,7%	65,5%	94,7%	20,0%	66,2%	59,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%	98,0%	94,7%	100,0%	95,0%	96,3%				
M 2	Liczba brakujących narzędzi na operację	16	0	0	0	10	4	21	6	30	6	46	19	18	1	46	16	0	0	0	0	0	0	0	0	36	15	0				
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	69456	0	0	0	40090	16036	84189	24054	123960	24792	190072	78508	72162	4009	184414	64144	0	0	0	0	0	0	0	0	88128	36720	0				
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	69 456				164 369				417 332				324 729				0		0		0		0		124 848		0				
	Procent brakujących narzędzi na operację	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%	62,5%	44,4%	36,8%	23,1%	90,9%	37,5%	61,3%	65,5%	94,7%	20,0%	64,8%	59,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	53,7%	75,0%	0,0%				
M 3	Liczba brakujących narzędzi na operację	0	7	20	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	9	51	8	47	14	27	14	0	0	13				
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	0	30387	86820	21705	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	136812	31572	178908	28064	115056	34272	66096	34272	0	0	31824			
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	138 912				0				0				0				168 384		206 972		149 328		100 368		0		31 824				
	Procent brakujących narzędzi na operację	0,0%	35,0%	29,9%	14,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	95,1%	75,0%	96,2%	88,9%	62,7%	82,4%	55,1%	73,7%	0,0%	0,0%	48,1%			
M 4	Liczba brakujących narzędzi na operację	0	0	35	16	7	5	34	17	0	0	0	0	13	1	19	3	38	9	51	8	47	15	27	14	0	0	13				
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	0	0	151935	69456	28063	20045	136306	68153	0	0	0	0	52117	4009	76171	12027	133304	31572	178908	28064	115056	36720	66096	34272	0	0	31824				
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	221 391				252 567				0				144 324				164 876		206 972		151 776		100 368		0		31 824				
	Procent brakujących narzędzi na operację	0,0%	0,0%	52,2%	45,7%	43,8%	55,6%	59,6%	65,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	68,4%	20,0%	26,8%	11,1%	92,7%	75,0%	96,2%	88,9%	62,7%	88,2%	55,1%	73,7%	0,0%	0,0%	48,1%				

W pierwszej kolejności przeanalizowano możliwość przesunięcia narzędzi z jednej maszyny na inną, tak, aby było spełnione **Założenie 2**. Następnie przeanalizowano konieczność dobrożenia maszyn w dodatkowe narzędzia, jeżeli po zaproponowaniu przesunięć **Założenie 2** ciągle nie było spełnione w odniesieniu do określonych wyrobów. W dalszej części niniejszego rozdziału omówiono szczegółowo wyniki analiz dla każdej z części produkowanych na linii.

Szczegółowa analiza części **K_1** wykazała, że po przesunięciu zestawu/zestawów narzędziowych pomiędzy maszynami można uzyskać możliwość wykonania kompletu operacji na drugiej maszynie. Spełnione zostałyby zatem **Założenie 2** dla części **K_1** mówiące o wymogu wdrożenia i zatwierdzenia do produkcji każdej części na minimum dwóch maszynach dla wszystkich operacji. Tabela 8.10 przedstawia szczegóły dostępności narzędzi dla części **K_1** wraz z potencjalnymi kosztami do poniesienia.

Tabela 8.10. Analiza dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia dla części **K_1**;
Źródło: opracowanie własne

		K_1			
		1			
		1	2	3	4
		Średni koszt zestawu narzędziowego [PLN]			
		4 341			
M 1	Liczba brakujących narzędzi na operację	0	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	0	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	0			
	Procent brakujących narzędzi na operację	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
M 2	Liczba brakujących narzędzi na operację	16	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	69456	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	69 456			
	Procent brakujących narzędzi na operację	50,0%	0,0%	0,0%	0,0%
M 3	Liczba brakujących narzędzi na operację	0	7	20	5
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	0	30387	86820	21705
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	138 912			
	Procent brakujących narzędzi na operację	0,0%	35,0%	29,9%	14,3%
M 4	Liczba brakujących narzędzi na operację	0	0	35	16
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	0	0	151935	69456
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	221 391			
	Procent brakujących narzędzi na operację	0,0%	0,0%	52,2%	45,7%

Maszyna M1 posiada już komplet narzędzi do wykonania wszystkich operacji na wyrobie **K_1**. W celu bezkosztowego dobrożenia drugiej maszyny i umożliwienia wykonywania kompletu operacji na danej maszynie dostępne są trzy scenariusze:

- **1 scenariusz** – brakujące 16 zestawów narzędziowych na maszynie **M2** dla operacji 1 przesuwane są z maszyny **M3**,
- **2 scenariusz** – brakujące odpowiednio 7, 20 i 5 zestawów narzędziowych na maszynie **M3** dla operacji 2, 3 i 4 przesuwane są z maszyny **M2**,
- **3 scenariusz** – brakujące odpowiednio 35 i 16 zestawy narzędziowe na maszynie **M4** dla operacji 3 i 4 przesuwane są z maszyny **M2**.

W każdym przypadku uzyskuje się dostępność narzędzi do wykonania kompletnej części na kolejnej maszynie. Dla zaprezentowanych trzech scenariuszy został przygotowany zestaw eksperymentów, który przedstawia tabela 8.11. Celem eksperymentu jest wybór najlepszej opcji z w/w scenariuszy pod kątem wskaźnika U zarówno dla pojedynczych maszyn jak i całej linii ESP. Sprawdzone zostanie również wpływ proponowanych zmian na pozostałe wskaźniki WIP i LT .

Tabela 8.11. Plan trzech eksperymentów, wartość zmiennej **BazaAlt_Op** dla części **K_1** zgodna ze scenariuszami 1, 2 i 3, zmienna **Min_Max** zgodne ze stanem obecnym, zmienna **IleW_ESP** wartość maksymalna **26**;

Źródło: opracowanie własne

Numer eksperymentu:	2.01	2.02	2.03
Zmienna NAZWA	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ
BazaAlt_Op K_1 dla M1	1	1	1
BazaAlt_Op K_1 dla M2	1	0	0
BazaAlt_Op K_1 dla M3	0	1	0
BazaAlt_Op K_1 dla M4	0	0	1

Drugi zestaw eksperymentów został przeprowadzony dla opcji, gdzie konieczny jest zakup brakujących zestawów narzędziowych. Analizy, a następnie symulacje uwzględniające dane przedstawione w tabeli 8.3 przeprowadzono dla części **K_2**, **K_4**, **P_1** i **P_2**. Jak już wcześniej wspomniano, pominięto część **P_4**, ponieważ produkowana jest ich niewielka ilość. Natomiast dla wymienionych części przeprowadzono analizę kosztów zakupu zestawów narzędziowych w celu rozszerzenia możliwości wykonywania kompletu operacji na drugiej maszynie, tak, aby zostało spełnione **Założenie 2** mówiące o wymogu wdrożenia i zatwierdzenia do produkcji każdej części na minimum dwóch maszynach dla wszystkich operacji.

Dla części **K_2** w pełni wyposażona w narzędzia obróbcze pozwalające na wykonanie wszystkich operacji technologicznych jest maszyna **M3**. Pozostałe maszyny posiadają braki w zestawach narzędziowych. Część **K_2** została poddana analizie pod kątem potencjalnych

kosztów związanych z zakupem zestawów narzędziowych w celu dozbrojenia jednej z pozostałych maszyn. Tabela 8.12 przedstawia szczegóły w/w analizy.

Tabela 8.12. Analiza dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia dla części **K_2**;

Źródło: opracowanie własne

Nazwa części		K_2			
Numer operacji		1	2	3	4
Średni koszt zestawu narzędziowego [PLN]		4 009			
M 1	Liczba brakujących narzędzi na operację	8	4	22	6
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	32072	16036	88198	24054
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	160 360			
	Procent brakujących narzędzi na operację	50,0%	44,4%	38,6%	23,1%
M 2	Liczba brakujących narzędzi na operację	10	4	21	6
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	40090	16036	84189	24054
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	164 369			
	Procent brakujących narzędzi na operację	62,5%	44,4%	36,8%	23,1%
M 3	Liczba brakujących narzędzi na operację	0	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	0	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	0			
	Procent brakujących narzędzi na operację	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
M 4	Liczba brakujących narzędzi na operację	7	5	34	17
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	28063	20045	136306	68153
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	252 567			
	Procent brakujących narzędzi na operację	43,8%	55,6%	59,6%	65,4%

W celu dozbrojenia kolejnej maszyny i umożliwienia wykonywania kompletu operacji na dwóch maszynach dostępne są trzy scenariusze:

- **1 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M1**, najniższy koszt,
- **2 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M2**, zbliżony koszt do scenariusza 1,
- **3 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M4**, najwyższy koszt.

Dla przedstawionych trzech scenariuszy został przygotowany zestaw eksperymentów, który przedstawia tabela 8.13. Celem eksperymentu jest wybór najlepszej opcji z w/w scenariuszy pod kątem wskaźnika *U* uwzględniając koszty jakie należałoby ponieść związane z zakupem brakujących zestawów narzędziowych. Sprawdzone zostanie również wpływ proponowanych zmian na pozostałe wskaźniki *WIP* i *LT*.

Tabela 8.13. Plan trzech eksperymentów dla części **K_2** zgodnie ze scenariuszami 1, 2 i 3, od najtańszej do najdroższej opcji doposażenia maszyny, zmienna **Min_Max** zgodne ze stanem obecnym, zmienna **IleW_ESP** wartość maksymalna **26**;

Źródło: opracowanie własne

Numer eksperymentu:	2.04	2.05	2.06
Zmienna NAZWA	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ
BazaAlt_Op K_2 dla M3	1	1	1
BazaAlt_Op K_2 dla M1	1	0	0
BazaAlt_Op K_2 dla M2	0	1	0
BazaAlt_Op K_2 dla M4	0	0	1

Dla pozostałych trzech części **K_4**, **P_1** i **P_2** wykonano taką samą jak dla części **K_2** analizę kosztów do poniesienia w celu doposażenia maszyn i spełnienia warunku **Założenia 2**. Wyniki analiz kosztów przedstawiają odpowiednio tabele 8.14 dla części **K_4**, i 8.15 dla części **P_1** i **P_2**. Na podstawie w/w analiz kosztów zostaną zaplanowane i przeprowadzone kolejne eksperymenty.

Tabela 8.14. Analiza dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia dla części **K_4**;

Źródło: opracowanie własne

	Nazwa części	K_4			
	Numer operacji	1	2	3	4
	Średni koszt zestawu narzędziowego [PLN]	4 009			
M 1	Liczba brakujących narzędzi na operację	18	1	47	16
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	72162	4009	188423	64144
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	328 738			
	Procent brakujących narzędzi na operację	94,7%	20,0%	66,2%	59,3%
M 2	Liczba brakujących narzędzi na operację	18	1	46	16
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	72162	4009	184414	64144
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	324 729			
	Procent brakujących narzędzi na operację	94,7%	20,0%	64,8%	59,3%
M 3	Liczba brakujących narzędzi na operację	0	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	0	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	0			
	Procent brakujących narzędzi na operację	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
M 4	Liczba brakujących narzędzi na operację	13	1	19	3
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	52117	4009	76171	12027
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	144 324			
	Procent brakujących narzędzi na operację	68,4%	20,0%	26,8%	11,1%

Tabela 8.15. Analiza dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia dla części **P_1** i **P_2**;

Źródło: opracowanie własne

	Nazwa części	P_1		P_2	
		1	2	1	2
	Numer operacji				
	Średni koszt zestawu narzędziowego [PLN]	2 448		2 448	
M 1	Liczba brakujących narzędzi na operację	75	17	48	18
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	183600	41616	117504	44064
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	225 216		161 568	
	Procent brakujących narzędzi na operację	100,0%	100,0%	98,0%	94,7%
M 2	Liczba brakujących narzędzi na operację	0	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	0	0	0	0
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	0		0	
	Procent brakujących narzędzi na operację	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
M 3	Liczba brakujących narzędzi na operację	47	14	27	14
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	115056	34272	66096	34272
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	149 328		100 368	
	Procent brakujących narzędzi na operację	62,7%	82,4%	55,1%	73,7%
M 4	Liczba brakujących narzędzi na operację	47	15	27	14
	Koszt brakujących narzędzi na operację [PLN]	115056	36720	66096	34272
	Koszt brakujących narzędzi na część [PLN]	151 776		100 368	
	Procent brakujących narzędzi na operację	62,7%	88,2%	55,1%	73,7%

Analiza kosztów zestawów narzędziowych przedstawiona w tabelach 8.14 i 8.15 pozwoliła opracować po trzy scenariusze dobrojenia maszyn dla każdej z części. Na ich podstawie został przygotowany plan dziewięciu eksperymentów. Ich celem jest sprawdzenie jaki wpływ na wskaźnik U ma doposażenie tylko jednej z maszyn dla danej części oraz jak przedstawiałyby się ewentualne koszty z tym związane. Wybór najlepszego wariantu powinien być zatem kompromisem pomiędzy maksymalizacją wskaźnika U a kosztami do poniesienia.

Trzy scenariusze kosztów zakupu zestawów narzędziowych dla części **K_4** od najniższego do najwyższego:

- **1 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M4**, najniższy koszt doposażenia maszyny,
- **2 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M2**, ponad dwukrotnie wyższy koszt zakupu brakujących zestawów narzędziowych w porównaniu do maszyny **M4**,
- **3 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M1**, najwyższy koszt doposażenia maszyny.

Trzy scenariusze kosztów zakupu zestawów narzędziowych dla części **P_1** od najniższego do najwyższego:

- **1 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M3**, najniższy koszt doposażenia maszyny,
- **2 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M4**, zbliżony koszt do scenariusza 1,
- **3 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M1**, najwyższy koszt doposażenia maszyny.

Trzy scenariusze kosztów doposażenia maszyny **P_2** w brakujące zestawy narzędziowe od najniższego do najwyższego:

- **1 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M3**, najniższy koszt doposażenia maszyny,
- **2 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M4**, taki sam koszt jak scenariusz 1,
- **3 scenariusz** – zakup brakujących zestawów narzędziowych do maszyny **M1**, najwyższy koszt doposażenia maszyny.

Zaplanowane eksperymenty dla części **K_4**, **P_1** i **P_2** zgodnie ze scenariuszami kosztowymi dla każdej z nich przedstawiają Tabele 8.16 dla części **K_4**, 8.17 dla części **P_1** i 8.18 dla części **P_2**.

Tabela 8.16. Plan trzech eksperymentów dla części **K_4** zgodnie ze scenariuszami 1, 2 i 3, od najtańszej do najdroższej opcji doposażenia maszyny, zmienna **Min_Max** zgodne ze stanem obecnym, zmienna **IleW_ESP** wartość maksymalna **26**;

Źródło: opracowanie własne

Numer eksperymentu:	2.07	2.08	2.09
Zmienna NAZWA	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ
BazaAlt_Op K_4 dla M3	1	1	1
BazaAlt_Op K_4 dla M4	1	0	0
BazaAlt_Op K_4 dla M2	0	1	0
BazaAlt_Op K_4 dla M1	0	0	1

Tabela 8.17. Plan trzech eksperymentów dla części **P_1** zgodnie ze scenariuszami 1, 2 i 3, od najtańszej do najdroższej opcji doposażenia maszyny, zmienna **Min_Max** zgodne ze stanem obecnym, zmienna **IleW_ESP** wartość maksymalna **26**;

Źródło: opracowanie własne

Numer eksperymentu:	2.10	2.11	2.12
Zmienna NAZWA	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ
BazaAlt_Op P_1 dla M2	1	1	1
BazaAlt_Op P_1 dla M3	1	0	0
BazaAlt_Op P_1 dla M4	0	1	0
BazaAlt_Op P_1 dla M1	0	0	1

Tabela 8.18. Plan trzech eksperymentów dla części **P_2** zgodnie ze scenariuszami 1, 2 i 3, od najtańszej do najdroższej opcji wyposażenia maszyny, zmienna **Min_Max** zgodne ze stanem obecnym, zmienna **IleW_ESP** wartość maksymalna **26**;

Źródło: opracowanie własne

Numer eksperymentu:	2.13	2.14	2.15
Zmienna NAZWA	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ	Zmienna WARTOŚĆ
BazaAlt_Op P_2 dla M2	1	1	1
BazaAlt_Op P_2 dla M3	1	0	0
BazaAlt_Op P_2 dla M4	0	1	0
BazaAlt_Op P_2 dla M1	0	0	1

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych i analiza zostały przedstawione w kolejnym rozdziale.

8.3. Wyniki eksperymentów

Zgodnie z planem przeprowadzono łącznie 21 eksperymentów. Sześć dla kroku pierwszego i 15 dla kroku drugiego. Wyniki każdego z nich były automatycznie zapisywane do przygotowanego w tym celu raportu. Na podstawie raportu z eksperymentów przygotowano analizę wyników w formie tabel. Kompletne wyniki dla pierwszego z nich przedstawia tabela 8.19.

Tabela 8.19. Kompletne wyniki przeprowadzonych eksperymentów dla kroku pierwszego;
Źródło: opracowanie własne

Nr. Eksp.	Czas trwania [tyg.]	U Nazwa	U Wyniki [%]	Nr. Eksp.	WIP Nazwa	WIP Wyniki [szt.]	LT Nazwa	LT Wyniki [godz.]
1.01	20	U_M1	96,43%	1.01	WIP_Avg	45	LT Avg	62,92
		U_M2	99,14%		WIP_SD	6,558	LT SD	21,41
		U_M3	96,82%		WIP_Max	74	LT Max	119,03
		U_M4	91,96%		WIP_Min	10	LT Min	9,31
		U_M1-M4	384,34%					
1.02	20	U_M1	96,43%	1.02	WIP_Avg	45	LT Avg	62,92
		U_M2	99,14%		WIP_SD	6,558	LT SD	21,41
		U_M3	96,82%		WIP_Max	74	LT Max	119,03
		U_M4	91,96%		WIP_Min	10	LT Min	9,31
		U_M1-M4	384,34%					
1.03	20	U_M1	96,43%	1.03	WIP_Avg	45	LT Avg	62,92
		U_M2	99,14%		WIP_SD	6,558	LT SD	21,41
		U_M3	96,82%		WIP_Max	74	LT Max	119,03
		U_M4	91,96%		WIP_Min	10	LT Min	9,31
		U_M1-M4	384,34%					
1.04	20	U_M1	98,76%	1.04	WIP_Avg	33	LT Avg	60,59
		U_M2	98,82%		WIP_SD	9,696	LT SD	20,44
		U_M3	98,02%		WIP_Max	74	LT Max	125,64
		U_M4	97,90%		WIP_Min	7	LT Min	8,31
		U_M1-M4	393,51%					
1.05	20	U_M1	98,76%	1.05	WIP_Avg	33	LT Avg	60,59
		U_M2	98,82%		WIP_SD	9,696	LT SD	20,44
		U_M3	98,02%		WIP_Max	74	LT Max	125,64
		U_M4	97,90%		WIP_Min	7	LT Min	8,31
		U_M1-M4	393,51%					
1.06	20	U_M1	98,76%	1.06	WIP_Avg	33	LT Avg	60,59
		U_M2	98,82%		WIP_SD	9,696	LT SD	20,44
		U_M3	98,02%		WIP_Max	74	LT Max	125,64
		U_M4	97,90%		WIP_Min	7	LT Min	8,31
		U_M1-M4	393,51%					

W raporcie do prawidłowej identyfikacji parametrów wyjściowych przyjęto następujące oznaczenia:

- **U_Nazwa** , **U_Wyniki** – nazwa i wyniki symulacji dla wskaźnika *U*, gdzie **U_M1...4** oznacza numer maszyny natomiast **U_M1-M4** sumę wskaźnika *U* dla wszystkich maszyn.
- **WIP_Nazwa** i **WIP_Wyniki** – nazwa i wyniki symulacji dla wskaźnika *WIP*.

W ramach wskaźnika *WIP* zarejestrowano cztery parametry:

- **WIP_Avg** – średni *WIP* dla badanego okresu czasu,
- **WIP_SD** – odchylenie standardowe dla *WIP*,
- **WIP_Max** – maksymalną wartość dla *WIP* w badanym okresie czasu,

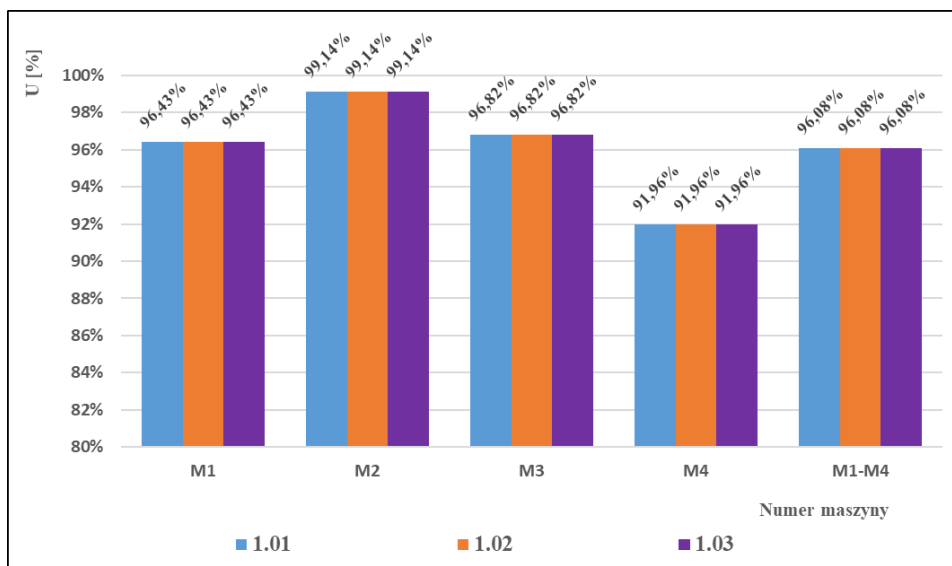
- **WIP_Min** – minimalną wartość dla *WIP* w badanym okresie czasu.
- **LT_Nazwa i LT_Wyniki** – nazwa i wyniki symulacji dla wskaźnika *LT*. W ramach wskaźnika *LT* zarejestrowano cztery parametry:
 - **LT_Avg** – średni *LT* dla badanego okresu czasu,
 - **LT_SD** – odchylenie standardowe dla *LT*,
 - **LT_Max** – maksymalną wartość dla *LT* w badanym okresie czasu,
 - **LT_Min** – minimalną wartość dla *LT* w badanym okresie czasu.

Celem eksperymentów 1.01, 1.02 i 1.03 było sprawdzenie, jaki wpływ na wskaźniki *U*, *WIP* i *LT* ma zmienna **IleW_ESP** zgodnie ze stanem obecnym wdrożenia części i dostępnością narzędzi do wykonania kompletu operacji dla danej części. Wyniki uzyskane dla wszystkich wskaźników pokazują, że dla trzech eksperymentów 1.01, 1.02 i 1.03 wskaźniki mają takie same wartości średnie, tj. wskaźnik *U* **96,08%** (średnia dla maszyn **M1, M2, M3 i M4**), wskaźnik *WIP* **45 sztuk** i wskaźnik *LT* **62,92 godziny** dla całej linii ESP.

Wniosek: zmienna **IleW_ESP** w zakresie wartości **24, 25 i 26** nie ma wpływu na wskaźniki wyjściowe, wykorzystywane do monitorowania pracy linii ESP. Tabela 8.20 i rysunek 8.2 prezentują wyniki dla wskaźnika *U* natomiast tabela 8.21 i rysunki 8.3 i 8.4 prezentują wyniki dla wskaźników *WIP* i *LT*

Tabela 8.20. Wyniki wskaźnika *U* dla eksperymentów 1.01, 1.02 i 1.03;
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	1.01	1.02	1.03
Maszyna	<i>U</i>	<i>U</i>	<i>U</i>
M1	96,43%	96,43%	96,43%
M2	99,14%	99,14%	99,14%
M3	96,82%	96,82%	96,82%
M4	91,96%	91,96%	91,96%
M1-M4	96,08%	96,08%	96,08%



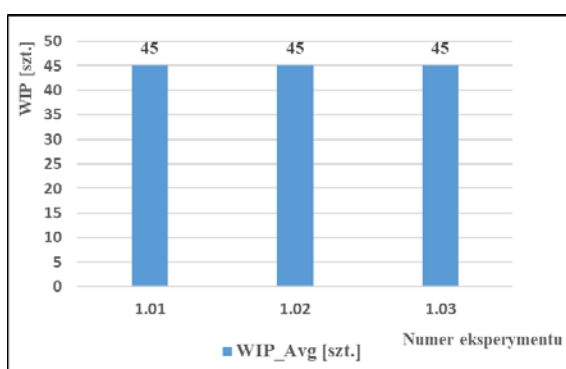
Rysunek 8.2. Wyniki dla wskaźnika U z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 1.01, 1.02, i 1.03;

Źródło: opracowanie własne

Tabela 8.21. Wyniki wskaźnika WIP i LT dla eksperymentów 1.01, 1.02 i 1.03;

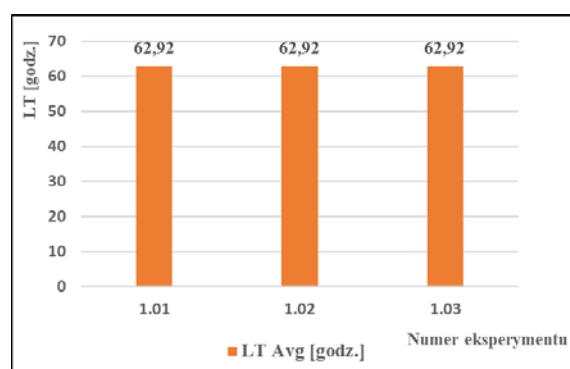
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	1.01	1.02	1.03
WIP_Avg [szt.]	45	45	45
LT Avg [godz.]	62,92	62,92	62,92



Rysunek 8.3. Wyniki dla wskaźnika WIP w eksperymentach 1.01, 1.02, i 1.03;

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 8.4. Wyniki dla wskaźnika LT w eksperymentach 1.01, 1.02, i 1.03;

Źródło: opracowanie własne

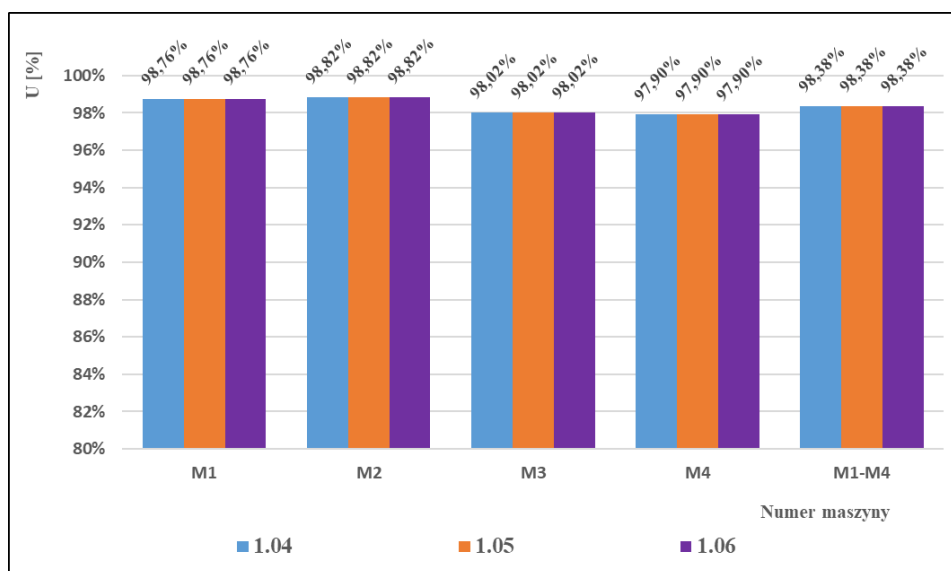
Kolejny zestaw trzech eksperymentów 1.04, 1.05 i 1.06 miał na celu sprawdzenie, jaki wpływ na wskaźniki U , WIP i LT ma zmienna $IleW_ESP$ w zakresie wartości 24, 25 i 26 przy pełnej elastyczności linii ESP (wartość 1 zmiennej $BazaAlt_Op$ dla wszystkich części

i maszyn). Wyniki wskaźników dla poszczególnych maszyn są bardzo zbliżone do siebie i wynoszą U **98,38%** (średnia dla maszyn **M1, M2, M3 i M4**), **WIP 33 sztuki** i **LT 60,59 godziny**. Wynik dla wskaźnika U przy pełnej elastyczności linii jest jednocześnie celem do jakiego powinna dążyć organizacja optymalizując ustawienie linii ESP.

Wniosek: uzyskane wyniki jednoznacznie pokazują, że zmienna **IleW_ESP** w analizowanym zakresie wartości nie ma wpływu na wskaźniki U , WIP i LT przy pełnej elastyczności linii. Tabela 8.22 i rysunek 8.5 prezentują wyniki eksperymentów dla wskaźnika U natomiast tabela 8.23 i rysunki 8.6 i 8.7 prezentują wyniki dla wskaźników WIP i LT .

Tabela 8.22. Wyniki wskaźnika U dla eksperymentów 1.04, 1.05 i 1.06;
Źródło: opracowanie własne

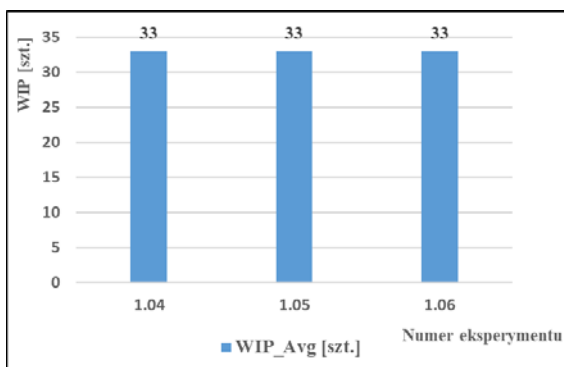
Nr eksperymentu	1.04	1.05	1.06
Maszyna	U	U	U
M1	98,76%	98,76%	98,76%
M2	98,82%	98,82%	98,82%
M3	98,02%	98,02%	98,02%
M4	97,90%	97,90%	97,90%
M1-M4	98,38%	98,38%	98,38%



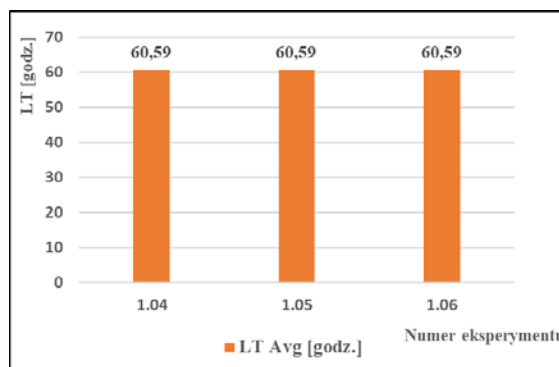
Rysunek 8.5. Wyniki dla wskaźnika U z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 1.04, 1.05, i 1.06;
Źródło: opracowanie własne

Tabela 8.23. Wyniki wskaźnika *WIP* i *LT* dla eksperymentów 1.04, 1.05 i 1.06;
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	1.04	1.05	1.06
WIP_Avg [szt.]	33	33	33
LT Avg [godz.]	60,59	60,59	60,59



Rysunek 8.6. Wyniki dla wskaźnika *WIP* w eksperymentach 1.04, 1.05, i 1.06;
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 8.7. Wyniki dla wskaźnika *LT* w eksperymentach 1.04, 1.05, i 1.06;
Źródło: opracowanie własne

Na podstawie analizy wyników eksperymentów o numerach **1.01, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05 i 1.06** dla wskaźników *WIP* i *LT* nie stwierdzono wpływu zmiennej **IleW_ESP** w analizowanym zakresie wartości 24, 25 i 26.

Wniosek: liczba palet nie ma wpływu na parametry wyjściowe *WIP* i *LT*. Postanowiono do kolejnych eksperymentów przyjąć stałą wartość 26 palet. Ograniczanie pojemności linii ESP nie wpływa na wskaźniki *WIP* i *LT*.

W kolejnym etapie przeanalizowano wyniki dla drugiego zestawu eksperymentów. Tabela 8.24 przedstawia wyniki zbiorcze dla wszystkich eksperymentów oznaczonych numerami 2.**.

Tabela 8.24. Kompletne wyniki przeprowadzonych eksperymentów dla kroku drugiego;
Źródło: opracowanie własne

Nr. Eksp.	Czas trwania [tyg.]	U Nazwa	U Wyniki [%]	Nr. Eksp.	WIP Nazwa	WIP Wyniki [szt.]	LT Nazwa	LT Wyniki [godz.]
2.01	20	U_M1	94,21%	2.01	WIP_Avg	28	LT Avg	61,45
		U_M2	98,90%		WIP_SD	9,002	LT SD	22,40
		U_M3	96,11%		WIP_Max	72	LT Max	146,95
		U_M4	92,81%		WIP_Min	6	LT Min	9,39
		U_M1-M4	382,03%					
2.02	20	U_M1	94,37%	2.02	WIP_Avg	26	LT Avg	60,54
		U_M2	98,61%		WIP_SD	11,11	LT SD	22,50
		U_M3	97,18%		WIP_Max	72	LT Max	134,17
		U_M4	94,60%		WIP_Min	5	LT Min	9,08
		U_M1-M4	384,76%					
2.03	20	U_M1	93,30%	2.03	WIP_Avg	34	LT Avg	59,68
		U_M2	98,29%		WIP_SD	10,114	LT SD	23,68
		U_M3	97,61%		WIP_Max	73	LT Max	143,06
		U_M4	96,55%		WIP_Min	10	LT Min	9,51
		U_M1-M4	385,74%					
2.04	20	U_M1	98,81%	2.04	WIP_Avg	40	LT Avg	65,25
		U_M2	98,25%		WIP_SD	13,644	LT SD	21,37
		U_M3	94,94%		WIP_Max	70	LT Max	130,12
		U_M4	91,52%		WIP_Min	8	LT Min	9,67
		U_M1-M4	383,53%					
2.05	20	U_M1	96,60%	2.05	WIP_Avg	33	LT Avg	63,45
		U_M2	99,05%		WIP_SD	9,331	LT SD	21,76
		U_M3	95,71%		WIP_Max	74	LT Max	147,36
		U_M4	93,03%		WIP_Min	7	LT Min	9,25
		U_M1-M4	384,39%					
2.06	20	U_M1	96,20%	2.06	WIP_Avg	27	LT Avg	63,17
		U_M2	98,29%		WIP_SD	11,218	LT SD	21,48
		U_M3	96,75%		WIP_Max	69	LT Max	138,11
		U_M4	94,34%		WIP_Min	6	LT Min	8,37
		U_M1-M4	385,58%					
2.07	20	U_M1	96,72%	2.07	WIP_Avg	27	LT Avg	62,66
		U_M2	98,51%		WIP_SD	10,141	LT SD	21,31
		U_M3	97,65%		WIP_Max	70	LT Max	126,58
		U_M4	93,72%		WIP_Min	7	LT Min	10,35
		U_M1-M4	386,60%					
2.08	20	U_M1	97,06%	2.08	WIP_Avg	23	LT Avg	63,25
		U_M2	98,52%		WIP_SD	11,583	LT SD	21,45
		U_M3	96,16%		WIP_Max	73	LT Max	129,33
		U_M4	93,00%		WIP_Min	5	LT Min	9,85
		U_M1-M4	384,74%					
2.09	20	U_M1	98,86%	2.09	WIP_Avg	37	LT Avg	65,90
		U_M2	99,04%		WIP_SD	8,228	LT SD	21,08
		U_M3	96,18%		WIP_Max	71	LT Max	120,86
		U_M4	90,26%		WIP_Min	7	LT Min	11,67
		U_M1-M4	384,34%					
2.10	20	U_M5	96,32%	2.10	WIP_Avg	29	LT Avg	63,83
		U_M6	97,93%		WIP_SD	11,013	LT SD	21,93
		U_M7	98,75%		WIP_Max	80	LT Max	130,93
		U_M8	97,20%		WIP_Min	11	LT Min	7,34
		U_M1-M5	390,20%					

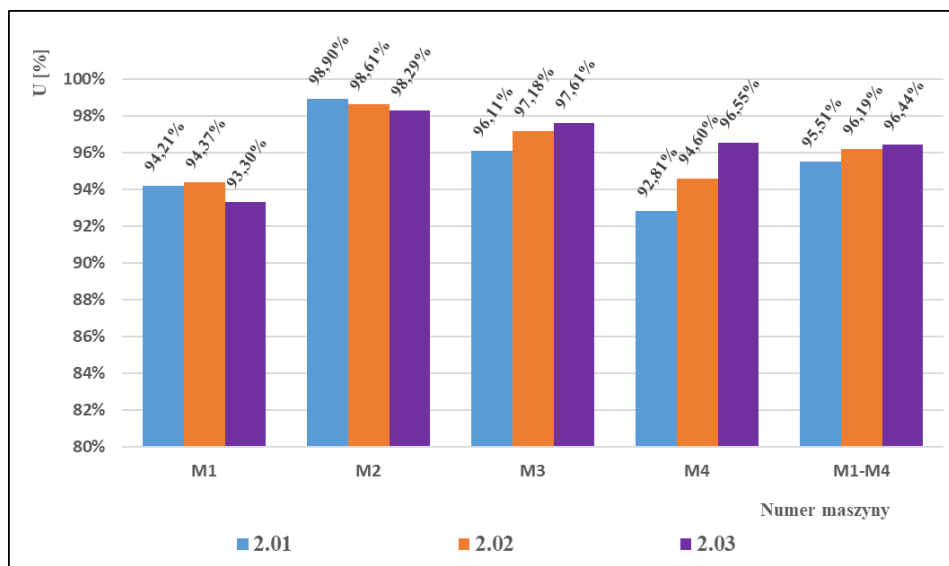
Nr. Eksp.	Czas trwania [tyg.]	U Nazwa	U Wyniki [%]	Nr. Eksp.	WIP Nazwa	WIP Wyniki [szt.]	LT Nazwa	LT Wyniki [godz.]
2.11	20	U_M9	94,63%	2.11	WIP_Avg	29	LT Avg	61,12
		U_M10	94,70%		WIP_SD	12,037	LT SD	23,83
		U_M11	97,97%		WIP_Max	75	LT Max	153,41
		U_M12	97,91%		WIP_Min	8	LT Min	6,49
		U_M1-M6	385,20%					
2.12	20	U_M13	98,46%	2.12	WIP_Avg	31	LT Avg	64,90
		U_M14	98,35%		WIP_SD	9,808	LT SD	20,95
		U_M15	97,01%		WIP_Max	72	LT Max	132,92
		U_M16	93,73%		WIP_Min	10	LT Min	7,20
		U_M1-M7	387,54%					
2.13	20	U_M17	95,04%	2.13	WIP_Avg	37	LT Avg	60,85
		U_M18	97,62%		WIP_SD	10,339	LT SD	21,48
		U_M19	98,78%		WIP_Max	74	LT Max	123,83
		U_M20	96,34%		WIP_Min	9	LT Min	10,40
		U_M1-M8	387,79%					
2.14	20	U_M21	92,80%	2.14	WIP_Avg	20	LT Avg	60,10
		U_M22	97,59%		WIP_SD	8,739	LT SD	22,73
		U_M23	97,73%		WIP_Max	75	LT Max	138,19
		U_M24	97,49%		WIP_Min	8	LT Min	8,77
		U_M1-M9	385,60%					
2.15	20	U_M25	98,74%	2.15	WIP_Avg	33	LT Avg	65,25
		U_M26	98,31%		WIP_SD	9,363	LT SD	20,75
		U_M27	97,28%		WIP_Max	75	LT Max	133,18
		U_M28	92,42%		WIP_Min	9	LT Min	8,21
		U_M1-M10	386,75%					

Pierwszy zestaw eksperymentów (2.01, 2.02 i 2.03) z etapu drugiego miał na celu sprawdzenie trzech scenariuszy bezkosztowego dozbrojenia jednej z maszyn dla części **K_1** w celu spełnienia **Założenia 2**. Wyniki z niniejszych eksperymentów zaprezentowano w tabeli 8.25 i rysunku 8.8 dla wskaźnika *U* oraz w tabeli 8.26 i rysunkach 8.9 i 8.10 dla wskaźników *WIP* i *LT*.

Tabela 8.25. Wyniki wskaźnika *U* dla eksperymentów 2.01, 2.02 i 2.03;

Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.01	2.02	2.03
Maszyna	<i>U</i>	<i>U</i>	<i>U</i>
M1	94,21%	94,37%	93,30%
M2	98,90%	98,61%	98,29%
M3	96,11%	97,18%	97,61%
M4	92,81%	94,60%	96,55%
M1-M4	95,51%	96,19%	96,44%



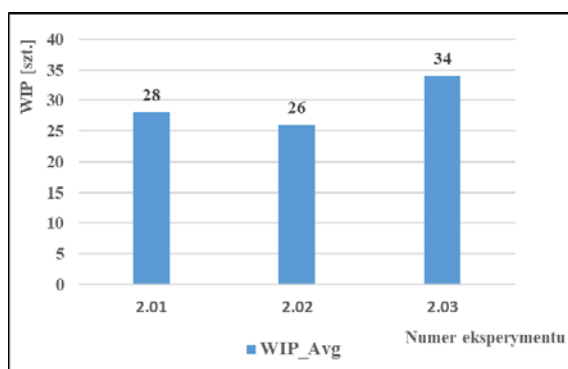
Rysunek 8.8. Wyniki dla wskaźnika U z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.01, 2.02, i 2.03;

Źródło: opracowanie własne

Tabela 8.26. Wyniki wskaźnika WIP i LT dla eksperymentów 2.01, 2.02 i 2.03;

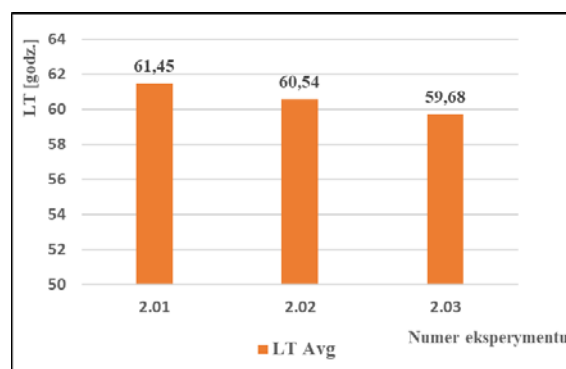
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.01	2.02	2.03
WIP_Avg	28	26	34
LT Avg	61,45	60,54	59,68



Rysunek 8.9. Wyniki dla wskaźnika WIP w eksperymentach 2.01, 2.02, i 2.03;

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 8.10. Wyniki dla wskaźnika LT w eksperymentach 2.01, 2.02, i 2.03;

Źródło: opracowanie własne

Do poprawnej oceny wyników poszczególnych zestawów eksperymentów w etapie drugim dla wskaźników przyjęte zostały wartości wag 0,7, 0,15 i 0,15 dla odpowiednio U , WIP i LT . Wartości poszczególnych wag wynikają z przyjętej polityki firmy.

Przyjęto następującą funkcję celu (wzór 11):

$$\text{Max(NwEksp)} = 0,7 U \times U/\text{Max}(U) + 0,15 \text{WIP} \times \text{Min}(\text{W})/\text{W} + 0,15 \text{LT} \times \text{Min}(\text{L})/\text{L} \quad (11)$$

gdzie:

- **Max(NwEksp)** – maksymalny wskaźnik wyboru najlepszego scenariusza z zestawu eksperymentów gdzie **NwEksp** oznacza wartość liczbową wskaźnika. Maksymalna wartość wskaźnika wyboru najlepszego scenariusza dla zestawu eksperymentów może wynosić **1**,
- **U** – wartość wskaźnika *U* w eksperymencie,
- **Max(U)** – maksymalna wartość wskaźnika *U* w badanym zestawie eksperymentów,
- **Min(W)** – minimalna wartość wskaźnika *WIP* w badanym zestawie eksperymentów,
- **W** – wartość wskaźnika *WIP* w eksperymencie,
- **Min(L)** – minimalna wartość wskaźnika *LT* w badanym zestawie eksperymentów,
- **L** – wartość wskaźnika *LT* w eksperymencie.

Wyniki z trzech eksperymentów przeprowadzonych dla części K_1 po wykonaniu obliczeń za pomocą wzoru 10 przedstawia tabela 8.27.

Tabela 8.27. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów **2.01**, **2.02** i **2.03** dla części **K_1**;

Źródło: opracowanie własne

		Nr eksperymentu dla K_1		
Wskaźnik	Waga wskaźnika	2.01	2.02	2.03
<i>U</i>	70%	0,693	0,698	0,700
<i>WIP</i>	15%	0,139	0,150	0,115
<i>LT</i>	15%	0,146	0,148	0,150
NwEksp:		0,978	0,996	0,965

* kolorem zielonym oznaczono **Max(NwEksp)**

Zgodnie ze wzorem 11 na wybór najlepszego scenariusza, eksperyment **2.02** uzyskał najlepszy rezultat (**0,996**) pomimo, że tylko w jednej kategorii (*WIP*) uzyskał najwyższy wynik. Zgodnie z wynikami w/w eksperymentów, zmienna **BazaAlt_Op** dla części **K_1** dla poszczególnych maszyn powinna przyjąć następujące wartości:

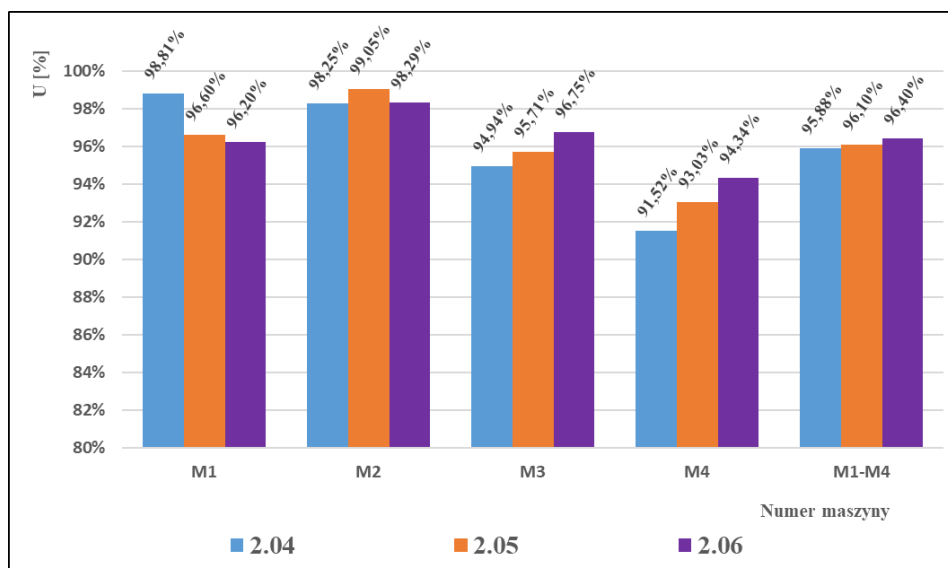
BazaAlt_Op dla K_1 M1 = 1
BazaAlt_Op dla K_1 M2 = 0
BazaAlt_Op dla K_1 M3 = 1
BazaAlt_Op dla K_1 M4 = 0

W kolejnych eksperymentach dla części K_2, K_4, P_1 i P_2 były po 3 scenariusze począwszy od scenariusza z najniższym kosztem jaki trzeba byłoby ponieść do rozszerzenia możliwości wykonywania kompletnej części dla wszystkich operacji na danej maszynie do scenariusza z najwyższym kosztem. Zastosowano tą samą funkcję celu co w poprzednich eksperymentach (wzór 11), następnie została dokonana ocena i wybór najlepszych eksperymentów dla czterech zestawów.

Wyniki dla zestawu trzech eksperymentów **2.04**, **2.05** i **2.06** dla części K_2 przedstawia tabela 8.28 i rysunek 8.11 dla wskaźnika U oraz tabela 8.29 i rysunki 8.12 i 8.13 dla wskaźników WIP i LT .

Tabela 8.28. Wyniki wskaźnika U dla eksperymentów 2.04, 2.05 i 2.06;
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.04	2.05	2.06
Maszyna	U	U	U
M1	98,81%	96,60%	96,20%
M2	98,25%	99,05%	98,29%
M3	94,94%	95,71%	96,75%
M4	91,52%	93,03%	94,34%
M1-M4	95,88%	96,10%	96,40%

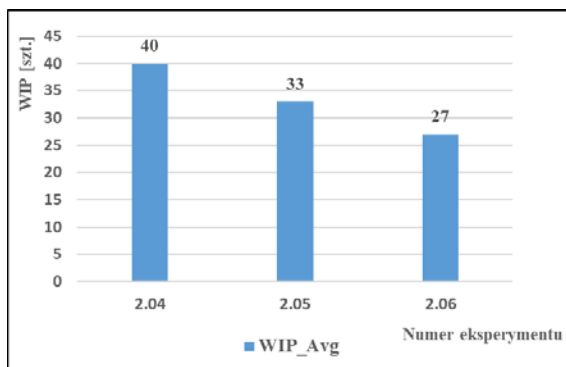


Rysunek 8.11. Wyniki dla wskaźnika U z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.04, 2.05, i 2.06;

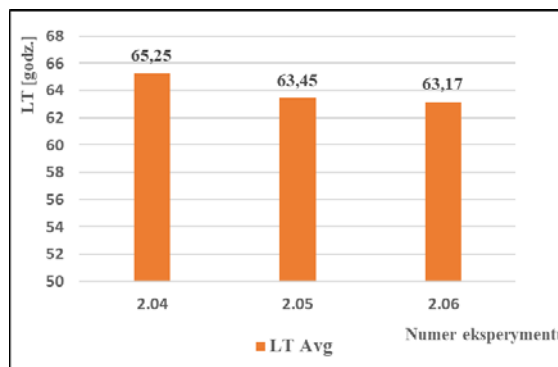
Źródło: opracowanie własne

Tabela 8.29. Wyniki wskaźnika *WIP* i *LT* dla eksperymentów 2.04, 2.05 i 2.06;
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.04	2.05	2.06
WIP_Avg	40	33	27
LT Avg	65,25	63,45	63,17



Rysunek 8.12. Wyniki dla wskaźnika *WIP* w eksperymentach 2.04, 2.05, i 2.06;
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 8.13. Wyniki dla wskaźnika *LT* w eksperymentach 2.04, 2.05, i 2.06;
Źródło: opracowanie własne

Wyniki z trzech eksperymentów przeprowadzonych dla części **K_2** po wykonaniu obliczeń za pomocą wzoru 11 przedstawia tabela 8.30.

Tabela 8.30. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów **2.04**, **2.05** i **2.06** dla części **K_2**;
Źródło: opracowanie własne

Wskaźnik	Waga wskaźnika	Nr eksperymentu dla K_2		
		2.04	2.05	2.06
<i>U</i>	70%	0,696	0,698	0,700
<i>WIP</i>	15%	0,101	0,123	0,150
<i>LT</i>	15%	0,145	0,149	0,150
NwEksp:		0,943	0,970	1,000

* kolorem zielonym oznaczono **Max(NwEksp)**

Eksperyment **2.06** z zestawu eksperymentów dla części **K_2** uzyskał maksymalny wynik (**1,00**), Oznacza to, że wszystkie analizowane wskaźniki uzyskały maksymalne wartości. Jednakże pod względem kosztów jest to najgorszy (najdroższy) wariant. W przyszłości, w dalszych badaniach w funkcji celu należałoby uwzględnić również koszty i następnie wybrać

najlepszą opcję. Obecnie jednak z punktu widzenia firmy najważniejszym priorytetem jest zapewnienie dostaw części do klienta. Wybór eksperymentu **2.06** daje najlepsze wyniki z punktu widzenia maksymalizacji wykorzystania maszyn, a co za tym idzie możliwość zrealizowania największej produkcji. Zgodnie z wynikami dla **K_2**, zmienna **BazaAlt_Op** dla poszczególnych maszyn powinna przyjąć następujące wartości:

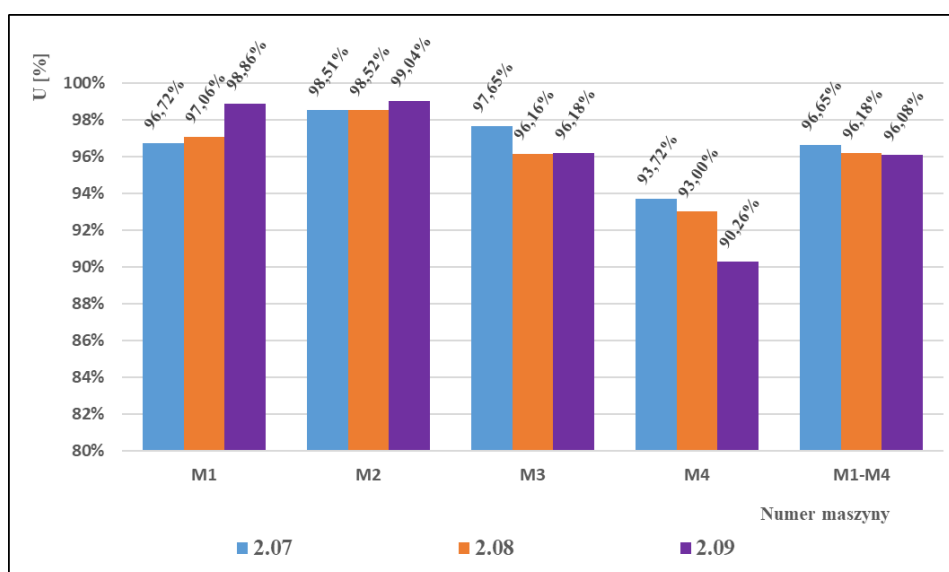
BazaAlt_Op dla K_2 M1 = 0
BazaAlt_Op dla K_2 M2 = 0
BazaAlt_Op dla K_2 M3 = 1
BazaAlt_Op dla K_2 M4 = 1

Wyniki dla zestawu trzech eksperymentów **2.07**, **2.08** i **2.09** dla części **K_4** przedstawia tabela 8.31 i rysunek 8.14 dla wskaźnika *U* oraz tabela 8.32 i rysunki 8.15 i 8.16 dla wskaźników *WIP* i *LT*.

Tabela 8.31. Wyniki wskaźnika *U* dla eksperymentów 2.07, 2.08 i 2.09;

Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.07	2.08	2.09
Maszyna	<i>U</i>	<i>U</i>	<i>U</i>
M1	96,72%	97,06%	98,86%
M2	98,51%	98,52%	99,04%
M3	97,65%	96,16%	96,18%
M4	93,72%	93,00%	90,26%
M1-M4	96,65%	96,18%	96,08%



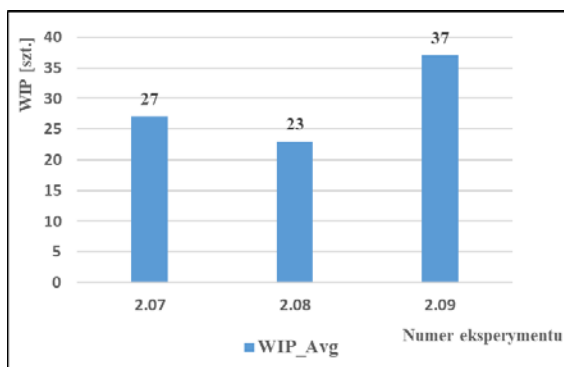
Rysunek 8.14. Wyniki dla wskaźnika *U* z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.07, 2.08, i 2.09;

Źródło: opracowanie własne

Tabela 8.32. Wyniki wskaźnika *WIP* i *LT* dla eksperymentów 2.07, 2.08 i 2.09;

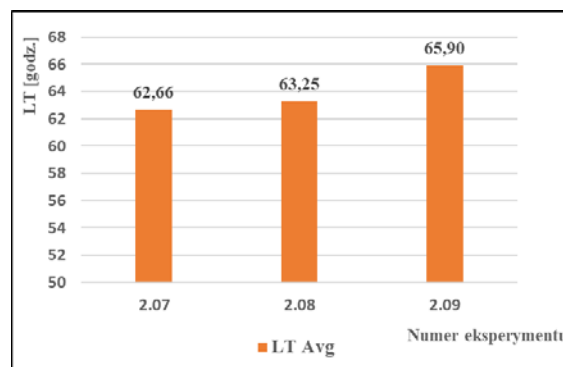
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.07	2.08	2.09
WIP_Avg	27	23	37
LT Avg	62,66	63,25	65,90



Rysunek 8.15. Wyniki dla wskaźnika *WIP* w eksperymentach 2.07, 2.08, i 2.09;

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 8.16. Wyniki dla wskaźnika *LT* w eksperymentach 2.07, 2.08, i 2.09;

Źródło: opracowanie własne

Wyniki z trzech eksperymentów przeprowadzonych dla części **K_4** po wykonaniu obliczeń za pomocą wzoru 11 przedstawia tabela 8.33.

Tabela 8.33. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów **2.07**, **2.08** i **2.09** dla części **K_4**;

Źródło: opracowanie własne

Wskaźnik	Waga wskaźnika	Nr eksperymentu dla K_4		
		2.07	2.08	2.09
<i>U</i>	70%	0,700	0,697	0,696
<i>WIP</i>	15%	0,128	0,150	0,093
<i>LT</i>	15%	0,150	0,149	0,143
NwEksp:		0,978	0,995	0,932

* kolorem zielonym oznaczono **Max(NwEksp)**

Kolejnym zestawem eksperymentów, których wyniki zostały poddane ocenie były eksperymenty o numerach **2.07**, **2.08** i **2.09** dla części **K_4**. Najlepszy wynik uzyskał eksperyment **2.08 (0,995)**. Pod względem kosztów zakupu zestawów narzędziowych jest to

wynik środkowy. Niewiele gorszy wynik uzyskał eksperyment **2.07 (0,978)**, który pod względem potencjalnych kosztów jest najlepszą opcją. Wyboru należałoby dokonać pomiędzy tymi dwoma scenariuszami. Ze względu na koszty zakupu dodatkowych zestawów narzędziowych rekomendowany jest wybór scenariusza **2.07**. Zmienna **BazaAlt_Op** dla części **K_4** dla poszczególnych maszyn powinna przyjąć następujące wartości:

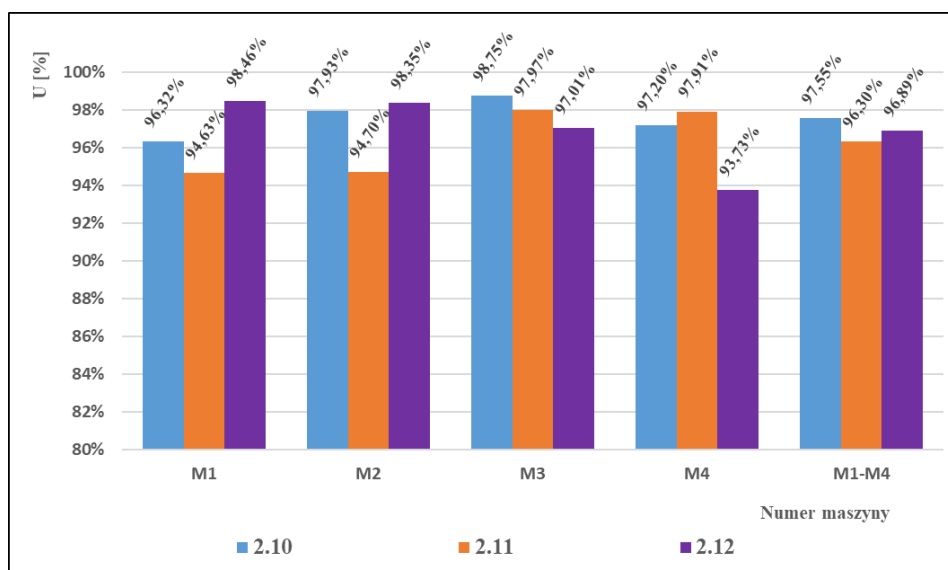
BazaAlt_Op dla K_4 M1 = 0
BazaAlt_Op dla K_4 M2 = 1
BazaAlt_Op dla K_4 M3 = 1
BazaAlt_Op dla K_4 M4 = 0

Wyniki dla zestawu trzech eksperymentów **2.10**, **2.11** i **2.12** dla części P_1 przedstawia tabela 8.34 i rysunek 8.17 dla wskaźnika *U* oraz tabela 8.35 i rysunki 8.18 i 8.19 dla wskaźników *WIP* i *LT*.

Tabela 8.34. Wyniki wskaźnika *U* dla eksperymentów 2.10, 2.11 i 2.12;

Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.10	2.11	2.12
Maszyna	<i>U</i>	<i>U</i>	<i>U</i>
M1	96,32%	94,63%	98,46%
M2	97,93%	94,70%	98,35%
M3	98,75%	97,97%	97,01%
M4	97,20%	97,91%	93,73%
M1-M4	97,55%	96,30%	96,89%



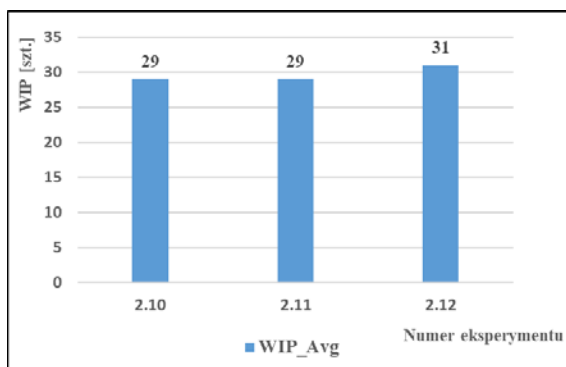
Rysunek 8.17. Wyniki dla wskaźnika *U* z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.10, 2.11, i 2.12;

Źródło: opracowanie własne

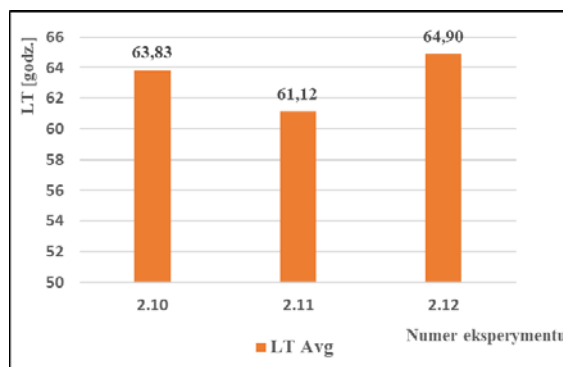
Tabela 8.35. Wyniki wskaźnika *WIP* i *LT* dla eksperymentów 2.10, 2.11 i 2.12;

Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.10	2.11	2.12
WIP_Avg	29	29	31
LT Avg	63,83	61,12	64,90



Rysunek 8.18. Wyniki dla wskaźnika *WIP* w eksperymentach 2.10, 2.11, i 2.12;
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 8.19. Wyniki dla wskaźnika *LT* w eksperymentach 2.10, 2.11, i 2.12;
Źródło: opracowanie własne

Wyniki z trzech eksperymentów przeprowadzonych dla części P_1 po wykonaniu obliczeń za pomocą wzoru 11 przedstawia tabela 8.36.

Tabela 8.36. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów **2.10**, **2.11** i **2.12** dla części **P_1**;

Źródło: opracowanie własne

Wskaźnik	Waga wskaźnika	Nr eksperymentu dla P_1		
		2.10	2.11	2.12
<i>U</i>	70%	0,700	0,691	0,695
<i>WIP</i>	15%	0,150	0,150	0,140
<i>LT</i>	15%	0,144	0,150	0,141
NwEksp:		0,994	0,991	0,977

* kolorem zielonym oznaczono **Max(NwEksp)**

Przedostatnim zestawem eksperymentów, których wyniki zostały poddane ocenie są eksperymenty o numerach **2.10**, **2.11** i **2.12** dla części **P_1**. Najlepszy wynik uzyskał

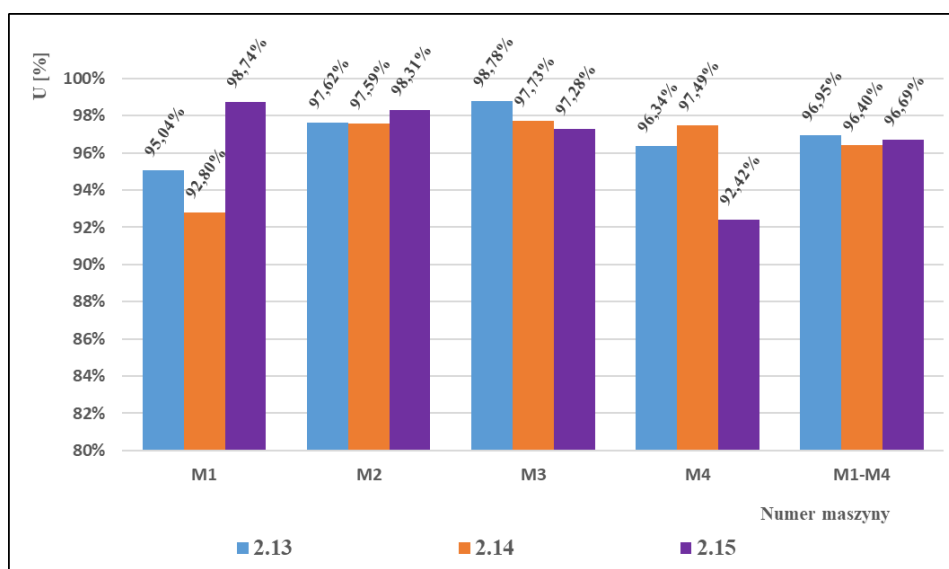
eksperyment **2.10 (0,994)**, który również pod względem kosztów zakupu zestawów narzędziowych jest najkorzystniejszy. W przypadku wyboru scenariusza według eksperymentu **2.10** zmienna **BazaAlt_Op** dla części **P_1** dla poszczególnych maszyn powinna przyjąć następujące wartości:

BazaAlt_Op dla P_1 M1 = 0
BazaAlt_Op dla P_1 M2 = 1
BazaAlt_Op dla P_1 M3 = 1
BazaAlt_Op dla P_1 M4 = 0

Wyniki dla ostatniego zestawu trzech eksperymentów **2.13**, **2.14** i **2.15** dla części **P_2** przedstawia tabela 8.37 i rysunek 8.20 dla wskaźnika *U* oraz tabela 8.38 i rysunki 8.21 i 8.22 dla wskaźników *WIP* i *LT*.

Tabela 8.37. Wyniki wskaźnika *U* dla eksperymentów 2.13, 2.14 i 2.15;
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.13	2.14	2.15
Maszyna	<i>U</i>	<i>U</i>	<i>U</i>
M1	95,04%	92,80%	98,74%
M2	97,62%	97,59%	98,31%
M3	98,78%	97,73%	97,28%
M4	96,34%	97,49%	92,42%
M1-M4	96,95%	96,40%	96,69%

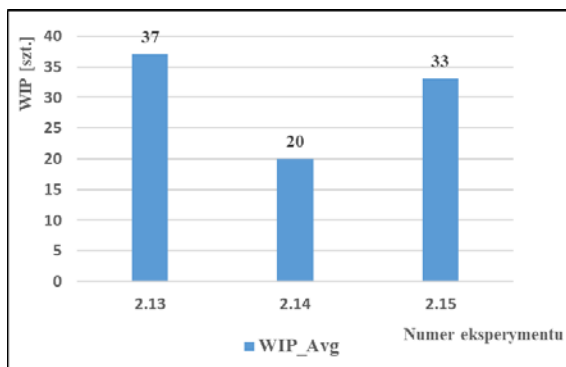


Rysunek 8.20. Wyniki dla wskaźnika *U* z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.13, 2.14, i 2.15;

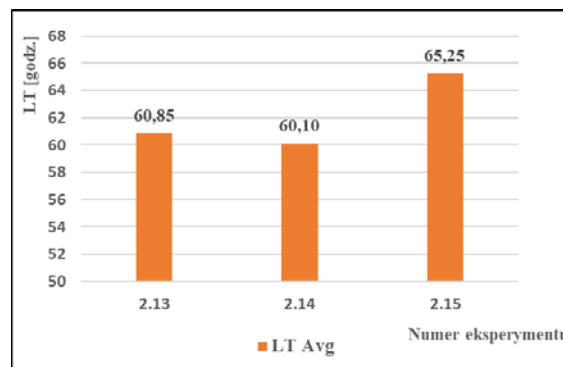
Źródło: opracowanie własne

Tabela 8.35. Wyniki wskaźnika *WIP* i *LT* dla eksperymentów 2.13, 2.14 i 2.15;
Źródło: opracowanie własne

Nr eksperymentu	2.13	2.14	2.15
WIP_Avg	37	20	33
LT Avg	60,85	60,10	65,25



Rysunek 8.21. Wyniki dla wskaźnika *WIP* w eksperymentach 2.13, 2.14, i 2.15;
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 8.22. Wyniki dla wskaźnika *LT* w eksperymentach 2.13, 2.14, i 2.15;
Źródło: opracowanie własne

Wyniki z trzech eksperymentów przeprowadzonych dla części P_2 po wykonaniu obliczeń za pomocą wzoru 11 przedstawia tabela 8.39.

Tabela 8.39. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów **2.13, 2.14** i **2.15** dla części **P_2**;
Źródło: opracowanie własne

		Nr eksperymentu dla P_2		
Wskaźnik	Waga wskaźnika	2.13	2.14	2.15
<i>U</i>	70%	0,700	0,696	0,698
<i>WIP</i>	15%	0,081	0,150	0,091
<i>LT</i>	15%	0,148	0,150	0,138
NwEksp:		0,929	0,996	0,927

* kolorem zielonym oznaczono **Max(NwEksp)**

Ostatnim zestawem eksperymentów, których wyniki zostały poddane ocenie są eksperymenty o numerach **2.13, 2.14** i **2.15** dla części **P_2**. Najlepszy wynik uzyskał eksperyment **2.14 (0,996)**, który pod względem kosztów zakupu zestawów narzędziowych jest

również najkorzystniejszy. W przypadku wyboru scenariusza **2.14** zmienna **BazaAlt_Op** dla części **P_2** dla poszczególnych maszyn powinna przyjąć następujące wartości:

BazaAlt_Op dla P_2 M1 = 0

BazaAlt_Op dla P_2 M2 = 1

BazaAlt_Op dla P_2 M3 = 0

BazaAlt_Op dla P_2 M4 = 1

W drugim etapie wykonano łącznie 15 eksperymentów dla pięciu części. Wszystkie rekomendacje oparte zostały na obliczeniach zgodnie z przyjętą funkcją celu (wzór 10) na podstawie wag wynikających z przyjętej polityki firmy.

9. Wnioski z badań

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy uzyskanych wyników przeprowadzonych eksperymentów autor niniejszej pracy rekomenduje następujące decyzje:

- Zmienna **IleW_ESP** ustawiona ze stałą maksymalną wartością **26**

Uzasadnienie: wykonane eksperymenty **1.01** do **1.06** na trzech poziomach zmienności 24, 25 i 26 nie wykazały wpływu na wskaźniki *WIP* i *LT*. Ograniczanie pojemności linii ESP jest bezzasadne.

- Zmienna **BazaAlt_Op** dla części **K_1** – wartość **1** dla maszyn M1 i M3, wartość **0** dla maszyn M2 i M4

Uzasadnienie: na podstawie wyników z eksperymentów 2.01, 2.02 i 2.03

- Zmienna **BazaAlt_Op** dla części **K_2** – wartość **1** dla maszyn M3 i M4, wartość **0** dla maszyn M1 i M2

Uzasadnienie: na podstawie wyników z eksperymentów 2.04, 2.05 i 2.06

- Zmienna **BazaAlt_Op** dla części **K_4** – wartość **1** dla maszyn M2 i M3, wartość **0** dla maszyn M1 i M4

Uzasadnienie: na podstawie wyników z eksperymentów 2.07, 2.08 i 2.09

- Zmienna **BazaAlt_Op** dla części **P_1** – wartość **1** dla maszyn M2 i M3, wartość **0** dla maszyn M1 i M4

Uzasadnienie: na podstawie wyników z eksperymentów 2.10, 2.11 i 2.12

- Zmienna **BazaAlt_Op** dla części **P_2** – wartość **1** dla maszyn M2 i M4, wartość **0** dla maszyn M1 i M3

Uzasadnienie: na podstawie wyników z eksperymentów 2.13, 2.14 i 2.15

Podsumowanie dla zmiennej **BazaAlt_Op** przedstawiono w tabeli 8.40.

Tabela 8.40. Podsumowanie wyników eksperymentów pierwszego i drugiego etapu dla zmiennej **BazaAlt_Op**;

Źródło: opracowanie własne

Nazwa części:	K_1				K_2				K_3				K_4				K_5		K_6		P_1		P_2		P_3		P_4	
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	
M1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
M3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
M4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0

W pracy zastosowano następujące uproszczenia:

- W symulacji nie uwzględniono części niezgodnych

Uzasadnienie: wszystkie części biorące udział w procesie produkcyjnym są uznawane za zgodne. Proces pomiaru części (weryfikacji zgodna/niezgodna) odbywa się poza obszarem linii ESP i nie wpływa na przepływ części przez linię ESP.

- W symulacji nie uwzględniono współczynnika awarii

Uzasadnienie: brak danych historycznych do prawidłowego oszacowania poziomu awaryjności systemu ESP. W przyszłości współczynnik ten zostanie dodany do wirtualnego modelu linii ESP.

- Symulacja pracy linii ESP 20 tygodni bez przerw.

Uzasadnienie: praca linii ESP zgodnie z planem będzie realizowana w trybie pracy czterobrygadowej (7 dni, 24 godziny).

Podsumowanie

Wnioski jakie można wyciągnąć z przeprowadzonych badań jednoznacznie mówią, że prawidłowo wykonana symulacja na zwalidowanym modelu wirtualnym może być skutecznym narzędziem wspierającym obszar planowania produkcji do podejmowania kluczowych decyzji biznesowych. Od ich szybkości i trafności niejednokrotnie zależy być albo nie być dla firm. Ryzyko związane z podjęciem decyzji jest minimalizowane, dzięki przeprowadzonym eksperymentom. Główne zalety płynące z badań:

- krótki czas przeprowadzenia eksperymentu, który wraz z oceną nie przekracza kilku minut,
- możliwość przeprowadzenia nieograniczonej liczby eksperymentów bez konieczności testowania na linii produkcyjnej,
- prosta obsługa modelu poprzez pliki Excel – sterowanie zmiennymi w celu rekonfiguracji założeń,
- czytelne raporty w formie Excel, możliwość wielopłaszczyznowej analizy danych.

Do wad można zaliczyć:

- pracochłonny etap przygotowania środowiska wirtualnego,
- konieczność pozyskania specjalistycznej wiedzy z zakresu programowania i parametryzacji wirtualnych modeli w programie komputerowym (w przypadku niniejszej pracy w programie Witness).

Przyjęta w niniejszej pracy teza, że dzięki opracowaniu wirtualnego modelu odzwierciedlającego przepływ materiałów i realizację operacji produkcyjnych na elastycznej linii produkcyjnej możliwe będzie dokonanie symulacji w celu optymalizacji pracy linii produkcyjnej względem kryteriów: czasowego i kosztowego została spełniona. Przeprowadzone symulacje dla różnych wariantów pracy linii pozwoliły wskazać najlepsze ustawienie parametrów linii produkcyjnej w celu uzyskania maksymalnego stopnia wykorzystania czasu pracy maszyn, minimalnego czasu przejścia wyrobów przez linię produkcyjną oraz minimalną liczbę wyrobów w toku produkcji zapewniając realizację planu produkcyjnego.

Sumując wszystkie zalety i wady, jakie zostały zidentyfikowane podczas realizacji niniejszej pracy można stwierdzić, że opracowane narzędzie do modelowania przepływu strumienia wartości produkcji części lotniczych na elastycznej linii produkcyjnej spełnia swoje

zadanie. Po przeszkoleniu pracowników Działu Planowania z obsługi modelu zostanie przekazane im narzędzie, które w znacznym stopniu ułatwi planowanie produkcji i podejmowanie trudnych decyzji.

W przyszłości pozyskana dzięki temu wiedza oraz doświadczenie zostaną wykorzystane do opracowania kolejnych wirtualnych linii produkcyjnych. Cel jaki został postawiony przez Zarząd firmy to wykonanie w najbliższych dwóch latach kolejnych wirtualnych modeli dla kluczowych linii produkcyjnych.

Główną wartością niniejszej pracy i jednocześnie wkładem w naukę jest udowodnienie, że opracowany wirtualny model linii produkcyjnej jest zdalny do przeprowadzania eksperymentów na podstawie których można dokonywać konfiguracji linii produkcyjnej i dane wyjściowe z symulacji podejmowane decyzje poprzez przeprowadzone

Mimo zastosowanych uproszczeń w tworzeniu modelu w zakresie części niezgodnych oraz istniejących ograniczeń takich jak brak danych w zakresie awaryjności maszyn, przeprowadzone symulacje znacząco ułatwią proces podejmowania decyzji.

Przyszłe badania symulacyjne z wykorzystaniem opracowanego modelu mogą dotyczyć każdego wolumenu produkcji części, jaki będzie planowany zgodnie z zapotrzebowaniem klienta. Również będzie możliwe rozszerzenie modelu o kolejne części wdrożone w przyszłości do produkcji.

Bibliografia

- [1] Alcácer V., Cruz-Machado V., (2019). *Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems*. Engineering Science and Technology, an International Journal 22, str. 899-919
- [2] Al-Zubaidi S. Q. D., Fantoni G., Failli F., (2021). *Analysis of drivers for solving facility layout problems: A Literature review*. Journal of Industrial Information Integration 31, str. 377-393
- [3] Amjad M. S., Rafique M. Z., Hussain S., Khan M. A., (2020). *A new vision of LARG Manufacturing — A trail towards Industry 4.0*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 31, str. 377-393
- [4] Amjad M. S., Rafique M. Z., Khan M. A., (2021). *Leveraging Optimized and Cleaner Production through Industry 4.0*. Sustainable Production and Consumption 26, str. 859-871
- [5] Antonelli D., Litwin L., Stadnicka D. (2018). *Multiple System Dynamics and Discrete Event Simulation for manufacturing system performance evaluation*. Procedia CIRP 78, str. 179
- [6] Antosz K. Stadnicka D., (2010). *Doskonalenie procesu produkcji mieszadeł z wykorzystaniem mapowania strumienia wartości*, Technologia i Automatyzacja Montażu 4/2010, str. 42
- [7] Bagińska M. (2018). *Usprawnienie procesu gospodarczego metodą mapowania – studium przypadku*. Management Forum, Vol 6, str. 7-18
- [8] Bartecki K., Król D., Skowroński J., (2018). *Wyznaczanie kluczowych wskaźników wydajności procesu produkcyjnego – część I: badanie teoretyczne*. Pomiarzy Automatyka Robotyka Nr3, str. 5-13
- [9] Battesini M., Schwengber ten Caten C., Pacheco D. A. J., (2021). *Key factors for operational performance in manufacturing systems: Conceptual model, systematic literature review and implications*. Journal of Manufacturing Systems 60, str. 265-282
- [10] Behzadian M., Otaghsara S. K., Yazdani M., Ignatius J., (2012). *A state-of-the-art survey of TOPSIS applications*. Expert Systems with Applications 39, str. 13051-13069
- [11] Bojańczyk M., (2013). *Regresja i korelacja na światowych rynkach – w pułapce metod ilościowych*. Kwartalnik Naukowy Uczelni Vistula 2013; 4(38), str. 82-83

- [12] Borkowski S., Ulewicz R., (2009). *Instrumenty doskonalenia systemów produkcyjnych*. Wydawnictwo PTM, str. 32
- [13] Borkowski S., Ulewicz R., (2009). *Systemy produkcyjne*. Instytut Organizacji i Zarządzania w Przemśle ORGMASZ, str. 10, 28
- [14] Bylinko L., (2015). *Mapowanie strumienia wartości jako narzędzie diagnozy procesów zarządzania miejską infrastrukturą transportową*. Logistyka, Logistyka – nauka Nr 3, str. 5622-5626
- [15] Center, S. L. (2018). *Jerome Lemelson*.
- [16] Chen Y., (2016). *Industrial information integration—A literature review 2006–2015*. Journal of Industrial Information Integration 2, str. 30-64
- [17] Colledani M., Tolio T., Fischer A., Iung B., Lanza G., Schmitt R., Váncza J., (2014). *Design and management of manufacturing systems for production quality*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 63, str. 773-796
- [18] Czaja J., Preweda E., (2000). *Analiza statystyczna zmiennej losowej wielowymiarowej w aspekcie korelacji i predykcji*. Geodezja Tom 6, Zeszyt 2, str. 130
- [19] Czakon W. (2011). *Metodyka systematycznego przeglądu literatury*. Przegląd Organizacji, Nr 3, str. 57-61
- [20] Czerska J. (2014). *Doskonalenie strumienia wartości*. LeanQ Team Gdańsk
- [21] Czerwińska K., Pacana A. (2019). *Kluczowe wskaźniki efektywności KPI*, str. 4
- [22] Deng Y., Zhou N., Liu X., Lu Q., (2018). *Research on Fault Diagnosis of Flexible Material R2R Manufacturing System Based on Quality Control Chart and SoV*. Mathematical Problems in Engineering, str. 1-8
- [23] Domański C., (2015). *Ograniczenia stosowania testów statystycznych*. Metody Ilościowe w Badaniach Ekonomicznych, Tom XVI/3, str. 20
- [24] Dudek M., (2016). *Szczupłe systemy wytwarzania*. Difin SA, Warszawa, str. 132
- [25] Favi C., Germani M., Mandolini M., Marconi M., (2017). *A Software Tool for the Analysis and Management of Resource Consumptions and Environmental Impacts of Manufacturing Plants*. Procedia CIRP 61, str. 341-346
- [26] Goldratt E., (1990). *What is this Thing Called Theory of Constraints and how should it be Implemented?*, str. 4
- [27] Goldratt E., Cox J., (2000). *Cel. Doskonałość w produkcji*. Werbel Warszawa, str. 382-390

- [28] Grobelak M., Ulewicz R., (2018). *Koncepcja Lean Management w sektorze bankowym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, Zarządzanie Nr 29, str. 268-277
- [29] Grycuk A., (2010). *Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI) jako narzędzie doskonalenia efektywności operacyjnej firm produkcyjnych zorientowanych na lean*. Przegląd Organizacji Nr 2, str. 28–31
- [30] Hensel P., (2020). *Systematyczny przegląd literatury w naukach o zarządzaniu i jakości*, str. 7
- [31] Huang A., Badurdeen F., Jawahir I.S., (2018). *Towards Developing Sustainable Reconfigurable Manufacturing Systems*. Procedia Manufacturing 17, str. 1136-1143
- [32] ISO 22400-1:2014 – *Automation systems and integration – Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management – Part 1: Overview, Concepts and Terminology*. Geneva: International Standard Organization (ISO)
- [33] ISO 22400-2:2014 – *Automation systems and integration – Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management – Part 2: Definitions and descriptions*. Geneva: International Standard Organization (ISO)
- [34] Janiga-Ćmiel A. (2016). *Zastosowanie metody symulacji dyskretnej do optymalizacji podejmowanych decyzji ekonomicznych*. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach nr 265, str. 17
- [35] Jaskó S., Skrop A., Holczinger T. Chovan T., Abonyi J. (2020). *Development of manufacturing execution systems in accordance with Industry 4.0 requirements: A review of standard- and ontology-based methodologies and tools*. Computers in Industry 123, str. 6
- [36] Jeon B., Suh S.-H., (2018). *Design Considerations and Architecture for Cooperative Smart Factory: MAPE/BD Approach*. Procedia Manufacturing 26, str. 1094-1106
- [37] Karkula M., Kubal S. (2012). *Wykorzystanie symulacji strumienia wartości w identyfikacji wąskich gardeł systemu produkcyjnego w ZPC Mieszko S.A.*, str. 2-4
- [38] Kheybari S., Rezaie F. M., Farazmand H., (2020). *Analytic network process: An overview of applications*. Applied Mathematics and Computation 367, str. 1-35
- [39] Kikolski M. (2020). *Determination of ISO 22400 Key Performance Indicators using Simulation Models: The Concept and Methodology*. SCITEPRESS – Science and Technology Publications, str. 92-99
- [40] Koch T., (2002). *Lean Manufacturing, czyli jak wdrażać konkurencyjność*, s. 6

- [41] Koliński A., Śliwczyński B., Golińska-Dawson P., (2018). *Wykorzystanie symulacji jako narzędzia wspomagającego proces oceny efektywności produkcji w przedsiębiorstwach produkcyjnych*. E-Mentor, Dwumiesięcznik Szkoły Głównej Handlowej w Warszawie, Nr 3(75), str. 82
- [42] Korzyński M. (2013). *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*. Wydawnictwo WNT Warszawa, str. 14
- [43] Kowalik K., Klimecka-Tatar D., (2017). *Mapowanie strumienia wartości w procesie obsługi klienta w przedsiębiorstwie usługowym*. Archiwum Wiedzy Inżynierskiej 2017/2/1, str. 9-11
- [44] Lidberg S., Pehrsson L., Frantzén M., (2018). *Applying Aggregated Line Modeling Techniques to Optimize Real World Manufacturing Systems*. Procedia Manufacturing Vol 25, str. 89-96
- [45] Łopatowska J. (2013). *Współdziałanie koncepcji Lean i Teorii Ograniczeń w dążeniu do sukcesu organizacji*. Journal of Management and Finance, Vol. 4, No. 1, str. 176
- [46] Maciąg J. (2016). *Mapowanie Strumienia Wartości w procesie kształcenia w szkole wyższej – wyzwania teorii i praktyki*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Zarządzanie w szkołach wyższych i innowacje w gospodarce, str. 118-128
- [47] Mantravadi S., Moller C. (2019). *An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0*. Procedia Manufacturing Vol 30, str. 588-595
- [48] Mazzuto G., Bevilacqua M., Ciarapica F.E., (2018). *Performance Analysis of New Product Development Process through Timed Coloured Petri Nets*. IFAC PapersOnLine 51-11, str. 862-867
- [49] Miedziński B., Biczynski S., (1991). *Słownik ekonomiki i organizacji przedsiębiorstwa*, s 81
- [50] Mourtzis D., Doukas M., Bernidaki D., (2014). *Simulation in Manufacturing: Review and Challenges*. Procedia CIRP 25, str. 213-229
- [51] Nicholds B. A., Mo J. P.T., O’Rielly L., (2018). *An integrated performance driven manufacturing management strategy based on overall system effectiveness*. Computers in Industry 97, str. 146-156
- [52] Nogalski B., Czerska J., Klimek A. (2010). *Wykorzystanie metod teorii masowej obsługi i „lean management” w usprawnianiu procesów w zarządzaniu organizacją publiczną*. Współczesne Zarządzanie Nr 1/2010, str. 58-68

- [53] Nurdin M., Hakim A. L., (2015). *A Development of Flexible Manufacturing System using POLMAN T-100 Vise Casting Component as a Case Study*. *Procedia Manufacturing* 2, str. 77-81
- [54] Ohno T., (2008). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Productions*, str. 37
- [55] Pałucha K., (2017), *Organizacja i zarządzanie elastycznymi systemami produkcyjnymi*, str. 331
- [56] Pater J., Basara D., Stadnicka D.,(2021). *Wpływ kompensacji parametrów procesu w oparciu o temperaturę na wydajność i produktywność procesu*. *Technologia i Automatykacja Montażu* 2/2021, str. 46
- [57] Peternek P., Kośny M., (2011). *Kilka uwag o testowaniu istotności współczynnika korelacji*. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Bankowej we Wrocławiu*, str. 341-350
- [58] Pergher I., de Almeida A. T., (2017). *A multi-attribute decision model for setting production planning parameters*. *Journal of Manufacturing Systems* 42, str. 224-232
- [59] Phuyal S., Bista D., Bista R., (2020). *Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review*. *Sustainable Futures* 2
- [60] PN-EN 9100:2018-08 – *Systemy zarządzania jakością – Wymagania dla organizacji związanych z lotnictwem, kosmonautyką i obronnością*
- [61] PN-EN ISO 14001:2015-09 – *Systemy zarządzania środowiskowego – Wymagania i wytyczne stosowania*
- [62] PN-EN ISO 9001:2015-10 – *Systemy zarządzania jakością – Wymagania*
- [63] PN-ISO 45001:2018-06 – *Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy – Wymagania i wytyczne stosowania*
- [64] Puchała W., Biały W., Bobkowski G., (2005). *Możliwości zastosowania komputerowych systemów wspomagających zarządzanie eksploatacją maszyn i urządzeń*. *Zeszyty Naukowe nr 5 Akademii Morskiej w Szczecinie*, str. 403-412
- [65] Schroeder T. (2017). *Zastosowanie mapowania strumienia wartości w usługach hotelarskich*. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie*, 12(972), str 113-128
- [66] Seebacher G., Winkler H., (2014). *Evaluating flexibility in discrete manufacturing based on performance and efficiency*. *International Journal of Production Economics* 153, str. 340-351

- [67] Singh, B., Garg, S.K., Sharma, S.K. (2011) *Value stream mapping: literature review and implications for Indian industry*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 53, str. 799–809
- [68] Solding, P., Gullander, P. (2009). *Concepts for Simulation Based Value Stream Mapping*.
- [69] Stadnicka D., Antosz K. (2018) *Overall Equipment Effectiveness: Analysis of Different Ways of Calculations and Improvements*. Advances in Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, str. 45-55.
- [70] Stamirowski J., (2011). *Elastyczność systemów produkcyjnych w kontekście dynamiki produkcji*. Postępy Nauki i Techniki nr 9, str. 39-42
- [71] Szreder M., (2019). *Weryfikacja hipotez statystycznych – współczesne wyzwania*. Biuletyn Polskiego Towarzystwa Ekonomicznego nr 4(87), str. 106
- [72] Walker J., Childe S., Wang Y., (2019). *Analysing manufacturing enterprises to identify opportunities for automation and guide implementation - a review*. IFAC PapersOnLine 52-13, str. 2273-2278
- [73] Windmark C., Andersson C., (2018). *Cost assessment of a production system – A method targeting a product's aggregated value stream costs*. Procedia Manufacturing 25, str. 231-238
- [74] Wirtz A., Meißner M., Wiederkehr P., Biermann D., Myrzik J., (2019). *Evaluation of cutting processes using geometric physically-based process simulations in view of the electric power consumption of machine tools*. Procedia CIRP 79, str. 602-607
- [75] Witczyńska K., (2016). *Innowacyjny System Andon, jako przykład narzędzi kontroli procesu produkcyjnego w filozofii Lean management'u w warunkach globalizacji*. Wydawnictwo Nauka i Biznes, str. 133-140
- [76] Wolniak R., Skotnicka-Zasadzeń B., (2013). *Zastosowanie mapowania strumienia wartości do wprowadzenia innowacji organizacyjnej w przemyśle*. Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji, Tom z. 2(4), str. 182-183
- [77] Wrodarczyk J., (2013). *Dwukryterialny model wyznaczania struktury produkcji przedsiębiorstwa na podstawie teorii ograniczeń*, s. 241
- [78] Zawadzka L., (2007). *Współczesne problemy i kierunki rozwoju elastycznych systemów produkcyjnych*

Spis tabel

Tabela 1.1. Porównanie własności metody statycznej i symulacji; Źródło: <i>opracowanie własne na podstawie Solding, P., Gullander, P. [68]</i>	25
Tabela 1.2. Przykładowe branże gdzie zastosowano MSW jako narzędzie ciągłego doskonalenia do usprawnienia procesu; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	26
Tabela 3.1. Liczba wyszukanych publikacji z podziałem na bazy danych; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	41
Tabela 3.2. Liczba wyszukanych publikacji z podziałem na lata publikacji; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	41
Tabela 3.3. Liczba wyszukanych publikacji z podziałem na bazy danych; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	42
Tabela 3.4. Wykaz artykułów poddanych szczegółowej analizie; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	43
Tabela 4.1 Diagram SIPOC dla stanu początkowego procesu obróbki części kadłub na elastycznej linii produkcyjnej; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	54
Tabela 4.2 Matryca uzbrojenia maszyn w narzędzia obróbcze dla poszczególnych części i operacji technologicznych – fragment; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	60
Tabela 4.3 Matryca dostępności miejsca w poszczególnych magazynach narzędzi; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	61
Tabela 6.1. Przykład raportu tygodniowego danych typu <i>Produkcja</i> z systemu JFMX; Źródło: <i>system JFMX sterowania linią ESP</i>	69
Tabela 6.2. Przykład raportu tygodniowego danych typu <i>Obróbki</i> z systemu JFMX; Źródło: <i>system JFMX sterowania linią ESP</i>	70
Tabela 6.3. Przykład raportu tygodniowego danych typu <i>Wydział</i> z systemu JFMX dla wszystkich maszyn elastycznego systemu produkcyjnego; Źródło: <i>system JFMX sterowania linią ESP</i>	71
Tabela 6.4. Przykład raportu tygodniowego danych typu <i>Wydział</i> z systemu JFMX indywidualnie dla każdej z maszyn elastycznego systemu produkcyjnego; Źródło: <i>system JFMX sterowania linią ESP</i>	72
Tabela 6.5. Dostępność narzędzi skrawających na poszczególnych maszynach z podziałem na części i operacje technologiczne; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	80
Tabela 6.6. Status wdrożenia operacji technologicznych na poszczególnych maszynach z podziałem na części; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	80
Tabela 6.7. Status brakujących narzędzi dla poszczególnych operacji z podziałem na części; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	81
Tabela 7.1. Założenia ogólne elastycznej linii produkcyjnej ESP. Źródło: <i>opracowanie własne</i>	85
Tabela 7.2. Założenia do opracowania modelu wirtualnego w programie WITNESS; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	87
Tabela 7.3. Parametry wejściowe do opracowania wirtualnego modelu w programie Witness. Źródło: <i>opracowanie własne</i>	87

Tabela 7.4. Parametry wyjściowe wirtualnego modelu. <i>Źródło: opracowanie własne</i>	88
Tabela 7.5. Wartości <i>WIP</i> i <i>LT</i> w badanym przedziale czasu. <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z linii ESP</i>	98
Tabela 7.6. Dane dotyczące zleceń produkcyjnych przekazanych do produkcji i wykonywanych na linii ESP w badanym przedziale czasu. <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z linii ESP</i>	99
Tabela 7.7. Maszyny wykorzystane w poszczególnych operacjach dla części wyprodukowanych w analizowanym okresie czasu. <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z linii ESP</i>	100
Tabela 7.8. Liczba palet z oprzyrządowaniem wykorzystanych dla części wyprodukowanych w analizowanym okresie czasu. <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z linii ESP</i>	100
Tabela 7.9. Wartości wskaźników <i>WIP</i> i <i>LT</i> wygenerowanych automatycznie podczas symulacji w wybranym przedziale czasu do walidacji modelu. <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie raportu z wirtualnej symulacji linii ESP</i>	101
Tabela 7.10. Interpretacja wskaźnika <i>r</i> dla dodatniego związku korelacyjnego. <i>Źródło: Bojańczyk M, [11]</i>	103
Tabela 8.1. Aktualny status zmiennej BazaAlt_Op definiujący możliwości wykonywania poszczególnych części i operacji na maszynach determinowany wdrożeniem operacji; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	113
Tabela 8.2. Aktualny status zmiennej BazaAlt_Op definiujący możliwości wykonywania poszczególnych operacji na części na określonych maszynach determinowany dostępnością narzędzi. <i>Źródło: opracowanie własne</i>	114
Tabela 8.3. Aktualny status zmiennej BazaAlt_Op definiujący możliwości wykonywania kompletnych części (wszystkich operacji na części) na maszynach determinowany dostępnością narzędzi. <i>Źródło: opracowanie własne</i>	114
Tabela 8.4. Aktualny status zmiennej Min_Max definiujący minimalną i maksymalną liczbę sztuk części określonego rodzaju na linii ESP. <i>Źródło: opracowanie własne</i>	114
Tabela 8.5. Tabela zbiorcza eksperymentów pierwszego etapu od 1.01 do 1.06; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	117
Tabela 8.6. Tabela zbiorcza eksperymentów etapu drugiego od 2.01 do 2.15; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	117
Tabela 8.7. Plan trzech eksperymentów, zmienne BazaAlt_Op i Min_Max zgodne ze stanem obecnym; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	120
Tabela 8.8. Plan trzech eksperymentów, wartość zmiennej BazaAlt_Op 1 dla wszystkich części i maszyn (pełna elastyczność), zmienna Min_Max zgodne ze stanem obecnym; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	120
Tabela 8.9. Zbiorcze wyniki dotyczące dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia w przypadku rozszerzenia elastyczności linii ESP; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	122
Tabela 8.10. Analiza dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia dla części K_1 ; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	123

Tabela 8.11. Plan trzech eksperymentów, wartość zmiennej BazaAlt_Op dla części K_1 zgodna ze scenariuszami 1, 2 i 3, zmienna Min_Max zgodne ze stanem obecnym, zmienna IleW_ESP wartość maksymalna 26 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	124
Tabela 8.12. Analiza dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia dla części K_2 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	125
Tabela 8.13. Plan trzech eksperymentów dla części K_2 zgodnie ze scenariuszami 1, 2 i 3, od najtańszej do najdroższej opcji doposażenia maszyny, zmienna Min_Max zgodne ze stanem obecnym, zmienna IleW_ESP wartość maksymalna 26 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	126
Tabela 8.14. Analiza dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia dla części K_4 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	126
Tabela 8.15. Analiza dostępności oraz braku narzędzi pod kątem potencjalnych kosztów do poniesienia dla części P_1 i P_2 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	127
Tabela 8.16. Plan trzech eksperymentów dla części K_4 zgodnie ze scenariuszami 1, 2 i 3, od najtańszej do najdroższej opcji doposażenia maszyny, zmienna Min_Max zgodne ze stanem obecnym, zmienna IleW_ESP wartość maksymalna 26 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	128
Tabela 8.17. Plan trzech eksperymentów dla części P_1 zgodnie ze scenariuszami 1, 2 i 3, od najtańszej do najdroższej opcji doposażenia maszyny, zmienna Min_Max zgodne ze stanem obecnym, zmienna IleW_ESP wartość maksymalna 26 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	128
Tabela 8.18. Plan trzech eksperymentów dla części P_2 zgodnie ze scenariuszami 1, 2 i 3, od najtańszej do najdroższej opcji doposażenia maszyny, zmienna Min_Max zgodne ze stanem obecnym, zmienna IleW_ESP wartość maksymalna 26 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	129
Tabela 8.19. Kompletne wyniki przeprowadzonych eksperymentów dla kroku pierwszego; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	130
Tabela 8.20. Wyniki wskaźnika <i>U</i> dla eksperymentów 1.01, 1.02 i 1.03; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	131
Tabela 8.21. Wyniki wskaźnika <i>WIP</i> i <i>LT</i> dla eksperymentów 1.01, 1.02 i 1.03; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	132
Tabela 8.22. Wyniki wskaźnika <i>U</i> dla eksperymentów 1.04, 1.05 i 1.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	133
Tabela 8.23. Wyniki wskaźnika <i>WIP</i> i <i>LT</i> dla eksperymentów 1.04, 1.05 i 1.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	134
Tabela 8.24. Kompletne wyniki przeprowadzonych eksperymentów dla kroku drugiego; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	135
Tabela 8.25. Wyniki wskaźnika <i>U</i> dla eksperymentów 2.01, 2.02 i 2.03; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	136
Tabela 8.26. Wyniki wskaźnika <i>WIP</i> i <i>LT</i> dla eksperymentów 2.01, 2.02 i 2.03; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	137
Tabela 8.27. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów 2.01 , 2.02 i 2.03 dla części K_1 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	138
Tabela 8.28. Wyniki wskaźnika <i>U</i> dla eksperymentów 2.04, 2.05 i 2.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	139

Tabela 8.29. Wyniki wskaźnika <i>WIP</i> i <i>LT</i> dla eksperymentów 2.04, 2.05 i 2.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	140
Tabela 8.30. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów 2.04 , 2.05 i 2.06 dla części K_2 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	140
Tabela 8.31. Wyniki wskaźnika <i>U</i> dla eksperymentów 2.07, 2.08 i 2.09; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	141
Tabela 8.32. Wyniki wskaźnika <i>WIP</i> i <i>LT</i> dla eksperymentów 2.07, 2.08 i 2.09; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	142
Tabela 8.33. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów 2.07 , 2.08 i 2.09 dla części K_4 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	142
Tabela 8.34. Wyniki wskaźnika <i>U</i> dla eksperymentów 2.10, 2.11 i 2.12; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	143
Tabela 8.35. Wyniki wskaźnika <i>WIP</i> i <i>LT</i> dla eksperymentów 2.10, 2.11 i 2.12; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	144
Tabela 8.36. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów 2.10 , 2.11 i 2.12 dla części P_1 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	144
Tabela 8.37. Wyniki wskaźnika <i>U</i> dla eksperymentów 2.13, 2.14 i 2.15; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	145
Tabela 8.35. Wyniki wskaźnika <i>WIP</i> i <i>LT</i> dla eksperymentów 2.13, 2.14 i 2.15; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	146
Tabela 8.39. Wyniki wyboru najlepszego scenariusza dla trzech eksperymentów 2.13 , 2.14 i 2.15 dla części P_2 ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	146
Tabela 8.40. Podsumowanie wyników eksperymentów pierwszego i drugiego etapu dla zmiennej BazaAlt_Op ; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	149

Spis rysunków

Rysunek 1.1. Elastyczny moduł produkcyjny; Źródło: opracowanie własne.....	14
Rysunek 1.2. Elastyczne gniazdo produkcyjne; Źródło: opracowanie własne.....	14
Rysunek 1.3. Elastyczna linia produkcyjna ESP; Źródło: opracowanie własne.....	15
Rysunek 1.4. Etapy poprawy produktywności według Goldratta nazywane „five steps of focusing”; Źródło: opracowanie własne na podstawie [27].....	18
Rysunek 1.5. Schemat postępowania w trakcie mapowania strumienia wartości; Źródło: opracowanie własne	20
Rysunek 1.6. Symbole graficzne do budowy mapy przepływu strumienia wartości; Źródło: opracowanie własne w programie Visio	21
Rysunek 1.7. Mapa przepływu strumienia wartości w produkcji mieszadeł – stan przyszły; Źródło: Antosz K. Stadnicka D., [6].....	22
Rysunek 1.8. Symulacja przepływu strumienia wartości opracowana w programie Witness; Źródło: materiały szkoleniowe firmy Lanner Group Ltd.....	24
Rysunek 3.1. Wykres liczby publikacji z podziałem na bazy danych i lata wystąpienia; Źródło: opracowanie własne	42
Rysunek 4.1. Layout elastycznej linii produkcyjnej ESP; Źródło: opracowanie własne na podstawie MCM S.p.A. - Machining Centers Manufacturing	49
Rysunek 4.2. Widok systemu sterowania linią produkcyjną JFMX; Źródło: system JFMX sterowania linią ESP.....	50
Rysunek 4.3. Kadłub główny przekładni akcesoriów ADT; Źródło: zdjęcie własne.....	51
Rysunek 4.4. Pokrywa przekładni akcesoriów ADT; Źródło: zdjęcie własne	52
Rysunek 4.5. Korpus przekładni kątovej, element przeniesienia napędu przekładni akcesoriów ADT; Źródło: zdjęcie własne	53
Rysunek 4.6. Kompletny moduł przekładni akcesoriów ADT na stojaku montażowym; Źródło: zdjęcie własne.....	53
Rysunek 4.7. Mapa VSM dla produktu kadłub – stan aktualny; Źródło: opracowanie własne	55
Rysunek 4.8. Mapa VSM dla produktu kadłub – stan przyszły; Źródło: opracowanie własne	56
Rysunek 4.9. Widok pulpitu sterowania narzędziami na linii produkcyjnej JFMX; Źródło: system JFMX sterowania linią ESP	57
Rysunek 4.10. Widok magazynu narzędzi na linii ESP; Źródło: zdjęcie własne.....	58
Rysunek 4.11. Karta Ustawcza Narzędzia; Źródło: opracowanie własne na podstawie Karty Ustawczej Narzędzi	59
Rysunek 6.1. Procentowy udział zdarzeń dla maszyny M1 w odniesieniu do czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu; Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych.....	74

Rysunek 6.2. Procentowy udział zdarzeń dla maszyny M2 w odniesieniu do czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu; <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych</i>	75
Rysunek 6.3. Procentowy udział zdarzeń dla maszyny M3 w odniesieniu do czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu; <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych</i>	75
Rysunek 6.4. Procentowy udział zdarzeń dla maszyny M4 w odniesieniu do czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu; <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych</i>	76
Rysunek 6.5. Procentowy udział zdarzeń dla linii ESP w odniesieniu do rzeczywistego czasu dysponowanego w analizowanym okresie czasu; <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych</i>	76
Rysunek 6.6. Analiza zdarzeń dla linii ESP w analizowanym okresie czasu w odniesieniu do planowanego czasu dostępnego, średnio 168 godzin tygodniowo dla wszystkich maszyn łącznie; <i>Źródło: opracowanie własne na podstawie danych historycznych</i>	77
Rysunek 6.7. Test normalności rozkładu dla czasów wykonania części K1, Op1 na maszynie M1; <i>Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab</i>	78
Rysunek 6.8. Histogram dla czasów wykonania części K1, Op1 na maszynie M1; <i>Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab</i>	79
Rysunek 6.9. Wykres prawdopodobieństwa dla czasów wykonania części K1, Op1 na maszynie M1; <i>Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab</i>	79
Rysunek 7.1. Layout linii ESP wykonany w programie Witness; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	90
Rysunek 7.2. Widok linii ESP wykonany w programie Witness; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	93
Rysunek 7.3. Widok linii ESP podczas pracy symulacji wykonany w programie Witness; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	94
Rysunek 7.4. Wartości wskaźnika <i>WIP</i> dla dwóch zestawów danych – rzeczywistych i z symulacji; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	102
Rysunek 7.5. Wartości wskaźnika <i>LT</i> dla dwóch zestawów danych – rzeczywistych i z symulacji; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	102
Rysunek 7.6. Analiza korelacji liniowej Pearsona zmiennych <i>WIP</i> ; <i>Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab</i>	104
Rysunek 7.7. Analiza korelacji liniowej Pearsona zmiennych <i>LT</i> ; <i>Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab</i>	105
Rysunek 7.8. Raport 2 sample T-Test dla <i>WIP</i> ; <i>Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab</i>	107
Rysunek 7.9. Raport 2 sample T-Test dla <i>LT</i> ; <i>Źródło: opracowanie własne w programie statystycznym Minitab</i>	108
Rysunek 8.1. Plan badań; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	116
Rysunek 8.2. Wyniki dla wskaźnika <i>U</i> z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 1.01, 1.02, i 1.03; <i>Źródło: opracowanie własne</i>	132

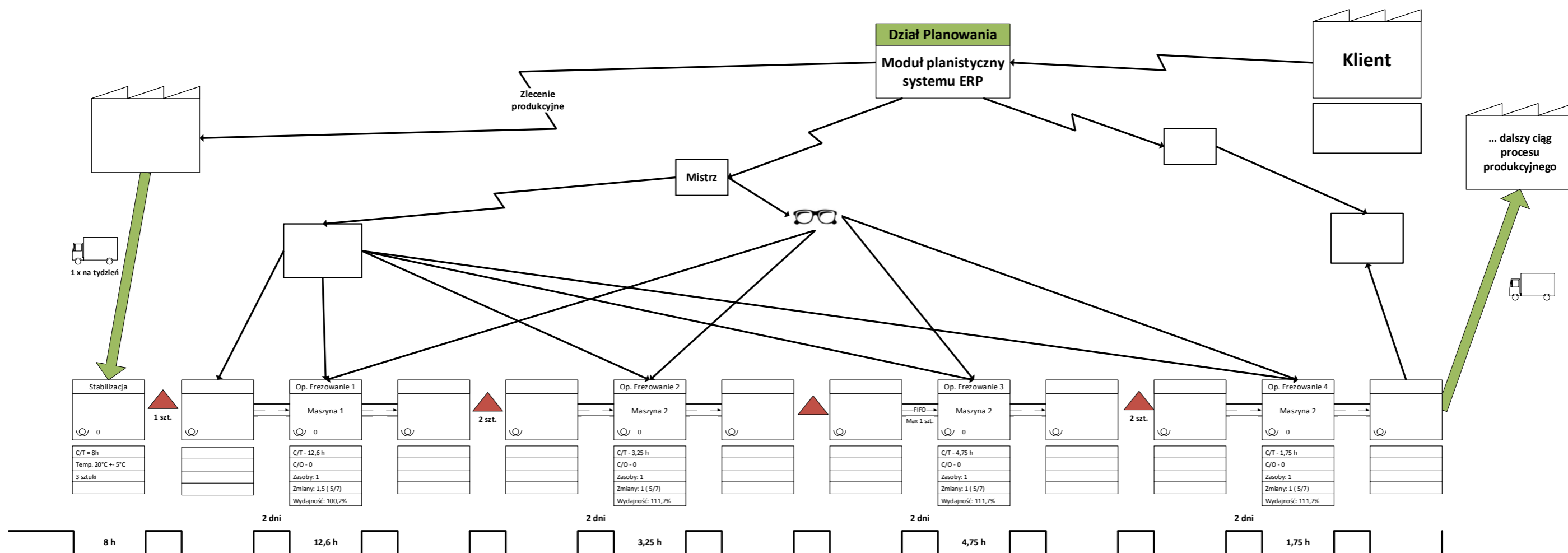
Rysunek 8.3. Wyniki dla wskaźnika <i>WIP</i> w eksperymentach 1.01, 1.02, i 1.03; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	132
Rysunek 8.4. Wyniki dla wskaźnika <i>LT</i> w eksperymentach 1.01, 1.02, i 1.03; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	132
Rysunek 8.5. Wyniki dla wskaźnika <i>U</i> z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 1.04, 1.05, i 1.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	133
Rysunek 8.6. Wyniki dla wskaźnika <i>WIP</i> w eksperymentach 1.04, 1.05, i 1.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	134
Rysunek 8.7. Wyniki dla wskaźnika <i>LT</i> w eksperymentach 1.04, 1.05, i 1.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	134
Rysunek 8.8. Wyniki dla wskaźnika <i>U</i> z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.01, 2.02, i 2.03; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	137
Rysunek 8.9. Wyniki dla wskaźnika <i>WIP</i> w eksperymentach 2.01, 2.02, i 2.03; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	137
Rysunek 8.10. Wyniki dla wskaźnika <i>LT</i> w eksperymentach 2.01, 2.02, i 2.03; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	137
Rysunek 8.11. Wyniki dla wskaźnika <i>U</i> z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.04, 2.05, i 2.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	139
Rysunek 8.12. Wyniki dla wskaźnika <i>WIP</i> w eksperymentach 2.04, 2.05, i 2.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	140
Rysunek 8.13. Wyniki dla wskaźnika <i>LT</i> w eksperymentach 2.04, 2.05, i 2.06; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	140
Rysunek 8.14. Wyniki dla wskaźnika <i>U</i> z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.07, 2.08, i 2.09; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	141
Rysunek 8.15. Wyniki dla wskaźnika <i>WIP</i> w eksperymentach 2.07, 2.08, i 2.09; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	142
Rysunek 8.16. Wyniki dla wskaźnika <i>LT</i> w eksperymentach 2.07, 2.08, i 2.09; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	142
Rysunek 8.17. Wyniki dla wskaźnika <i>U</i> z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.10, 2.11, i 2.12; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	143
Rysunek 8.18. Wyniki dla wskaźnika <i>WIP</i> w eksperymentach 2.10, 2.11, i 2.12; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	144
Rysunek 8.19. Wyniki dla wskaźnika <i>LT</i> w eksperymentach 2.10, 2.11, i 2.12; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	144
Rysunek 8.20. Wyniki dla wskaźnika <i>U</i> z podziałem na poszczególne maszyny w eksperymentach 2.13, 2.14, i 2.15; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	145
Rysunek 8.21. Wyniki dla wskaźnika <i>WIP</i> w eksperymentach 2.13, 2.14, i 2.15; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	146
Rysunek 8.22. Wyniki dla wskaźnika <i>LT</i> w eksperymentach 2.13, 2.14, i 2.15; Źródło: <i>opracowanie własne</i>	146

Załączniki

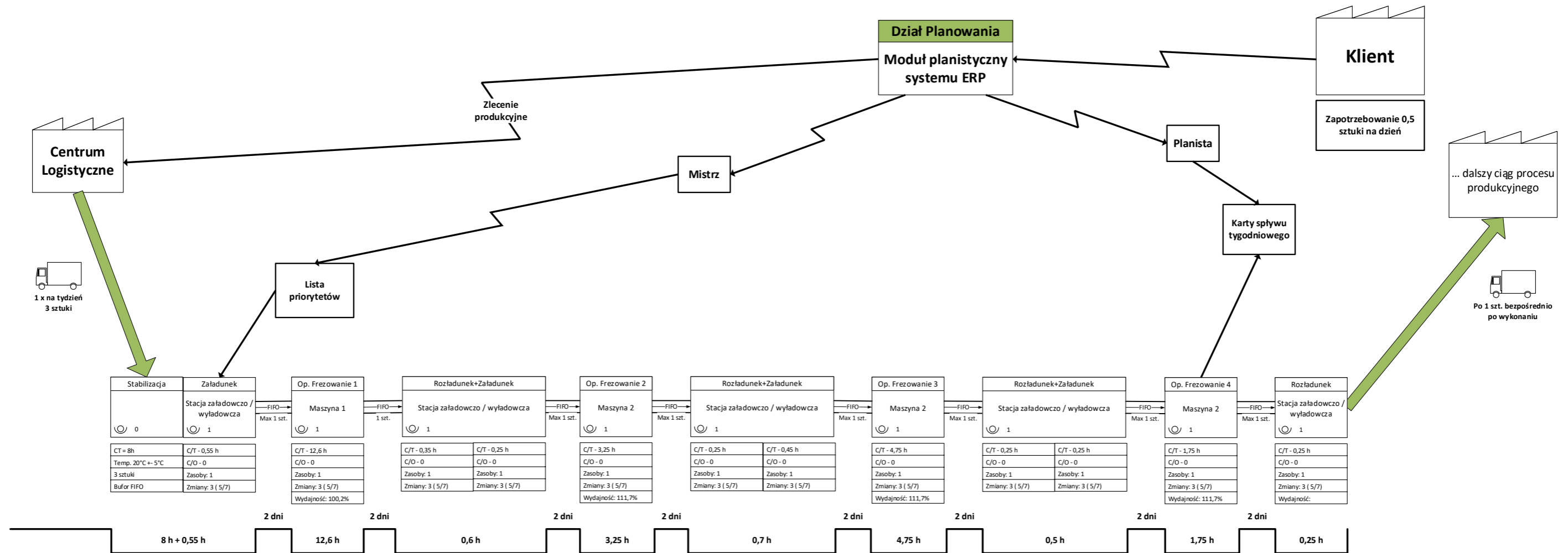
1. Mapa VSM dla produktu kadłub – stan aktualny
2. Mapa VSM dla produktu kadłub – stan przyszły
3. Kod reguły wejścia i wyjścia do i z magazynu palet MP

Załącznik 1

Mapa VSM dla produktu kadłub – stan obecny.



Linia ESP: VSM dla produktu kadłub AGB – stan przyszły



Załącznik 3

Kod reguły wejścia i wyjścia do i z magazynu palet MP

Reguła wejścia (tzw. Akcje na Wejściu):

```
atrLT(2) = TIME
atrLT(3) = TIME - atrLT(1)
atrLT(4) = TIME - atrLT(2)
atrLT(5) = TIME - atrLT(2)
NazwaCzesci_MP = TYPE
IF atrStOper = "Przed"
    M_wyboru_Przed[1,2] = NazwaCzesci_MP
    M_wyboru_Przed[1,3] = atrNrMasz_M1
    M_wyboru_Przed[1,4] = atrNrMasz_M2
    M_wyboru_Przed[1,5] = atrNrMasz_M3
    M_wyboru_Przed[1,6] = atrNrMasz_M4
    M_wyboru_Przed[1,7] = atrLT(3)
    M_wyboru_Przed[1,8] = atrLT(4)
    M_wyboru_Przed[1,9] = M_wyboru_Przed[1,7] +
M_wyboru_Przed[1,8]
    M_wyboru_Przed[1,10] = atrLT(1)
    M_wyboru_Przed[1,11] = atrLT(2)
ENDIF
!
IF M_wyboru_Przed[1,3] = M1
    V_Przed_M1(1) = M_wyboru_Przed[1,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[1,4] = M2
    V_Przed_M2(1) = M_wyboru_Przed[1,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[1,5] = M3
    V_Przed_M3(1) = M_wyboru_Przed[1,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[1,6] = M4
    V_Przed_M4(1) = M_wyboru_Przed[1,9]
ENDIF
!
IF atrStOper = "Po"
    M_wyboru_Po[1,2] = NazwaCzesci_MP
    M_wyboru_Po[1,3] = atrLT(3)
    M_wyboru_Po[1,4] = atrLT(5)
    M_wyboru_Po[1,5] = M_wyboru_Po[1,3] +
M_wyboru_Po[1,4]
    V_Po(1) = M_wyboru_Po[1,5]
    M_wyboru_Po[1,6] = atrLT(1)
    M_wyboru_Po[1,7] = atrLT(2)
ENDIF
!
IF NParts (P1) = 1 AND M_wyboru_Przed[1,10] > 0
    M_wyboru_Przed[1,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[1,10]
    M_wyboru_Przed[1,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[1,11]
    M_wyboru_Przed[1,9] = M_wyboru_Przed[1,7] +
M_wyboru_Przed[1,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[1,3] = M1
    V_Przed_M1(1) = M_wyboru_Przed[1,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[1,4] = M2
    V_Przed_M2(1) = M_wyboru_Przed[1,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[1,5] = M3
    V_Przed_M3(1) = M_wyboru_Przed[1,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[1,6] = M4
    V_Przed_M4(1) = M_wyboru_Przed[1,9]
ENDIF
!
IF NParts (P1) = 1 AND M_wyboru_Po[1,6] > 0
    M_wyboru_Po[1,3] = TIME - M_wyboru_Po[1,6]
    M_wyboru_Po[1,4] = TIME - M_wyboru_Po[1,7]
    M_wyboru_Po[1,5] = M_wyboru_Po[1,3] +
M_wyboru_Po[1,4]
    V_Po(1) = M_wyboru_Po[1,5]
ENDIF
!
IF NParts (P2) = 1 AND M_wyboru_Przed[2,10] > 0
    M_wyboru_Przed[2,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[2,10]
    M_wyboru_Przed[2,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[2,11]
    M_wyboru_Przed[2,9] = M_wyboru_Przed[2,7] +
M_wyboru_Przed[2,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[2,3] = M1
    V_Przed_M1(2) = M_wyboru_Przed[2,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[2,4] = M2
    V_Przed_M2(2) = M_wyboru_Przed[2,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[2,5] = M3
    V_Przed_M3(2) = M_wyboru_Przed[2,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[2,6] = M4
    V_Przed_M4(2) = M_wyboru_Przed[2,9]
ENDIF
!
IF NParts (P2) = 1 AND M_wyboru_Po[2,6] > 0
    M_wyboru_Po[2,3] = TIME - M_wyboru_Po[2,6]
    M_wyboru_Po[2,4] = TIME - M_wyboru_Po[2,7]
    M_wyboru_Po[2,5] = M_wyboru_Po[2,3] +
M_wyboru_Po[2,4]
    V_Po(2) = M_wyboru_Po[2,5]
ENDIF
!
IF NParts (P3) = 1 AND M_wyboru_Przed[3,10] > 0
    M_wyboru_Przed[3,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[3,10]
    M_wyboru_Przed[3,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[3,11]
    M_wyboru_Przed[3,9] = M_wyboru_Przed[3,7] +
M_wyboru_Przed[3,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[3,3] = M1
    V_Przed_M1(3) = M_wyboru_Przed[3,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[3,4] = M2
    V_Przed_M2(3) = M_wyboru_Przed[3,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[3,5] = M3
    V_Przed_M3(3) = M_wyboru_Przed[3,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[3,6] = M4
    V_Przed_M4(3) = M_wyboru_Przed[3,9]
ENDIF
!
IF NParts (P3) = 1 AND M_wyboru_Po[3,6] > 0
    M_wyboru_Po[3,3] = TIME - M_wyboru_Po[3,6]
    M_wyboru_Po[3,4] = TIME - M_wyboru_Po[3,7]
    M_wyboru_Po[3,5] = M_wyboru_Po[3,3] +
M_wyboru_Po[3,4]
    V_Po(3) = M_wyboru_Po[3,5]
ENDIF
!
```

```

IF NParts (P4) = 1 AND M_wyboru_Przed[4,10] > 0
    M_wyboru_Przed[4,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[4,10]
    M_wyboru_Przed[4,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[4,11]
    M_wyboru_Przed[4,9] = M_wyboru_Przed[4,7] +
M_wyboru_Przed[4,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[4,3] = M1
    V_Przed_M1(4) = M_wyboru_Przed[4,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[4,4] = M2
    V_Przed_M2(4) = M_wyboru_Przed[4,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[4,5] = M3
    V_Przed_M3(4) = M_wyboru_Przed[4,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[4,6] = M4
    V_Przed_M4(4) = M_wyboru_Przed[4,9]
ENDIF
!
IF NParts (P4) = 1 AND M_wyboru_Po[4,6] > 0
    M_wyboru_Po[4,3] = TIME - M_wyboru_Po[4,6]
    M_wyboru_Po[4,4] = TIME - M_wyboru_Po[4,7]
    M_wyboru_Po[4,5] = M_wyboru_Po[4,3] +
M_wyboru_Po[4,4]
    V_Po(4) = M_wyboru_Po[4,5]
ENDIF
!
IF NParts (P5) = 1 AND M_wyboru_Przed[5,10] > 0
    M_wyboru_Przed[5,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[5,10]
    M_wyboru_Przed[5,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[5,11]
    M_wyboru_Przed[5,9] = M_wyboru_Przed[5,7] +
M_wyboru_Przed[5,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[5,3] = M1
    V_Przed_M1(5) = M_wyboru_Przed[5,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[5,4] = M2
    V_Przed_M2(5) = M_wyboru_Przed[5,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[5,5] = M3
    V_Przed_M3(5) = M_wyboru_Przed[5,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[5,6] = M4
    V_Przed_M4(5) = M_wyboru_Przed[5,9]
ENDIF
!
IF NParts (P5) = 1 AND M_wyboru_Po[5,6] > 0
    M_wyboru_Po[5,3] = TIME - M_wyboru_Po[5,6]
    M_wyboru_Po[5,4] = TIME - M_wyboru_Po[5,7]
    M_wyboru_Po[5,5] = M_wyboru_Po[5,3] +
M_wyboru_Po[5,4]
    V_Po(5) = M_wyboru_Po[5,5]
ENDIF
!
IF NParts (P6) = 1 AND M_wyboru_Przed[6,10] > 0
    M_wyboru_Przed[6,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[6,10]
    M_wyboru_Przed[6,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[6,11]
    M_wyboru_Przed[6,9] = M_wyboru_Przed[6,7] +
M_wyboru_Przed[6,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[6,3] = M1
    V_Przed_M1(6) = M_wyboru_Przed[6,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[6,4] = M2
    V_Przed_M2(6) = M_wyboru_Przed[6,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[6,5] = M3
    V_Przed_M3(6) = M_wyboru_Przed[6,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[6,6] = M4
    V_Przed_M4(6) = M_wyboru_Przed[6,9]
ENDIF
!
IF NParts (P6) = 1 AND M_wyboru_Po[6,6] > 0
    M_wyboru_Po[6,3] = TIME - M_wyboru_Po[6,6]
    M_wyboru_Po[6,4] = TIME - M_wyboru_Po[6,7]
    M_wyboru_Po[6,5] = M_wyboru_Po[6,3] +
M_wyboru_Po[6,4]
    V_Po(6) = M_wyboru_Po[6,5]
ENDIF
!
IF NParts (P7) = 1 AND M_wyboru_Przed[7,10] > 0
    M_wyboru_Przed[7,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[7,10]
    M_wyboru_Przed[7,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[7,11]
    M_wyboru_Przed[7,9] = M_wyboru_Przed[7,7] +
M_wyboru_Przed[7,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[7,3] = M1
    V_Przed_M1(7) = M_wyboru_Przed[7,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[7,4] = M2
    V_Przed_M2(7) = M_wyboru_Przed[7,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[7,5] = M3
    V_Przed_M3(7) = M_wyboru_Przed[7,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[7,6] = M4
    V_Przed_M4(7) = M_wyboru_Przed[7,9]
ENDIF
!
IF NParts (P7) = 1 AND M_wyboru_Po[7,6] > 0
    M_wyboru_Po[7,3] = TIME - M_wyboru_Po[7,6]
    M_wyboru_Po[7,4] = TIME - M_wyboru_Po[7,7]
    M_wyboru_Po[7,5] = M_wyboru_Po[7,3] +
M_wyboru_Po[7,4]
    V_Po(7) = M_wyboru_Po[7,5]
ENDIF
!
IF NParts (P8) = 1 AND M_wyboru_Przed[8,10] > 0
    M_wyboru_Przed[8,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[8,10]
    M_wyboru_Przed[8,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[8,11]
    M_wyboru_Przed[8,9] = M_wyboru_Przed[8,7] +
M_wyboru_Przed[8,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[8,3] = M1
    V_Przed_M1(8) = M_wyboru_Przed[8,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[8,4] = M2
    V_Przed_M2(8) = M_wyboru_Przed[8,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[8,5] = M3
    V_Przed_M3(8) = M_wyboru_Przed[8,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[8,6] = M4
    V_Przed_M4(8) = M_wyboru_Przed[8,9]
ENDIF
!
IF NParts (P8) = 1 AND M_wyboru_Po[8,6] > 0
    M_wyboru_Po[8,3] = TIME - M_wyboru_Po[8,6]
    M_wyboru_Po[8,4] = TIME - M_wyboru_Po[8,7]
    M_wyboru_Po[8,5] = M_wyboru_Po[8,3] +
M_wyboru_Po[8,4]
    V_Po(8) = M_wyboru_Po[8,5]
ENDIF
!
IF NParts (P9) = 1 AND M_wyboru_Przed[9,10] > 0
    M_wyboru_Przed[9,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[9,10]
    M_wyboru_Przed[9,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[9,11]
    M_wyboru_Przed[9,9] = M_wyboru_Przed[9,7] +
M_wyboru_Przed[9,8]

```

```

ENDIF
IF M_wyboru_Przed[9,3] = M1
    V_Przed_M1(9) = M_wyboru_Przed[9,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[9,4] = M2
    V_Przed_M2(9) = M_wyboru_Przed[9,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[9,5] = M3
    V_Przed_M3(9) = M_wyboru_Przed[9,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[9,6] = M4
    V_Przed_M4(9) = M_wyboru_Przed[9,9]
ENDIF
!
IF NParts (P9) = 1 AND M_wyboru_Po[9,6] > 0
    M_wyboru_Po[9,3] = TIME - M_wyboru_Po[9,6]
    M_wyboru_Po[9,4] = TIME - M_wyboru_Po[9,7]
    M_wyboru_Po[9,5] = M_wyboru_Po[9,3] +
M_wyboru_Po[9,4]
    V_Po(9) = M_wyboru_Po[9,5]
ENDIF
!
IF NParts (P10) = 1 AND M_wyboru_Przed[10,10] > 0
    M_wyboru_Przed[10,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[10,10]
    M_wyboru_Przed[10,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[10,11]
    M_wyboru_Przed[10,9] = M_wyboru_Przed[10,7] +
M_wyboru_Przed[10,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[10,3] = M1
    V_Przed_M1(10) = M_wyboru_Przed[10,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[10,4] = M2
    V_Przed_M2(10) = M_wyboru_Przed[10,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[10,5] = M3
    V_Przed_M3(10) = M_wyboru_Przed[10,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[10,6] = M4
    V_Przed_M4(10) = M_wyboru_Przed[10,9]
ENDIF
!
IF NParts (P10) = 1 AND M_wyboru_Po[10,6] > 0
    M_wyboru_Po[10,3] = TIME - M_wyboru_Po[10,6]
    M_wyboru_Po[10,4] = TIME - M_wyboru_Po[10,7]
    M_wyboru_Po[10,5] = M_wyboru_Po[10,3] +
M_wyboru_Po[10,4]
    V_Po(10) = M_wyboru_Po[10,5]
ENDIF
!
IF NParts (P11) = 1 AND M_wyboru_Przed[11,10] > 0
    M_wyboru_Przed[11,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[11,10]
    M_wyboru_Przed[11,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[11,11]
    M_wyboru_Przed[11,9] = M_wyboru_Przed[11,7] +
M_wyboru_Przed[11,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[11,3] = M1
    V_Przed_M1(11) = M_wyboru_Przed[11,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[11,4] = M2
    V_Przed_M2(11) = M_wyboru_Przed[11,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[11,5] = M3
    V_Przed_M3(11) = M_wyboru_Przed[11,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[11,6] = M4
    V_Przed_M4(11) = M_wyboru_Przed[11,9]
ENDIF
!
IF NParts (P11) = 1 AND M_wyboru_Po[11,6] > 0
    M_wyboru_Po[11,3] = TIME - M_wyboru_Po[11,6]
    M_wyboru_Po[11,4] = TIME - M_wyboru_Po[11,7]
    M_wyboru_Po[11,5] = M_wyboru_Po[11,3] +
M_wyboru_Po[11,4]
    V_Po(11) = M_wyboru_Po[11,5]
ENDIF
!
IF NParts (P12) = 1 AND M_wyboru_Przed[12,10] > 0
    M_wyboru_Przed[12,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[12,10]
    M_wyboru_Przed[12,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[12,11]
    M_wyboru_Przed[12,9] = M_wyboru_Przed[12,7] +
M_wyboru_Przed[12,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[12,3] = M1
    V_Przed_M1(12) = M_wyboru_Przed[12,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[12,4] = M2
    V_Przed_M2(12) = M_wyboru_Przed[12,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[12,5] = M3
    V_Przed_M3(12) = M_wyboru_Przed[12,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[12,6] = M4
    V_Przed_M4(12) = M_wyboru_Przed[12,9]
ENDIF
!
IF NParts (P12) = 1 AND M_wyboru_Po[12,6] > 0
    M_wyboru_Po[12,3] = TIME - M_wyboru_Po[12,6]
    M_wyboru_Po[12,4] = TIME - M_wyboru_Po[12,7]
    M_wyboru_Po[12,5] = M_wyboru_Po[12,3] +
M_wyboru_Po[12,4]
    V_Po(12) = M_wyboru_Po[12,5]
ENDIF
!
IF NParts (P13) = 1 AND M_wyboru_Przed[13,10] > 0
    M_wyboru_Przed[13,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[13,10]
    M_wyboru_Przed[13,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[13,11]
    M_wyboru_Przed[13,9] = M_wyboru_Przed[13,7] +
M_wyboru_Przed[13,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[13,3] = M1
    V_Przed_M1(13) = M_wyboru_Przed[13,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[13,4] = M2
    V_Przed_M2(13) = M_wyboru_Przed[13,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[13,5] = M3
    V_Przed_M3(13) = M_wyboru_Przed[13,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[13,6] = M4
    V_Przed_M4(13) = M_wyboru_Przed[13,9]
ENDIF
!
IF NParts (P13) = 1 AND M_wyboru_Po[13,6] > 0
    M_wyboru_Po[13,3] = TIME - M_wyboru_Po[13,6]
    M_wyboru_Po[13,4] = TIME - M_wyboru_Po[13,7]
    M_wyboru_Po[13,5] = M_wyboru_Po[13,3] +
M_wyboru_Po[13,4]
    V_Po(13) = M_wyboru_Po[13,5]
ENDIF
!
IF NParts (P14) = 1 AND M_wyboru_Przed[14,10] > 0
    M_wyboru_Przed[14,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[14,10]
    M_wyboru_Przed[14,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[14,11]
    M_wyboru_Przed[14,9] = M_wyboru_Przed[14,7] +
M_wyboru_Przed[14,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[14,3] = M1
    V_Przed_M1(14) = M_wyboru_Przed[14,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[14,4] = M2
    V_Przed_M2(14) = M_wyboru_Przed[14,9]

```

```

ENDIF
IF M_wyboru_Przed[14,5] = M3
    V_Przed_M3(14) = M_wyboru_Przed[14,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[14,6] = M4
    V_Przed_M4(14) = M_wyboru_Przed[14,9]
ENDIF
!
IF NParts (P14) = 1 AND M_wyboru_Po[14,6] > 0
    M_wyboru_Po[14,3] = TIME - M_wyboru_Po[14,6]
    M_wyboru_Po[14,4] = TIME - M_wyboru_Po[14,7]
    M_wyboru_Po[14,5] = M_wyboru_Po[14,3] +
M_wyboru_Po[14,4]
    V_Po(14) = M_wyboru_Po[14,5]
ENDIF
!
IF NParts (P15) = 1 AND M_wyboru_Przed[15,10] > 0
    M_wyboru_Przed[15,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[15,10]
    M_wyboru_Przed[15,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[15,11]
    M_wyboru_Przed[15,9] = M_wyboru_Przed[15,7] +
M_wyboru_Przed[15,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[15,3] = M1
    V_Przed_M1(15) = M_wyboru_Przed[15,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[15,4] = M2
    V_Przed_M2(15) = M_wyboru_Przed[15,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[15,5] = M3
    V_Przed_M3(15) = M_wyboru_Przed[15,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[15,6] = M4
    V_Przed_M4(15) = M_wyboru_Przed[15,9]
ENDIF
!
IF NParts (P15) = 1 AND M_wyboru_Po[15,6] > 0
    M_wyboru_Po[15,3] = TIME - M_wyboru_Po[15,6]
    M_wyboru_Po[15,4] = TIME - M_wyboru_Po[15,7]
    M_wyboru_Po[15,5] = M_wyboru_Po[15,3] +
M_wyboru_Po[15,4]
    V_Po(15) = M_wyboru_Po[15,5]
ENDIF
!
IF NParts (P16) = 1 AND M_wyboru_Przed[16,10] > 0
    M_wyboru_Przed[16,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[16,10]
    M_wyboru_Przed[16,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[16,11]
    M_wyboru_Przed[16,9] = M_wyboru_Przed[16,7] +
M_wyboru_Przed[16,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[16,3] = M1
    V_Przed_M1(16) = M_wyboru_Przed[16,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[16,4] = M2
    V_Przed_M2(16) = M_wyboru_Przed[16,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[16,5] = M3
    V_Przed_M3(16) = M_wyboru_Przed[16,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[16,6] = M4
    V_Przed_M4(16) = M_wyboru_Przed[16,9]
ENDIF
!
IF NParts (P16) = 1 AND M_wyboru_Po[16,6] > 0
    M_wyboru_Po[16,3] = TIME - M_wyboru_Po[16,6]
    M_wyboru_Po[16,4] = TIME - M_wyboru_Po[16,7]
    M_wyboru_Po[16,5] = M_wyboru_Po[16,3] +
M_wyboru_Po[16,4]
    V_Po(16) = M_wyboru_Po[16,5]
ENDIF
!
IF NParts (P17) = 1 AND M_wyboru_Przed[17,10] > 0
    M_wyboru_Przed[17,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[17,10]
    M_wyboru_Przed[17,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[17,11]
    M_wyboru_Przed[17,9] = M_wyboru_Przed[17,7] +
M_wyboru_Przed[17,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[17,3] = M1
    V_Przed_M1(17) = M_wyboru_Przed[17,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[17,4] = M2
    V_Przed_M2(17) = M_wyboru_Przed[17,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[17,5] = M3
    V_Przed_M3(17) = M_wyboru_Przed[17,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[17,6] = M4
    V_Przed_M4(17) = M_wyboru_Przed[17,9]
ENDIF
!
IF NParts (P17) = 1 AND M_wyboru_Po[17,6] > 0
    M_wyboru_Po[17,3] = TIME - M_wyboru_Po[17,6]
    M_wyboru_Po[17,4] = TIME - M_wyboru_Po[17,7]
    M_wyboru_Po[17,5] = M_wyboru_Po[17,3] +
M_wyboru_Po[17,4]
    V_Po(17) = M_wyboru_Po[17,5]
ENDIF
!
IF NParts (P18) = 1 AND M_wyboru_Przed[18,10] > 0
    M_wyboru_Przed[18,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[18,10]
    M_wyboru_Przed[18,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[18,11]
    M_wyboru_Przed[18,9] = M_wyboru_Przed[18,7] +
M_wyboru_Przed[18,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[18,3] = M1
    V_Przed_M1(18) = M_wyboru_Przed[18,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[18,4] = M2
    V_Przed_M2(18) = M_wyboru_Przed[18,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[18,5] = M3
    V_Przed_M3(18) = M_wyboru_Przed[18,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[18,6] = M4
    V_Przed_M4(18) = M_wyboru_Przed[18,9]
ENDIF
!
IF NParts (P18) = 1 AND M_wyboru_Po[18,6] > 0
    M_wyboru_Po[18,3] = TIME - M_wyboru_Po[18,6]
    M_wyboru_Po[18,4] = TIME - M_wyboru_Po[18,7]
    M_wyboru_Po[18,5] = M_wyboru_Po[18,3] +
M_wyboru_Po[18,4]
    V_Po(18) = M_wyboru_Po[18,5]
ENDIF
!
IF NParts (P19) = 1 AND M_wyboru_Przed[19,10] > 0
    M_wyboru_Przed[19,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[19,10]
    M_wyboru_Przed[19,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[19,11]
    M_wyboru_Przed[19,9] = M_wyboru_Przed[19,7] +
M_wyboru_Przed[19,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[19,3] = M1
    V_Przed_M1(19) = M_wyboru_Przed[19,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[19,4] = M2
    V_Przed_M2(19) = M_wyboru_Przed[19,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[19,5] = M3
    V_Przed_M3(19) = M_wyboru_Przed[19,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[19,6] = M4
    V_Przed_M4(19) = M_wyboru_Przed[19,9]

```



```

ENDIF
!
IF NParts (P19) = 1 AND M_wyboru_Po[19,6] > 0
    M_wyboru_Po[19,3] = TIME - M_wyboru_Po[19,6]
    M_wyboru_Po[19,4] = TIME - M_wyboru_Po[19,7]
    M_wyboru_Po[19,5] = M_wyboru_Po[19,3] +
M_wyboru_Po[19,4]
    V_Po(19) = M_wyboru_Po[19,5]
ENDIF
!
IF NParts (P20) = 1 AND M_wyboru_Przed[20,10] > 0
    M_wyboru_Przed[20,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[20,10]
    M_wyboru_Przed[20,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[20,11]
    M_wyboru_Przed[20,9] = M_wyboru_Przed[20,7] +
M_wyboru_Przed[20,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[20,3] = M1
    V_Przed_M1(20) = M_wyboru_Przed[20,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[20,4] = M2
    V_Przed_M2(20) = M_wyboru_Przed[20,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[20,5] = M3
    V_Przed_M3(20) = M_wyboru_Przed[20,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[20,6] = M4
    V_Przed_M4(20) = M_wyboru_Przed[20,9]
ENDIF
!
IF NParts (P20) = 1 AND M_wyboru_Po[20,6] > 0
    M_wyboru_Po[20,3] = TIME - M_wyboru_Po[20,6]
    M_wyboru_Po[20,4] = TIME - M_wyboru_Po[20,7]
    M_wyboru_Po[20,5] = M_wyboru_Po[20,3] +
M_wyboru_Po[20,4]
    V_Po(20) = M_wyboru_Po[20,5]
ENDIF
!
IF NParts (P21) = 1 AND M_wyboru_Przed[21,10] > 0
    M_wyboru_Przed[21,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[21,10]
    M_wyboru_Przed[21,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[21,11]
    M_wyboru_Przed[21,9] = M_wyboru_Przed[21,7] +
M_wyboru_Przed[21,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[21,3] = M1
    V_Przed_M1(21) = M_wyboru_Przed[21,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[21,4] = M2
    V_Przed_M2(21) = M_wyboru_Przed[21,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[21,5] = M3
    V_Przed_M3(21) = M_wyboru_Przed[21,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[21,6] = M4
    V_Przed_M4(21) = M_wyboru_Przed[21,9]
ENDIF
!
IF NParts (P21) = 1 AND M_wyboru_Po[21,6] > 0
    M_wyboru_Po[21,3] = TIME - M_wyboru_Po[21,6]
    M_wyboru_Po[21,4] = TIME - M_wyboru_Po[21,7]
    M_wyboru_Po[21,5] = M_wyboru_Po[21,3] +
M_wyboru_Po[21,4]
    V_Po(21) = M_wyboru_Po[21,5]
ENDIF
!
IF NParts (P22) = 1 AND M_wyboru_Przed[22,10] > 0
    M_wyboru_Przed[22,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[22,10]
    M_wyboru_Przed[22,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[22,11]
    M_wyboru_Przed[22,9] = M_wyboru_Przed[22,7] +
M_wyboru_Przed[22,8]
ENDIF

```

```

IF M_wyboru_Przed[22,3] = M1
    V_Przed_M1(22) = M_wyboru_Przed[22,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[22,4] = M2
    V_Przed_M2(22) = M_wyboru_Przed[22,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[22,5] = M3
    V_Przed_M3(22) = M_wyboru_Przed[22,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[22,6] = M4
    V_Przed_M4(22) = M_wyboru_Przed[22,9]
ENDIF
!
IF NParts (P22) = 1 AND M_wyboru_Po[22,6] > 0
    M_wyboru_Po[22,3] = TIME - M_wyboru_Po[22,6]
    M_wyboru_Po[22,4] = TIME - M_wyboru_Po[22,7]
    M_wyboru_Po[22,5] = M_wyboru_Po[22,3] +
M_wyboru_Po[22,4]
    V_Po(22) = M_wyboru_Po[22,5]
ENDIF
!
IF NParts (P23) = 1 AND M_wyboru_Przed[23,10] > 0
    M_wyboru_Przed[23,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[23,10]
    M_wyboru_Przed[23,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[23,11]
    M_wyboru_Przed[23,9] = M_wyboru_Przed[23,7] +
M_wyboru_Przed[23,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[23,3] = M1
    V_Przed_M1(23) = M_wyboru_Przed[23,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[23,4] = M2
    V_Przed_M2(23) = M_wyboru_Przed[23,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[23,5] = M3
    V_Przed_M3(23) = M_wyboru_Przed[23,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[23,6] = M4
    V_Przed_M4(23) = M_wyboru_Przed[23,9]
ENDIF
!
IF NParts (P23) = 1 AND M_wyboru_Po[23,6] > 0
    M_wyboru_Po[23,3] = TIME - M_wyboru_Po[23,6]
    M_wyboru_Po[23,4] = TIME - M_wyboru_Po[23,7]
    M_wyboru_Po[23,5] = M_wyboru_Po[23,3] +
M_wyboru_Po[23,4]
    V_Po(23) = M_wyboru_Po[23,5]
ENDIF
!
IF NParts (P24) = 1 AND M_wyboru_Przed[24,10] > 0
    M_wyboru_Przed[24,7] = TIME -
M_wyboru_Przed[24,10]
    M_wyboru_Przed[24,8] = TIME -
M_wyboru_Przed[24,11]
    M_wyboru_Przed[24,9] = M_wyboru_Przed[24,7] +
M_wyboru_Przed[24,8]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[24,3] = M1
    V_Przed_M1(24) = M_wyboru_Przed[24,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[24,4] = M2
    V_Przed_M2(24) = M_wyboru_Przed[24,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[24,5] = M3
    V_Przed_M3(24) = M_wyboru_Przed[24,9]
ENDIF
IF M_wyboru_Przed[24,6] = M4
    V_Przed_M4(24) = M_wyboru_Przed[24,9]
ENDIF
!
IF NParts (P24) = 1 AND M_wyboru_Po[24,6] > 0
    M_wyboru_Po[24,3] = TIME - M_wyboru_Po[24,6]
    M_wyboru_Po[24,4] = TIME - M_wyboru_Po[24,7]
    M_wyboru_Po[24,5] = M_wyboru_Po[24,3] +
M_wyboru_Po[24,4]

```

```

V_Po(24) = M_wyboru_Po[24,5]
ENDIF
!
IF atrStOper = "Po"
IlePo = IlePo + 1
ENDIF
!
IF atrStOper = "Przed"
IlePrzed = IlePrzed + 1
ENDIF
!
IF atrNrMasz_M1 = "M1"
MagPal[1,2] = MagPal[1,2] + 1
ENDIF
IF atrNrMasz_M2 = "M2"
MagPal[2,2] = MagPal[2,2] + 1
ENDIF
IF atrNrMasz_M3 = "M3"
MagPal[3,2] = MagPal[3,2] + 1
ENDIF
IF atrNrMasz_M4 = "M4"
MagPal[4,2] = MagPal[4,2] + 1
ENDIF

```

Reguła wyjścia (tzw. Akcje na Wyjściu):

```

M_wyboru_Przed[1,2] = NONE
M_wyboru_Przed[1,3] = " "
M_wyboru_Przed[1,4] = " "
M_wyboru_Przed[1,5] = " "
M_wyboru_Przed[1,6] = " "
M_wyboru_Przed[1,7] = 0
M_wyboru_Przed[1,8] = 0
M_wyboru_Przed[1,9] = 0
M_wyboru_Przed[1,10] = 0
M_wyboru_Przed[1,11] = 0
V_Przed_M1(1) = 0

```

```

V_Przed_M2(1) = 0
V_Przed_M3(1) = 0
V_Przed_M4(1) = 0
M_wyboru_Po[1,2] = NONE
M_wyboru_Po[1,3] = 0
M_wyboru_Po[1,4] = 0
M_wyboru_Po[1,5] = 0
M_wyboru_Po[1,6] = 0
M_wyboru_Po[1,7] = 0
V_Po(1) = 0
!
atrLT(2) = 0
atrLT(3) = 0
!
IF atrStOper = "Po"
IlePo = IlePo - 1
ENDIF
!
IF atrStOper = "Przed"
IlePrzed = IlePrzed - 1
ENDIF
!
IF atrNrMasz_M1 = "M1"
MagPal[1,2] = MagPal[1,2] - 1
ENDIF
IF atrNrMasz_M2 = "M2"
MagPal[2,2] = MagPal[2,2] - 1
ENDIF
IF atrNrMasz_M3 = "M3"
MagPal[3,2] = MagPal[3,2] - 1
ENDIF
IF atrNrMasz_M4 = "M4"
MagPal[4,2] = MagPal[4,2] - 1
ENDIF

```