

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Zakład Inżynierii Produkcji



PRACA DOKTORSKA

**Metodyka poziomowania produkcji
w kontekście rotacji zapasów oraz dostępności
wyrobów gotowych**

Mgr inż. Paulina REWERS

Dyscyplina naukowa: inżynieria mechaniczna

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Adam HAMROL

Promotor pomocniczy:

dr inż. Krzysztof ŻYWICKI

Poznań 2023

*Prof. dr. hab. inż. Adamowi Hamrowi
za wsparcie merytoryczne i cenne uwagi,
które wpłynęły na ostateczny kształt tej pracy,
a także za wyrozumiałość i cierpliwość.*

*Dr. inż. Krzysztofowi Żywickiemu
za wartościowe dyskusje i cenne wskazówki
udzielone mi podczas pisania pracy.*

*Koleżankom i kolegom z Zakładu Inżynierii Produkcji
za życzliwość, która spotykała mnie
na każdym kroku i okazaną pomoc.*

*Rodzicom, rodzinie i przyjaciołom
za wsparcie i wiarę w moje możliwości.*

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
Streszczenie	7
Układ pracy.....	8
Wprowadzenie	9
1. Przegląd literatury	11
1.1. Planowanie produkcji.....	11
1.1.1. Wybrane zagadnienie dotyczące planowania produkcji	11
1.1.2. Hierarchia i zakres planów produkcji	12
1.1.3. Klasyczne metody planowania produkcji	13
1.2. Harmonogramowanie produkcji	17
1.2.1. Wybrane zagadnienia dotyczące harmonogramowania produkcji	17
1.2.2. Metody harmonogramowania zadań w warunkach produkcji seryjnej	18
1.2.3. Reguły priorytetu	23
1.3. Poziomowanie produkcji	24
1.3.1. Definicja poziomowania produkcji.....	24
1.3.2. Cele, wady i zalety poziomowania produkcji	25
1.3.3. Metodyki implementacji poziomowania produkcji	27
1.4. Narzędzia poziomowania produkcji	29
1.4.1. Analiza ABC/XYZ.....	29
1.4.2. Macierz i wskaźnik podobieństwa technologicznego wyrobów.....	31
1.4.3. Wskaźnik EPEI	33
1.4.4. Wielkość zapasów w supermarkecie	34
1.5. Wnioski z analizy literatury	35
2. Cel, teza pracy i metody badawcze	39
2.1. Cel i teza pracy.....	39
2.2. Metody badawcze	40
3. Metodyka poziomowania produkcji zorientowana na zwiększanie rotacji zapasów oraz dostępności wyrobów gotowych	44
3.1. Idea poziomowania produkcji.....	44
3.2. Definicje.....	44
3.3. Założenia.....	47
3.4. Czynniki determinujące i mierniki poziomowania produkcji.....	48

3.5.	Etapy poziomowania według proponowanej metodyki.....	50
3.5.1.	Ogólny schemat metodyki	50
3.5.2.	Podział wyrobów na grupy	53
3.5.3.	Podział wyrobów z grupy priorytetowej na rodziny	57
3.5.4.	Wyznaczenie częstości uzupełniania zapasów w magazynie	58
3.5.5.	Wyznaczenie wielkości zapasów w magazynie wyrobów gotowych.....	62
3.5.6.	Opracowanie wariantów harmonogramu produkcji.....	64
3.5.7.	Wybór wariantu harmonogramu produkcji.....	68
4.	Eksperyment symulacyjny	69
4.1.	Założenia i metoda symulacji	69
4.2.	Przykład wykonania symulacji	70
4.3.	Wyniki symulacji	79
5.	Weryfikacja skuteczności metodyki w warunkach produkcyjnych	84
5.1.	Charakterystyka przedsiębiorstwa i procesów produkcji	84
5.2.	Założenia i cele symulacji komputerowej.....	84
5.3.	Symulacja komputerowa na wydziale 1	86
5.4.	Pozimowanie produkcji na wydziale 2	94
5.5.	Porównanie otrzymanych wyników	94
6.	Ocena ekspertów	96
6.1.	Wybór osób biorących udział w ocenie	96
6.2.	Dane wejściowe	96
6.3.	Instrukcje.....	98
6.4.	Wykonanie etapów metodyki poziomowania produkcji.....	99
6.5.	Podsumowanie otrzymanych wyników	101
7.	Podsumowanie i wnioski.....	103
	Bibliografia.....	105
	Spis rysunków	119
	Spis tabel	121

Wykaz ważniejszych oznaczeń

$f = 1, \dots, F$	numer porządkowy wyrobów finalnych,
$b = 1, \dots, B$	numer porządkowy części oryginalnych, będących wyrobami prostymi,
$o = 1, \dots, O$	numer porządkowy części oryginalnych, będących wyrobami złożonymi,
$K_x^0 = K_1^0, \dots, K_x^0$	numer porządkowy komórki produkcyjnej 0 stopnia,
$K_x^1 = K_1^1, \dots, K_x^0$	numer porządkowy komórki produkcyjnej 1 stopnia,
$K_x^2 = K_1^2, \dots, K_x^2$	numer porządkowy komórki produkcyjnej 2 stopnia,
$z = 1, \dots, Z$	numer porządkowy zleceń produkcyjnych,
$e = 1, \dots, E$	numer porządkowy operacji technologicznej wyrobu finalnego f ,
t_j	czas jednostkowy wykonania operacji na danej maszynie,
$P_{f-1,f}$	czas przebrojenia maszyny z wyrobu $f-1$ na wyrób f ,
$w = 1, \dots, W$	numer porządkowy zamówienia klienta,
$l = 1, \dots, L$	liczba sztuk w zamówieniu klienta,
$c = 1, \dots, C$	częstość zamówień klienta,
\bar{x}_l	średnia liczba sztuk w zamówieniach,
σ_l	odchylenie standardowe od wartości średniej \bar{x}_l ,
\bar{x}_c	średnia częstość zamówień klientów,
σ_c	odchylenie standardowe od wartości średniej \bar{x}_c ,
$f_{mag} = 1, \dots, F_{mag}$	numer porządkowy wyrobów finalnych składowanych w magazynie,
w_r	liczba zamówień klientów, które zostały zrealizowane w wymaganym terminie,
w_n	liczba zamówień klientów, które nie zostały zrealizowane w wymaganym terminie,
l_r	liczba sztuk wyrobów finalnych f w zrealizowanych zamówieniach klientów w danym okresie analitycznym t ,
V_s	współczynnik zmienności,
$\alpha_{i,k}$	wskaźnik podobieństwa technologicznego wyrobów,
R	wskaźnik rotacji zapasów,
D	wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas,
NDC	nominalny dostępny czas pracy,

t_p	czas pracy na zmianę roboczą,
t_{zp}	czas przerw na zmianę roboczą,
LZ	liczba zmian w ciągu dnia roboczego,
EDC	efektywny czas pracy,
OEE	wskaźnik efektywności wyposażenia,
$t_{C/O}^x$	dostępny czas na przebrojenia dla określonej rodziny wyrobów,
OP_i	czas produkcji rodziny wyrobów,
$\overline{t_{C/O}^x}$	średni czas przebrojenia dla rodziny wyrobów,
MPL_x	możliwa liczba przebrojeń danej rodziny wyrobów,
LPA_x	liczba pozycji asortymentowych danej rodziny wyrobów,
$NMLP$	największa możliwa liczba partii,
LW_x	liczba pozycji asortymentowych, które można podzielić na partie,
C_{max}	długość cyklu wytwarzania.

Streszczenie

Przedstawiony w rozprawie problem szeregowania zadań produkcyjnych w przypadku przepływu nieukierunkowanego (ang. *general job-shop*), występuje w wielu przedsiębiorstwach zmagających się ze zmiennością popytu, wpływającą bezpośrednio na stabilność procesów produkcyjnych. Celem pracy jest opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji, zaspokajającej zmienne zapotrzebowanie na wyroby i spełniającej określone kryteria poziomowania. Opracowana metodyka pozwala na uzyskanie równomiernego spływu wyrobów z procesu tak, aby zmienny popyt klienta nie powodował nagłych zmian w harmonogramie produkcji. Przyjęto również mierniki poziomowania, według których metodyka jest weryfikowana: wskaźnik rotacji zapasów oraz wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas. Przeprowadzono eksperyment symulacyjny dla losowo wygenerowanych danych oraz symulację komputerową dla danych produkcyjnych. Wyniki dla produkcji poziomowanej porównano z wynikami otrzymanymi dla produkcji bazowej pod kątem przyjętych wskaźników. Metodykę poddano również ocenie ekspertów, w celu ustalenia, czy jest szczegółowa i ustrukturyzowana oraz możliwa do zastosowania w rzeczywistych warunkach, a także czy algorytm metodyki jest jednoznaczny i wykonalny.

Abstract

The problem of scheduling production tasks in the case of general job-shop, presented in the dissertation, occurs in many enterprises struggling with the volatility of demand, directly affecting the stability of production processes. The aim of the work is to develop a production scheduling methodology that satisfies the variable demand for products and meets certain leveling criteria. The developed methodology allows to obtain an even flow of products from the process so that the changing customer demand does not cause sudden changes in the production schedule. Leveling measures have also been adopted, according to which the methodology is verified: the stock turnover ratio and the ratio of orders completed on time. A simulation experiment was carried out for randomly generated data and a computer simulation for production data. The results for the leveled production were compared with the results obtained for the base production in terms of the adopted indicators. The methodology was also evaluated by experts in order to determine whether it is detailed and structured and applicable in real conditions, and whether the algorithm of the methodology is unambiguous and feasible.

Układ pracy

Praca składa się z wprowadzenia, sześciu rozdziałów merytorycznych, podsumowania, wykazu cytowanej w pracy literatury oraz załączników.

We wprowadzeniu wskazano na przesłanki do podjęcia tematu pracy oraz opisano główne założenia oraz cel pracy.

Rozdział 1 ma charakter przeglądu literatury. Z uwagi na sformułowany problem badawczy dokonano przeglądu literatury w obszarze planowania i harmonogramowania produkcji, przy czym skupiono się przede wszystkim na poziomowaniu. Celem przeglądu jest zebranie oraz przeanalizowanie informacji na temat poziomowania produkcji, jej definicji, zalet i wad oraz sposobów wdrażania, a także pod kątem narzędzi i wskaźników poziomowania produkcji oraz mierników efektywności poziomowania.

Biorąc pod uwagę wnioski płynące z analizy literatury oraz sformułowany we wprowadzeniu problem badawczy, w rozdziale 2 przedstawiono cel, tezę oraz zakres pracy doktorskiej. Ponadto, wskazano metody badawcze stosowane w pracy. Określono również ramy zastosowania opracowanej metodyki poziomowania produkcji.

Rozdział 3 dotyczy przedstawienia metodyki poziomowania produkcji. W pierwszej części rozdziału zdefiniowano pojęcie poziomowania produkcji oraz przedstawiono czynniki determinujące i mierniki poziomowania. W drugiej części zaprezentowano etapy metodyki poziomowania produkcji.

W rozdziale 4 przedstawiono eksperyment symulacyjny, mający na celu porównanie otrzymanych wyników: wskaźnika rotacji zapasów R i zamówień zrealizowanych na czas D , w przypadku zastosowania produkcji poziomowanej oraz w przypadku wyboru klasycznego podejścia. Eksperyment został przeprowadzony z zastosowaniem programu MS Excel.

W rozdziale 5 przedstawiono symulację komputerową dla danych produkcyjnych. Zaprezentowano charakterystykę dwóch wydziałów przedsiębiorstwa produkcyjnego, zbudowano modele symulacyjne w programie FlexSim, wykonano symulację komputerową dla produkcji bazowej, odzwierciedlającej rzeczywistą produkcję, a także dokonano analizy otrzymanych wyników pod kątem wskazanych wcześniej wskaźników.

Rozdział 6 prezentuje wyniki oceny ekspertów, których poproszono o przeprowadzenie poziomowania produkcji zgodnie z zaproponowaną metodyką oraz jej ocenę. Ocena metodyki odbywała się poprzez wypełnienie kwestionariusza ankiety.

W podsumowaniu przedstawiono wnioski płynące z pracy doktorskiej. Skupiono się na wynikach eksperymentu symulacyjnego, symulacji komputerowej oraz wnioskach z oceny ekspertów.

Załączniki do pracy dostępne są pod linkiem:

https://drive.google.com/drive/folders/1hNaYzX6ZEMDSorPrZZ24XoixlEEkWpA7?usp=share_link

Wprowadzenie

Planowanie to proces decyzyjny stosowany w sektorach wytwórczym i usługowym, który polega na alokacji zasobów (np. ludzi, maszyn, pieniędzy) do zadań, w określonej kolejności i w określonych przedziałach czasu (Pinedo, 2012). Planowanie pozwala nie tylko na określenie zasobów potrzebnych do realizacji zadań, ale także na efektywną koordynację wszystkich działań produkcyjnych realizowanych w celu optymalizacji zadań przedsiębiorstwa (Guzman, Andres i Poler, 2022). Problem planowania produkcji jest szeroko badany, ponieważ pozwala producentom poprawić zyski przedsiębiorstwa poprzez lepsze wykorzystanie zasobów produkcyjnych (Skołud, 2000).

W ostatnich dziesięcioleciach opracowano wiele podejść do formułowania i rozwiązywania problemów związanych z planowaniem produkcji. Tworzenie modeli dla rzeczywistych problemów jest złożonym zadaniem, a procedura rozwiązania w większości przypadków jest trudna. Z matematycznego punktu widzenia większość rzeczywistych problemów szeregowania jest klasyfikowana jako tzw. problemy NP-trudne, dla których najprawdopodobniej nie ma algorytmu czasu wielomianowego (Papadimitriou, 2012; Micciancio i Panagiotis, 2013; Dylewski i Jarczoch, 2014). Z tego powodu w literaturze opisywane są różne modele i podejścia do rozwiązywania problemów związanych z planowaniem, harmonogramowaniem i sekwencjonowaniem produkcji. Ogólnym celem prac badawczych jest określenie zasobów potrzebnych do tego, aby produkcja spełniała wymagania klientów.

Postępy w technologii informacyjno-komunikacyjnej ICT (ang. *Information and Communication Technologies*), tworzenie się Przemysłu 4.0 sprawiają, że prowadzone są prace w kierunku planowania w czasie rzeczywistym. Towarzyszy temu potrzeba gromadzenia i dostępności danych na hali produkcyjnej. Umożliwiają to dostępne czujniki i oprzyrządowanie monitorujące. Zapowiada to radykalną zmianę paradygmatów planowania i harmonogramowania produkcji (Nahhas, Lang, Bosse i Turowski, 2018; Dolgui, Ivanov, Sethi i Sokolov, 2019; Krenczyk, Skolud i Herok, 2017).

Mimo rozwoju i coraz większej dostępności systemów informatycznych wspomagających planowanie i harmonogramowanie produkcji, wiele firm nie decyduje się jednak na ich zakup. Powodów może być wiele. Wysokie koszty zakupu i wdrożenia systemu, brak odpowiedniej infrastruktury informatycznej, brak ewidencji danych produkcyjnych, czy brak odpowiedniej wiedzy pracowników to tylko niektóre z nich.

Według raportu przeprowadzonego przez PSI Polska (PSI Polska, 2016) co trzecie przedsiębiorstwo, spośród 150 ankietowanych, boryka się z trudnościami przy planowaniu produkcji. Do najczęściej wymienianych problemów należą:

- nieoptymalne harmonogramowanie zleceń,
- brak bieżącego dostępu do danych o stanie zaawansowania realizacji zleceń,
- trudność w porównaniu wymaganych zasobów ze zdolnościami produkcyjnymi.

Z raportu wynika również, że przedsiębiorstwa, do planowania produkcji, nadal najczęściej korzystają z arkuszy kalkulacyjnych. Z innego raportu, przeprowadzonego

przez spółkę DSR (DSR Solution, 2016), czołowego dostawcy rozwiązań informatycznych dla firm produkcyjnych, również wynika, że aż 71% ankietowanych wspomaga się arkuszami kalkulacyjnymi MS Excel, a 77% co prawda stosuje rozwiązania klasy ERP/MRP II, ale jedynie do głównego planowania produkcji (63%) i tradycyjnego planowania potrzeb materiałowych (60%). Natomiast systemy klasy ASP (ang. *Advanced Planning and Scheduling*) są wykorzystywane tylko w 13% ankietowanych przedsiębiorstw. Ankietowani wskazali również, że terminowość dostaw do klientów (75%) oraz minimalizacja zapasów (63%) są jednymi z ważniejszych celów, które można osiągnąć poprzez harmonogramowanie produkcji.

W związku z powyższym, można stwierdzić, że nadal w wielu przedsiębiorstwach produkcyjnych proces harmonogramowania produkcji odbywa się na bazie wiedzy i doświadczenia planisty, bez korzystania z zaawansowanych systemów informatycznych do zarządzania produkcją. Wsparciem w takiej sytuacji stają się różne sposoby harmonogramowania, które pomagają osiągnąć założone cele. Jednym z takich sposobów jest popularna *heijunka*, która jest utożsamiana z tzw. poziomowaniem produkcji. Poziomowanie pozwala na osiągnięcie stabilności procesu w warunkach zmiennego zapotrzebowania (Korytkowski, Wisniewski i Rymaszewski, 2013), które jest przez wielu wskazywane jako jedno z największych wyzwań planistycznych (Lean Action Plan, 2021). Niestety, w literaturze na próżno szukać szczegółowych sposobów na jej implementację. W związku z tym uzasadnione jest opracowanie prostej i przejrzystej metodyki i opisanie jej praktycznego zastosowania.

Celem pracy jest opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji, zaspokajającej zmienne zapotrzebowanie na wyroby, spełniającej określone założenia poziomowania, dostosowanej do potrzeb i możliwości przedsiębiorstw nie stosujących w planowaniu zaawansowanych, dedykowanych do planowania, systemów informatycznych. Opracowana metodyka poziomowania produkcji, w odróżnieniu od innych, opisanych w literaturze przedmiotu, ma być z założenia metodyką szczegółową, ustrukturyzowaną i na tyle jednoznaczną, aby możliwe było zastosowanie jej w warunkach produkcyjnych. Dodatkowo zostaną zdefiniowane oraz przyjęte mierniki poziomowania produkcji, według których metodyka będzie weryfikowana – wskaźnika rotacji zapasów oraz zamówień zrealizowanych na czas.

Tematyka pracy jest związana z inżynierią produkcją, w szczególności z organizacją i sterowaniem przepływem materiałów w procesach produkcji w przedsiębiorstwach m.in. z branży maszynowej.

1. Przegląd literatury

1.1. Planowanie produkcji

1.1.1. Wybrane zagadnienie dotyczące planowania produkcji

Planowanie jest kluczowym elementem zarządzania przedsiębiorstwem produkcyjnym (Gelders i Van Wassenhove, 1981; Puigjaner, Graells i Reklaitis, 2002; Gersak, 2013; Żyłka, Szumski i Szczerba, 2017; Kiran, 2019a; Kiran, 2019b; Sepioło, Olszowy i Kucwaj, 2022). Pająk (Pająk, 2003) definiuje pojęcie planowania jako „(...) projektowanie przyszłości, czyli podjęcie decyzji o tym co robić, jak to robić i w jakim czasie to robić, jeszcze przed podjęciem właściwego działania”. Jest ono funkcją pierwotną zarządzania, pełni kluczowe znaczenie w funkcjonowaniu przedsiębiorstwa, a także inne funkcje są podporządkowane i uzależnione od planowania. Poprzez określenie celów i planów możliwe jest porównanie stanu realizacji z założonym celem. W przypadku wykrycia rozbieżności między nimi, zarówno w przypadku nadprodukcji, jak i produkcji wyrobów niezgodnych z wymaganiami, konieczne jest podjęcie decyzji o wprowadzeniu działań korygujących.

Planowanie obejmuje wiele obszarów przedsiębiorstwa, w tym m.in. (Kisielnicki, 2005):

- planowanie marketingu,
- planowanie finansów,
- planowanie sprzedaży,
- planowanie personelu,
- planowanie logistyki, zaopatrzenia i dystrybucji,
- planowanie kierunków rozwoju,
- planowanie produkcji.

Jednym z najważniejszych obszarów planowania w przedsiębiorstwie produkcyjnym jest planowanie produkcji.

Według Skołod (Skołod, 2000) „planowanie produkcji polega na określeniu struktury asortymentowej produkcji. Rodzaj i wielkość produkcji ustalane są na podstawie zapotrzebowania i możliwości produkcyjnych przedsiębiorstwa. Wielkość produkcji stanowi zwykle kompromis pomiędzy licznością serii produkcyjnej a długością cyklu produkcyjnego”. Oznacza to, że planowanie powinno skupiać się w głównej mierze na określeniu możliwości technicznych, materiałowych oraz kadrowych przedsiębiorstwa.

Z kolei według Wróblewskiego (Wróblewski, 1993) „planowanie produkcji obejmuje zagadnienia związane z przepływem materiałów i wyrobów w przedsiębiorstwach produkcyjnych”. Nacisk kładzie się na przepływ materiału, a więc m.in. na ustaleniu stanowisk produkcyjnych do produkcji określonych wyrobów i powiązań między nimi.

Das i Patnaik (Das i Patnaik, 2015) traktują planowanie produkcji szeroko uznając, że „planowanie produkcji obejmuje wszystko, począwszy od planowania każdego zadania w procesie po wykonanie i dostawę produktów”. Wiąże się z tworzeniem planów, podejmowaniem decyzji, rozwiązywaniem problemów oraz wskazywaniem niezbędnych środków do osiągnięcia zamierzonych celów.

Podsumowując, można wskazać, że celem planowania produkcji jest zaspokajanie potrzeba klienta z równoczesną minimalizacją kosztów związanych np. z przestojami maszyn czy urządzeń, w szczególności (Wilson, 2000a; Pająk, 2003):

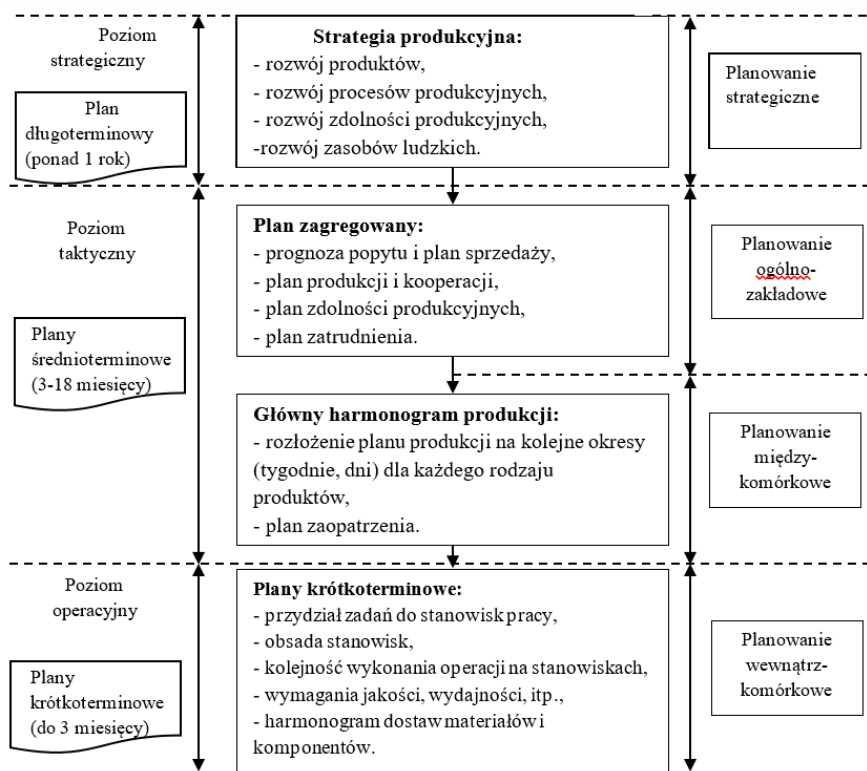
- zaspokojenie zapotrzebowania klienta (wewnętrznego lub zewnętrznego) na wyroby,
- maksymalne wykorzystanie zdolności produkcyjnej,
- zmniejszenie liczby przestojów w produkcji,
- zmniejszenie ilości wykorzystywanych materiałów oraz odpadów produkcyjnych,
- zapewnienie ciągłości produkcji,
- racjonalizacja stanu zapasów,
- zmniejszenie strat (np. energii w trakcie produkcji).

1.1.2. Hierarchia i zakres planów produkcji

Planowanie produkcji musi uwzględniać czas do dyspozycji na realizowanie tworzonych planów (Kraszewska, 2008). Hierarchię i zakres planów produkcji przedstawiono na rysunku 1.1. Plany strategiczne charakteryzują się najodleglejszym horyzontem czasu, a plany operacyjne – najkrótszym. Ich zakres i stopień szczegółowości uzależniony jest od poziomu technicznego i organizacyjnego przedsiębiorstwa (Brzeziński, 2002; Puto, 2022).

Planowanie strategiczne jest zorientowane na rentowność przedsiębiorstwa w długim horyzoncie czasowym, zazwyczaj kilku lat. Obejmuje rozwój produktów, procesów produkcyjnych, zdolności produkcyjnych oraz zasobów ludzkich. W ramach planowania strategicznego rozważane są również plany inwestycyjne (Penc-Pietrzak, 2010).

Planowanie taktyczne jest planowaniem średniookresowym, w horyzoncie czasowym od kilku do kilkunastu miesięcy. Wyróżnia się dwa poziomy planów taktycznych: plan zagregowany oraz główny harmonogram produkcji (Zięba i Ziółkowski, 2012; Ciechańska, 2018). Planowanie zagregowane polega na ustaleniu asortymentu i wolumenu wyrobów gotowych oraz terminów ich wykonania. Plan ten powstaje najczęściej w wyniku porównania zapotrzebowania klienta na wyroby ze zdolnością produkcyjną. Jest punktem wyjścia do tworzenia planów jakości, zapasów, czy zużycia materiałów. Główny harmonogram produkcji jest opracowywany poprzez uszczegółowienie planu zagregowanego. Plan ten pokazuje rozłożenie wielkości produkcji poszczególnych elementów na krótsze okresy czasu (Guzman, Andres i Poler, 2022; Sepiolo, Olszowy i Kucwaj, 2022).



Rysunek 1.1 Hierarchia i zakres planów produkcji, źródło: (Pająk, Klimkiewicz i Kosieradzka, 2014)

Planowanie operacyjne charakteryzuje się najkrótszym okresem planistycznym, najczęściej do maksymalnie 3 miesięcy i polega na przydzielaniu zadań produkcyjnych do poszczególnych stanowisk roboczych, linii, gniazd produkcyjnych. Poza tym w przypadku planowania krótkoterminowego konieczne jest ustalenie kolejności wykonywania zadań, planowanie obsady pracowniczej, planowanie dostaw materiału do stanowiska, określenie terminów rozpoczęcia i zakończenia prac, a także analizowanie kosztów wytworzenia, czy planowanie kontroli jakości (Kraszewska, 2008).

1.1.3. Klasyczne metody planowania produkcji

Ważnym czynnikiem uwzględnianym w planowaniu jest sposób realizacji produkcji w kontekście dostarczania wyrobów do klientów. Wyróżnia się dwie strategie (Soman, Van Donk i Gaalman, 2006; Kędzia, 2022; Skołod, Szopa i Kalinowski, 2022):

- produkcję na zamówienie MTO (ang. *Make-To-Order*),
- produkcję na magazyn MTS (ang. *Make-To-Stock*).

Aby zminimalizować koszty magazynowania wyrobów gotowych wskazane jest wytwarzać produkty według strategii MTO. Stosowanie tej strategii do wszystkich wyrobów wytwarzanych w danym przedsiębiorstwie może jednak sprawiać, że niestabilny popyt klienta doprowadzi do okresowej destabilizacji produkcji (trudnej do opanowania zmienności), co wiąże się z długim czasem oczekiwania na dostawę wyrobów gotowych do klienta. Aby poradzić sobie z taką sytuacją wiele firm decyduje się na wprowadzenie swoich szybkrotujących, standardowych wyrobów na stan magazynowy, według strategii MTS. Wykonywanie niektórych produktów na zamówienie, a innych na magazyn jest

nazywane hybrydową strategią produkcji HPS (ang. *Hybrid Production Strategy*) (Soman, Van Donk i Gaalman, 2004; Danilczuk, Gola i Grzmar, 2022). W tej strategii zazwyczaj wyroby standardowe, szybkorotujące, najczęściej o niższej wartości, są produkowane na magazyn, natomiast wyroby niestandardowe/kastomizowane lub standardowe ale niskorotujące produkowane są według strategii MTO. Jak wskazuje (Soman, Van Donk i Gaalman, 2006) planowanie według HPS może odbywać się poprzez modyfikacje istniejących metod planowania dla produktów MTS, najczęściej produkcją wyrobów MTO w momencie wysokich stanów magazynowych wyrobów MTS. W literaturze sytuacja połączenia MTO i MTS jest szeroko opisana m.in. w pracach (Williams, 1984; Bemelmans, 1986; Li L. , 1992; Federgruen i Katalan, 1999; Adan i Van der Wal, 1998; Arreola-Risa i DeCroix, 1998; Nguyen, 1998; Carr i Duenyas, 2000) oraz w pracach (Soman, Van Donk i Gaalman, 2007; Beemsterboer, Land i Teunter, 2016; Bortolini, Calabrese i Galizia, 2023).

Przyjęcie strategii hybrydowej pociąga za sobą konieczność stosowania właściwych metod planowania produkcji. Z przeprowadzonych w przemyśle sondaży (Daniel i Guide Jr., 2000) wynika, że wiele firm działających wg strategii HPS stosuje również hybrydowe systemy zarządzania produkcją. Systemy te obejmują najczęściej metodę planowania zasobów przedsiębiorstwa ERP (ang. *Enterprise Resource Planning*) wraz z zaimplementowaną metodą planowania potrzeb materiałowych MRP (ang. *Material Requirements Planning*), w połączeniu z różnymi technikami lub strategiami sterowania produkcją, jak np. *Just in Time* (JiT) czy *Kanban*. Poza tym, w przedsiębiorstwach skupiających uwagę na wyrobach produkowanych na magazyn może być stosowane również hierarchiczne planowanie produkcją HPP (ang. *Hierarchical Production Planning*) (Żebrowski, Pawłowski i Piątkowski, 2006).

MRP zostało opracowane w latach 60 ubiegłego stulecia (Plossl, 1980; Hassoon, 2007). W swoim pierwotnym założeniu zostało opracowane w celu sterowania zapasami w przypadku produkcji wyrobów złożonych. Jednakże może być, i jest, stosowane także przez przedsiębiorstwa wytwarzające bardzo proste wyroby, włączając w to wyroby jednoczęściowe. Jest również stosowane z powodzeniem w przypadku produkcji seryjnej, gdzie przepływ każdego wyrobu jest podzielony na poszczególne etapy (Orlicky, 1976; Malindzakova, Garaj, Trpčevská i Malindzak, 2022).

MRP I jest metodą wspomagającą sterowanie zapasami oraz umożliwiającą tworzenie planów zaopatrzenia materiałów i surowców. Do jej funkcjonalności należy przede wszystkim określanie zapotrzebowania na materiał potrzebny do produkcji każdej pozycji asortymentowej na podstawie określonej wielkości produkcji i terminu dostawy wyrobu gotowego. Głównym celem metody jest zapewnienie odpowiedniej liczby materiałów do produkcji w odpowiednim czasie, a także utrzymanie jak najmniejszych zapasów. Najważniejszą zaletą MRP I jest możliwość aktywnego i dynamicznego określania potrzeb materiałowych i planowania ich zaspokojenia, a także dokładne wyznaczanie kosztów produkcji, czy kontrola poszczególnych etapów wytwarzania (Zięba i Ziółkowski, 2012).

Metoda MRP I może być jednak z powodzeniem stosowana do zarządzania produkcją w warunkach zmiennego zapotrzebowania, ponieważ (Murthy i Ma, 1991; Mula, Poler, García-Sabater i Lario, 2006):

- uwzględnia prognozę zapotrzebowania,
- uwzględnia zależności zachodzące w strukturze procesu produkcyjnego określonego wyrobu złożonego, na podstawie tej struktury możliwe jest planowanie potrzeb materiałowych elementów składowych wyrobu,
- dane wyjściowe mogą być dalej wykorzystywane do obliczenia i analizy obciążenia stanowisk roboczych.

W warunkach zmiennego popytu zużycie elementów wchodzących w skład różnych list materiałowych BOM (ang. *Bill of Materials*) jest planowane na podstawie rzeczywistych zamówień klientów lub prognozowanego popytu (Caridi i Cigolini, 2001). W konsekwencji rzeczywisty wzorec popytu może znacząco różnić się od zakładanego.

Wynikiem obliczeń w MRP I jest plan potrzeb materiałowych dla każdej komórki produkcyjnej. Niestety plan ten nie wskazuje, czy poziom obciążenia wynikający w planu nie przekracza dostępnych zdolności produkcyjnych. Aby było to możliwe MRP I ewoluowało do metody MRP II.

Metoda MRP II została opracowana przez APICS w 1989 roku i jest rozszerzeniem MRP I. Pozwala na koordynację sprzedaży, zakupów, produkcji i finansów poprzez wyodrębnienie trzech poziomów uszczegółowienia procesu planowania produkcji. Ostateczna wersja MRP II obejmuje następujące funkcjonalności (Klonowski, 2004):

- planowanie sprzedaży i produkcji,
- zarządzanie popytem,
- planowanie i zestawianie potrzeb materiałowych,
- sterowanie i monitorowanie produkcją, stanowiskami roboczymi i zleceniami,
- planowanie zdolności produkcyjnych,
- zakupy materiałowe,
- zarządzanie zasobami rozproszonymi,
- narzędzia pomocnicze i warsztatowe,
- pomiar wyników.

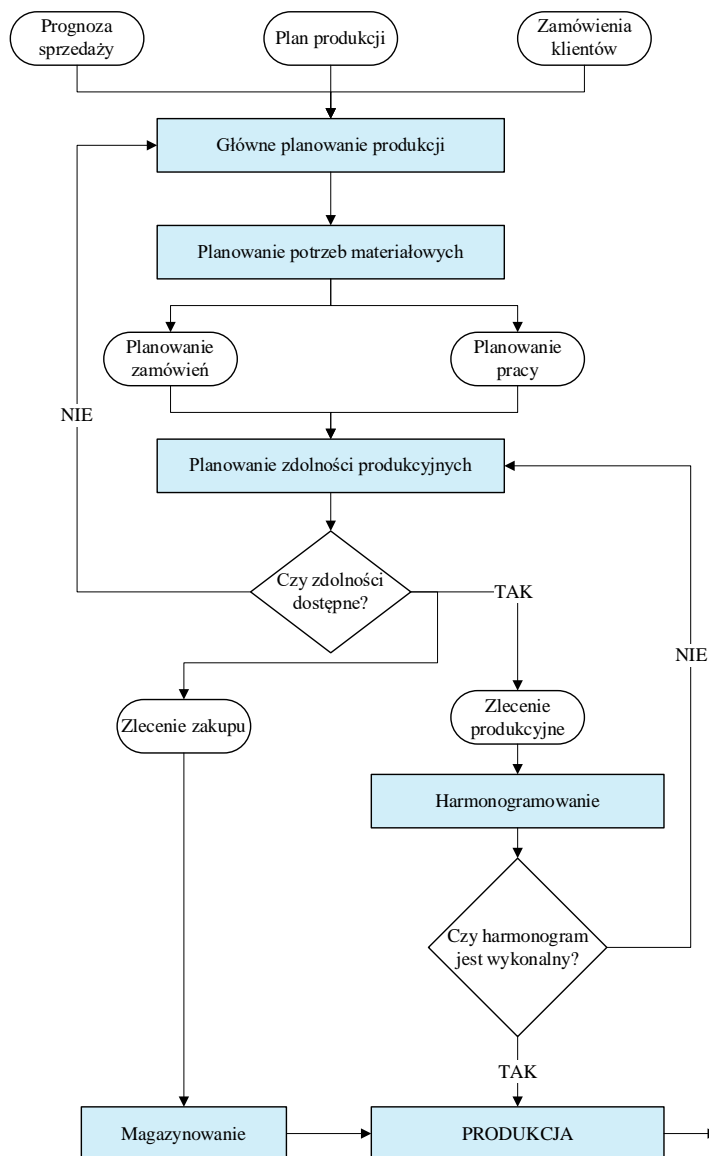
Celem tej metody jest zwiększenie elastyczności przedsiębiorstwa w zakresie szybkiego reagowania na zmieniający się popyt klienta przy równoczesnej redukcji poziomu zapasów. Przez to MRP II uważane jest za fundament fabryki przyszłości (Schönsleben, 2023).

Według (Greniewski, 1999; Wyrębek, 2011) MRP II może być stosowane we wszystkich czterech typach przedsiębiorstw:

- konstruujących wyroby na zamówienie ze standardowych modułów i części ETO (ang. *Engineer to Order*),
- produkujących na indywidualne zamówienie klienta (MTO),

- montujących wielowariantowe wyroby ze standardowych modułów i części ATO (ang. *Assembly to Order Products*),
- produkujących wyroby standardowe na magazyn (MTS).

Planowanie w MRP II realizowane jest na trzech poziomach: planowanie długoterminowe (strategiczne), planowanie średnioterminowe, czyli planowanie potrzeb materiałowych według MRP I w połączeniu z bilansowaniem zapotrzebowania ze zdolnościami produkcyjnymi CRP (ang. *Capacity Requirements Planning*) oraz planowanie krótkoterminowe, czyli planowanie zleceń produkcyjnych. Według MRP II wszystkie poziomy są zintegrowane ze sobą tworząc zamkniętą pętlę MRP (Riane, Artiba i Iassinovski, 2001) (rysunek 1.2).



Rysunek 1.2 Planowanie w metodzie MRP II, źródło: (Riane, Artiba i Iassinovski, 2001)

Hierarchiczne planowanie produkcji jest zagadnieniem szeroko opisanym w literaturze światowej – zarówno na poziomie teoretycznym jak i praktycznym (Axsater i Jonsson, 1984; Pienkosz i Toczyłowski, 1993; Venkataraman i Smith, 1996; Das, Richard,

Shah i Macchietto, 2000; Okuda, 2001). HPP ma zastosowanie w przedsiębiorstwach, które charakteryzują się (Gabbay, 1975):

- produkcją wyrobów o zbliżonych cechach użytkowych,
- ustaloną marszrutą technologiczną produkcji poszczególnych wyrobów,
- dostarczaniem wyrobów finalnych z magazynu,
- przewagą oferowanych wyrobów standardowych, nad tymi produkowanymi na zamówienie.

W przypadku HPP zwraca się uwagę przede wszystkim na jak najlepsze wykorzystanie zdolności produkcyjnych (Gahm, Uzunoglu, Wahl, Ganschietz i Tuma, 2022). W przygotowywaniu planu uwzględnia się w pierwszej kolejności posiadane zdolności, a dopiero później ograniczenia wynikające z zamówień klientów pomniejszone o zapasy wyrobów gotowych dostępnych już w magazynie. W dalszej kolejności uwzględnia się materiały do produkcji, a więc surowce, czy półwyroby (Gabbay, 1975; Mohanty i Singh, 1992). Ze względu na zbyt uproszczenie HPP w przypadku budowy jednego modelu optymalizacyjnego obejmującego zarówno planowanie jak i wyznaczanie harmonogramów, częściej stosuje się bardziej złożone modele dwu lub trzypoziomowe, które zawierają w sobie poziom planowania zagregowanego oraz planowanie potrzeb materiałowych (Venkateswaran, Son i Jones, 2004).

1.2. Harmonogramowanie produkcji

1.2.1. Wybrane zagadnienia dotyczące harmonogramowania produkcji

Harmonogramowanie produkcji jest rozumiane jako określanie wielkości partii produkcyjnych oraz sporządzanie szczegółowego planu wykonywania wyrobów w określonym czasie. (Geurtsen, Didden, Adan, Atan i Adan, 2023). Harmonogram jest to wykres lub opis poszczególnych operacji produkcyjnych, uwzględniający jednostki terminowania, w których te operacje będą wykonywane (Sobaszek, 2013). Często przedstawia się harmonogram na wykresie Gantta. Według (Graves, 1981) harmonogramowanie produkcji można zdefiniować jako alokację dostępnych zasobów produkcyjnych w czasie, tak, aby najlepiej spełnić pewien zestaw celów. Cele te to na przykład:

- unikanie opóźnień realizacji zleceń,
- maksymalne wykorzystanie zdolności produkcyjnych,
- minimalizacja zapasów międzyoperacyjnych, wyrobów gotowych, zapasów,
- skrócenie czasu realizacji zleceń.

Istnieje wiele metod wspierających planistów podczas szeregowania zadań produkcyjnych. Należą do nich (Buchalski, 2004; Tang i Wong, 2005; Knosala, 2002; Sobaszek, 2013; Jardzioch i Skobiej, 2013):

- metody poszukujące dokładnych rozwiązań problemów (przeszukiwanie zupełne, przeszukiwanie losowe, programowanie całkowitoliczbowe),
- metody metaheurystyczne,
- programowanie dyskretne,
- metody podziałów i ograniczeń,
- systemy ekspertowe,
- heurystyczne metody budowania harmonogramów (systemy dyspozytorskie, reguły priorytetów, algorytmy przeszukiwania sąsiedztwa),
- metody sztucznej inteligencji.

Metody te pozwalają w znaczącym stopniu na spełnienie przez harmonogram zakładanych celów, jednakże ich zastosowanie wiąże się z koniecznością posiadania odpowiednich narzędzi informatycznych. Ze względu na fakt, że w wielu przedsiębiorstwach, proces harmonogramowania nadal odbywa się bez zastosowania systemów informatycznych, konieczny staje się rozwój metod harmonogramowania, których zastosowanie tych systemów nie wymaga.

1.2.2. Metody harmonogramowania zadań w warunkach produkcji seryjnej

Granica między planowaniem a harmonogramowaniem nie jest ostra. Zasadne jest postrzeganie harmonogramowania jako określania wielkości partii produkcyjnej oraz szczegółowego planu czasowego jej przejścia przez proces produkcji. Przejście to nazywa się także przepływem.

W kontekście sposobu organizacji przepływu produkcji można wyróżnić trzy sytuacje (Strusevich, 2022):

- brak uporządkowania operacji (ang. *open-shop scheduling problem*),
- przepływ ukierunkowany (ang. *flow-shop scheduling problem*),
- przepływ nieukierunkowany, tzw. problem harmonogramowania zadań (ang. *general job-shop* lub *job-shop scheduling problem*).

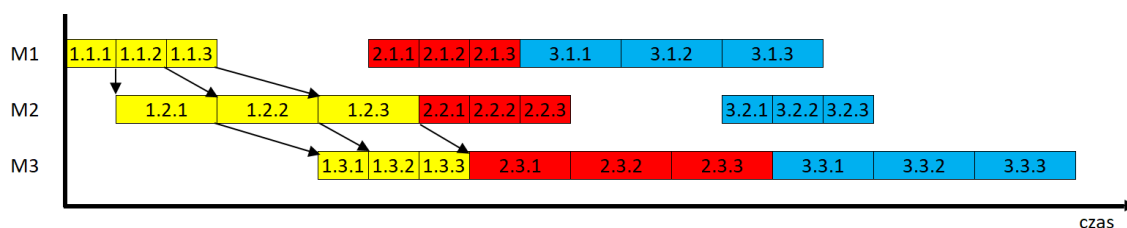
Harmonogramowanie przepływu *open-shop* jest przypadkiem najrzadziej opisywanym w literaturze. Cechuje je brak uporządkowania operacji oraz określonych relacji następstw, które zachodzą pomiędzy poszczególnymi operacjami procesu wytwarzania. Oznacza to, że operacje mogą być wykonane w dowolnej kolejności. Sytuacja ta występuje najczęściej przy różnych pracach modernizacyjnych, ale rzadko zdarza się występować w przedsiębiorstwach produkcyjnych (Louis i Xu, 1996; Pawlak, 1999; Muhamad i Deris, 2013; Strusevich, 2022), w związku z tym problem nie będzie szerzej opisywany w niniejszej pracy.

Harmonogramowanie procesów o przepływie *flow-shop* koncentruje się na przetwarzaniu danego zestawu zleceń, gdzie wszystkie operacje muszą być wykonane w określonej kolejności, na określonej liczbie maszyn, przy czym każda maszyna może jednocześnie wykonywać tylko jedną operację. Harmonogramowanie *flow-shop* zakłada

ciągłość zadań, tzn. że nie występują czasy oczekiwania między kolejnymi zadaniami. Harmonogramowanie *flow-shop* występuje np. w procesach produkcji chemicznej lub stali (Dudek, Panwalkar i Smith, 1992; Fink i Voß, 2003; Yeniseya i Yagmahan, 2014; Qin i inni, 2022).

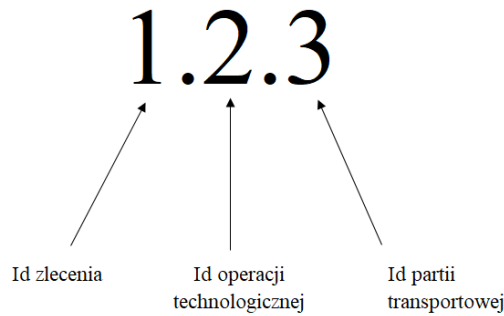
W literaturze opisano wyniki wielu badań naukowych oraz praktyk produkcyjnych związanych z harmonogramowaniem zadań w przypadku *flow-shop*. Problem harmonogramowania mający na celu zminimalizowanie całkowitego czasu przepływu starano się rozwiązać np. w pracy (Van Deman i Baker, 1974), gdzie przeprowadzono optymalizację dyskretną według algorytmu dokładnego *branch and bound* (pl. *podziel i ogranicz*) dla przedsiębiorstw, które nie mają problemów z miejscem do magazynowania. W pracy (Rajendran i Chaudhuri, 1990) badano problem planowania *flow-shop* z celem czasowym i przedstawiono prostą heurystykę konstrukcji z dwoma różnymi priorytetami. W pracy (Chen, Neppalli i Aljaber, 1996) opisano algorytm genetyczny wspomagający rozwiązanie problemu harmonogramowania, w tym przykład obliczeniowy. Teoretyczne aspekty problemów związanych z harmonogramowaniem *flow-shop* były badane m.in. przez autorów prac (Gupta, 1976; Van der Veen i Van Dal, 1991; Kalczyński i Kamburowski, 2007; Qian i inni, 2008; Vallada i Ruiz, 2010).

Harmonogram produkcji *flow-shop* najczęściej przybiera postać przepływu szeregowo-równoległego lub równoległego. Harmonogram szeregowo-równoległy charakteryzuje się przesyłaniem partii transportowych między kolejnymi maszynami, przy jednoczesnym zapewnieniu ciągłości produkcji. W tym cyklu występuje konieczność magazynowania międzyoperacyjnego partii transportowych. Przykład harmonogramu szeregowo-równoległego zaprezentowano na rysunku 1.3.



Rysunek 1.3 Przykład harmonogramu szeregowo-równoległego, opr. wł. na podstawie (Pająk, 2003)

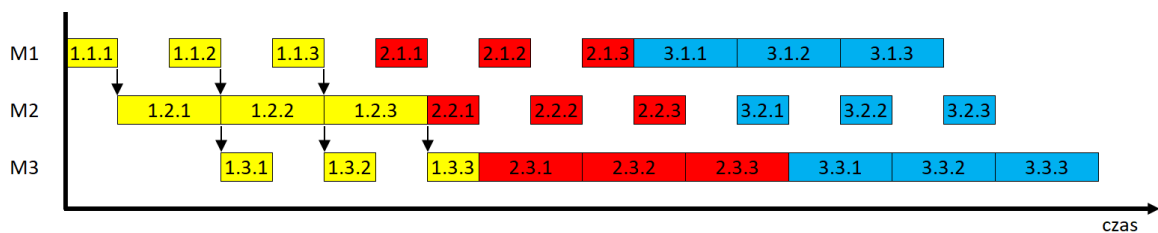
Na rysunku 1.3 kolory oznaczają zlecenia produkcyjne na wyroby. Kolor żółty to pierwsze zlecenie, czerwony drugie, a niebieski trzecie. Długość każdego prostokąta to czas produkcji, zależny od liczebności partii i czasu jednostkowego wykonania wyrobu t_j . Każde zlecenie podzielono na 3 partie transportowe, stąd w każdym kolorze (zleceniu) występują trzy prostokąty. Wprowadzono również oznaczenia, które wyjaśnia poniższa grafika (rysunek 1.4).



Rysunek 1.4 Oznaczenie zastosowane w harmonogramie, opracowanie własne

Równoległość tego cyklu polega na tym, że produkcja partii transportowych na kolejnych stanowiskach może odbywać się zanim zostanie zakończona operacja na wszystkich partiach transportowych tego zlecenia. Na przykład na rysunku 1.3, produkcja partii 1.2.1 rozpoczęła się zanim zakończyła się produkcja partii 1.1.2 oraz 1.1.3 na maszynie M1. Natomiast szeregowość tego cyklu polega na tym, że pomimo wykonywania równoległych operacji na różnych partiach, to zachowana jest ciągłość produkcji wszystkich partii transportowych danego zlecenia (tj. nie występują przerwy/przestoje między produkcją partii transportowych tego samego zlecenia).

Przepływ równoległy charakteryzuje się natomiast przerwami między realizacją kolejnych partii transportowych danego zlecenia produkcyjnego. Przykład harmonogramu równoległego zaprezentowano na rysunku 1.5.



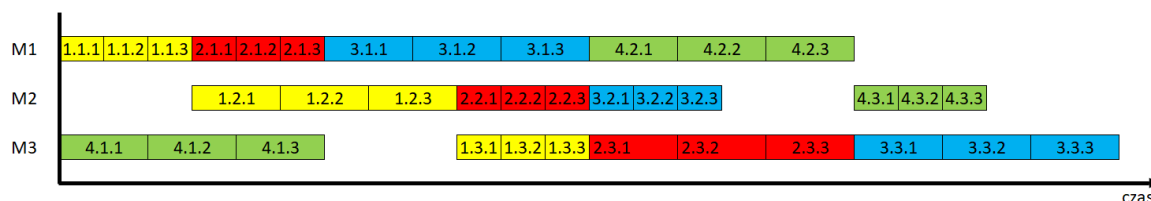
Rysunek 1.5 Przykład harmonogramu równoległego, opr. wł. na podstawie (Pająk, 2003)

Na powyższym wykresie zastosowano wcześniej wprowadzone oznaczenia.

Przepływ równoległy charakteryzuje się zachowaniem ciągłości produkcji pojedynczych partii wyrobów, bez konieczności magazynowania międzyoperacyjnego. W efekcie, w ramach danego zlecenia, występują przerwy między produkcją partii transportowych w ramach danego zlecenia.

Problem harmonogramowania procesów o przepływie *job-shop* występuje w systemach wytwórczych zadaniowych i jest szeroko opisany w literaturze. W harmonogramowaniu *job-shop* proces wytwarzania jest prowadzony na różnych maszynach, które wykonują operacje na różnych zleceniach produkcyjnych. Każde zlecenie, ma określoną kolejność wytwarzania na poszczególnych maszynach, tzn. zlecenie składa się z uporządkowanej listy operacji, z których każda jest określona przez odpowiednią maszynę i czas wytwarzania na niej (Błażewicz, Domschke i Pesch, 1996; Żebrowski, Pawłowski i Piątkowski, 2006; Gabbay, 1975; French, 1982; Ławrynowicz,

2006; Skołod, 2006; Pawlak, 1999). Harmonogram *job-shop* przybiera najczęściej postać przebiegu szeregowego co przedstawiono na rysunku 1.6.



Rysunek 1.6 Przykład harmonogramu szeregowego, opr. wł. na podstawie (Pająk, 2003)

Przebieg szeregowy charakteryzuje się ciągłością produkcji partii transportowych poszczególnych zleceń. Jednakże, w odróżnieniu od cyklu szeregowo-równoległego, produkcja partii na kolejnej operacji rozpoczyna się dopiero po zakończeniu poprzedniej operacji na ostatniej partii. Na przykładzie zlecenia 1 (żółtego), można zauważyć, że operacja druga jest wykonywana na partiach dopiero po zakończeniu operacji pierwszej na wszystkich wyrobach.

W niniejszej pracy skupiono się na analizie literatury związanej z *job-shop scheduling problem*, ponieważ taki problem harmonogramowania będzie występował w przypadku produkcji seryjnej.

Harmonogramy *job-shop* tworzone są dla warunków produkcyjnych opisanych ograniczeniami, które często ze względu na swój charakter uniemożliwiają wdrożenie proponowanych rozwiązań w praktyce produkcyjnej. Ograniczenia te zostały szczegółowo opisane w pozycji (French, 1982). Aby pokazać skalę problemu zostały wymienione poniżej.

1. Zadania w zleceniu produkcyjnym nie mogą być wykonywane równolegle. Ograniczenie to powoduje, że nie ma możliwości produkcji np. wyrobów złożonych, gdzie najpierw produkowane są części i podzespoły do następującego po nich montażu wyrobu gotowego.
2. Na jednej maszynie nie można wykonywać dwóch zadań równocześnie. Poza eliminacją możliwości realizacji procesów obróbki wsadowej (np. cieplnej), eliminowane jest również stosowanie nowoczesnych centrów obróbkowych, w których jest możliwość obróbki więcej niż jednego wyrobu w tym samym czasie.
3. Każde zlecenie posiada stałą liczbę operacji technologicznych. W praktyce produkcyjnej taka sytuacja właściwie nie występuje, lub występuje niezwykle rzadko.
4. Każde zlecenie musi być wykonane do końca. Założenie to jest spełnione w większości firm produkcyjnych, gdyż rzadko zdarza się, żeby anulować produkcję wyrobu podczas gdy produkcja została już uruchomiona.
5. Czas wykonania zadania jest niezależny od harmonogramu.
6. Dopuszczalne jest oczekiwanie zlecenia na zwolnienie maszyny, na której ma to zlecenie być wykonane.

7. Występuje tylko jedna maszyna danego typu. W praktyce produkcyjnej takie sytuacje zdarzają się niezwykle rzadko. Przeważnie przedsiębiorstwa posiadają wiele maszyn, nawet jednego typu.
8. Maszyny są dostępne przez cały czas realizacji zlecenia. W praktyce produkcyjnej nie zawsze maszyny są dostępne przez cały czas realizacji zlecenia, ponieważ mogą występować zarówno przerwy planowane (np. konserwacja maszyny), jak i nieplanowane (np. awaria).
9. Brak czynnika losowości, np. ustalone są liczba maszyn, zleceń czy czasy produkcji.
O ile liczba maszyn czy czasy produkcji wyrobów mogą być z góry ustalone, to w przypadku liczby zleceń bardzo często ta losowość w warunkach produkcyjnych występuje, chociażby w momencie pojawienia się pilnego, niezaplanowanego zlecenia.
10. Brak możliwości wariantowego zapisania technologii. Założenie niezgodne z rzeczywistością produkcyjną, ponieważ często istnieje możliwość stosowania alternatywnych marszrut technologicznych.

Niemniej jednak w literaturze można znaleźć badania, które próbują eliminować te ograniczenia. I tak na przykład:

- w pracy (Fattahi i Fallahi, 2010) podjęto próbę wyeliminowania ograniczenia zakładającego, że maszyny są dostępne w ciągu całego czasu realizacji zadań,
- w opracowaniach (Kis, 2003; Thomalla, 2001) przedstawione zostały rozwiązania eliminujące ograniczenie nr 10 o niemożliwości zastosowania alternatywnych marszrut technologicznych, nurt ten nazywany jest w literaturze *job-shop scheduling with alternative proces plans*,
- w pracach (Gutierrez i Garcia-Magarino, 2011; Li, Pan i Liang, 2010; Moslehi i M., 2011) podjęto próbę eliminacji ograniczenia zakładającego, że w systemie produkcyjnym występuje tylko jedna maszyna danego typu. Nurt ten nazywany jest w literaturze *flexible job-shop scheduling problem*,
- w opracowaniach (Mahdi Nasiri i Kianfa, 2011; Zeballos, Novas i G.P., 2011) przedstawiono rozwiązanie problemu nr 1 poprzez zastosowanie np. algorytmów genetycznych, czy programowania z ograniczeniami. Nurt ten nazywany jest w literaturze *stage shop scheduling problem*.

W przypadku harmonogramu job-shop aby partia wyrobów mogła przejść do kolejnego zadania, musi w całości zostać wykonana na poprzednim stanowisku. Oznacza to, że nie ma możliwości podziału zlecenia na mniejsze partie transportowe i tworzenie harmonogramu równoległego, czy szeregowo-równoległego, które pozwalają skrócić całkowity czas wykonywania zlecenia. Zatem harmonogramowanie *job-shop* umożliwia jedynie tworzenie harmonogramów szeregowych, natomiast zazwyczaj są one oparte na regułach priorytetu.

1.2.3. Reguły priorytetu

Reguła priorytetu jest funkcją, która każdej operacji, przyporządkowuje wskaźnik priorytetu i wybiera operację z minimalną lub maksymalną wartością tego wskaźnika, wskazując tym samym, że operacja ta ma zostać wykonana jako pierwsza (Wróblewski, 1993). Reguły priorytetu pozwalają na szeregowanie zleceń produkcyjnych, tak aby w jak największym stopniu spełnić założone kryteria, np. minimalizacji odchyłeń terminów zakończenia zleceń od terminów ustalonych.

Reguły priorytetu można podzielić ze względu na (Wróblewski, Krawczyński, Kosieradzka i Kasprzyk, 1984):

- zakres wykorzystywanych informacji o zadaniach znajdujących się w komórce produkcyjnej:
 - lokalne, są funkcjami tylko parametrów zadań oczekujących przed stanowiskami roboczymi,
 - ogólne, są funkcjami parametrów zadań będących w trakcie realizacji lub oczekujących przed stanowiskiem.
- możliwość zmiany wartości wskaźnika priorytetu w miarę upływu czasu oraz występujących zdarzeń:
 - statyczne, wskaźniki priorytetu są funkcją parametrów niezależnych od czasu,
 - dynamiczne, wskaźniki priorytetu są funkcją parametrów zależnych od czasu.
- złożoność funkcji wskaźnika priorytetu:
 - proste, funkcja jednego parametru operacji,
 - złożone, funkcja więcej niż jednego parametru operacji,
 - kombinowane, połączenie reguł prostych i złożonych,
 - heurystyczne, połączenie reguł prostych i złożonych oraz doświadczenia planistycznego.

Najczęściej w praktyce harmonogramowania produkcji są stosowane reguły priorytetu takie jak (Skołud, 2000; Wróblewski, 1993; Wróblewski, Krawczyński, Kosieradzka i Kasprzyk, 1984; Knosala, 2002; Błażewicz, Ecker, Pesch, Schmidt i Węglarz, 2001; Coffman, 1980; Sawik, 1992; Jardzioch i Skobiej, 2018):

- najkrótszy czas operacyjny – w harmonogramie ujmuje się najpierw zlecenie o najkrótszym czasie wykonania zadania,
- najdłuższy czas operacyjny – najpierw ujmuje się zlecenie o najdłuższym czasie wykonania zadania,
- najkrótszy czas przygotowawczo-zakończeniowy – jako pierwsze jest wykonywane zlecenie o najkrótszym czasie przygotowawczo-zakończeniowego,
- najwcześniejszy termin dyrektywnego wykonania zadania – zlecenia z wcześniejszym terminem realizacji wykonywane są jako pierwsze,
- najmniejsza pracochłonność zadania – w harmonogramie ujmuje się najpierw zlecenie o najmniejszej pracochłonności zadań,

- zasada FIFO (ang. First In First Out) – jako pierwsze w harmonogramie jest ujmowane zlecenie najwcześniejsze.

Do najważniejszych efektów osiąganych dzięki zastosowaniu reguł priorytetu należą (Wróblewski, 1993; Chlebus, 2000; Knosala, 2002; Senger, 1997):

- minimalizacja czasu cyklu wytwarzania C_{max} – reguła najkrótszego/najdłuższego czasu operacyjnego,
- minimalizacja odchyleń terminów zakończenia zadań od terminów ustalonych – reguła maksymalnej prędkości zadania,
- maksymalizacja wykorzystania zdolności produkcyjnych – reguła maksymalnej prędkości zadania,
- maksymalizacja zakresu prac na stanowiskach produkcyjnych – reguła minimalnego zapasu czasu wykonania operacji.

Warto w tym miejscu podkreślić, że powyżej wymienione efekty mogą się wzajemnie wykluczać. Dlatego ważne jest odpowiednie zdefiniowanie celów, które wybrana reguła priorytetu powinna spełniać.

1.3. Poziomowanie produkcji

1.3.1. Definicja poziomowania produkcji

Koncepcja poziomowanej produkcji jest znana od ponad 60 lat. Opracowana została w koncernie Toyota dla przemysłu motoryzacyjnego (Liker i Meier, 2011). Pierwsze wzmianki i studia przypadków pojawiły się już w latach 60. ubiegłego stulecia (Baumol, 1951; Beckman, 1961; Elmaleh i Eilon, 1974). Od samego początku poziomowanie odgrywa istotną rolę w strategii *Just in Time* oraz w *Lean Production* (Chase, 1993; Fujimoto, 1999; Hall, 1983; Hopp i Spearman, 1996; Monden, 1983; Schonberger, 1982; Womack, Jones i Roos, 1990). Dzisiaj poziomowanie produkcji jest stosowane zarówno w przedsiębiorstwach przemysłu motoryzacyjnego jak i w przemyśle przetwórczym i spożywczym (Korytkowski, Grimaud i Dolgiu, 2014; Powell, Alfnes i Semini, 2010; Van Staden i Du Plessis, 2012; Azevedoa i inni, 2019).

W literaturze można znaleźć różne definicje poziomowania produkcji. Wybrane z nich przedstawiono w tabeli 1.1.

Poziomowanie produkcji można zatem określić jako metodę sekwencjonowania produktów w celu eliminacji marnotrawstwa (szczególnie nadprodukcji) oraz minimalizacji różnic w obciążeniu stanowisk roboczych (Dennis, 2007; Liker, 2004).

Innymi słowy, poziomowanie produkcji jest sposobem planowania, polegającym na ustaleniu sekwencji oraz wielkości spływu wyrobów z procesu produkcji tak, aby popyt bieżący był realizowany z magazynu (przy utrzymaniu minimalnych zapasów wyrobów gotowych) i nie powodował nieprzewidywalnych zmian w planie produkcji (Rewers, Hamrol, Żywicki, Kulus i Bożek, 2017; Rewers, Osiński i Żywicki, 2019; Rewers i Diakun, 2021; Rewers, Czaja, Janczura i Diakun, 2021).

Tabela 1.1 Wybrane definicja poziomowania produkcji

Źródło literaturowe	Definicja
(Korytkowski, Wisniewski i Rymaszewski, 2013)	Koncepcja, która pomaga zapewnić stabilność procesu produkcyjnego, przekształcając niestabilny popyt klienta w równomierny i przewidywalny proces produkcyjny (sformułowanie odnoszące się do tzw. <i>heijunki</i>).
(Zandin, 2001)	Poziomowanie produkcji to proces, w którym na liniach produkcyjnych jednostki produktu są właściwie rozmieszczone, a nie wytwarzane w przypadkowej kolejności, aby minimalizować różnice w zużyciu części i nakładach pracy na stanowiskach roboczych.
(Matzka, Di Mascolo i Furmans, 2012)	Poziomowanie to słowo opisujące wysiłek związany z dopasowaniem obciążenia pracą do wydajności lub możliwości procesu, czyli do maszyn i operatorów.
(ElMaraghy i Deif, 2014)	Poziomowanie produkcji to strategia lean stosowana w celu eliminacji nadprodukcji. Produkcja poziomowana zapewnia równowagę wydajności i synchronizację wszystkich operacji produkcyjnych w czasie, w sposób precyzyjny i elastyczny dopasowuje się do zapotrzebowania klientów na wyroby.
(Průša i Schacherl, 2007)	Poprzez poziomowanie firma podejmuje próbę ustanowienia ustandaryzowanych procesów, płynnego wykorzystania linii produkcyjnej, lepszego wykorzystania pracowników i przejrzystości w harmonogramach produkcji i liczbie produktów. Poziomowanie przyczynia się do budowania planu dnia, którego celem jest płynne wykorzystanie wszystkich zasobów przedsiębiorstwa.
(Hüttmeir, Treville, Ackere, Monnier i Prenninger, 2009)	Założenie leżące u podstaw <i>heijunka</i> jest takie, że producent ma do zaakceptowania wybór dotyczący wielkości zmienności w sekwencji przybycia zleceń. Zamiast naiwnie akceptować wszystkie zlecenia, które pojawiają się w otrzymanym zamówieniu, producent może wybrać zamówienia, tak aby sekwencja zamówień widoczna podczas produkcji była względnie płynna.
(Singh i Kumar, 2021)	<i>Heijunka</i> pomaga w ograniczaniu nadprodukcji i realizacji produkcji według potrzeb klienta, co w efekcie pozwala na redukcję zapasów i stanowisk roboczych. Pomaga również w zwiększaniu wartości projektu.
(Cantora i Katok, 2012)	Poziomowanie produkcji jest definiowane jako spadek odchylenia standardowego zamówień w miarę przesuwania się w górę łańcucha dostaw.
(Van Landeghem i Johannes, 2022)	Mechanizm wyrównywania obciążenia (często poprzez regały z przegrodami) w celu wprowadzania zleceń do stanowiska roboczego.

1.3.2. Cele, wady i zalety poziomowania produkcji

Celem poziomowania jest równoważenie produkcji. Oznacza to, że poprzez opracowanie sekwencyjnego harmonogramu dąży się do niwelacji nagłych wzrostów liczby produkowanych wyrobów w momencie zwiększonego zapotrzebowania (Hüttmeir, Treville, Ackere, Monnier i Prenninger, 2009; Waters, 2001; Araujo i Queiroz, 2010; Warule, Chopade i Ulmek, 2019). Bez niwelacji ta fluktuacja prowadzi do strat w postaci przestojów maszyn, urządzeń czy pracowników (w przypadku niewykorzystanych zdolności produkcyjnych), lub problemów z jakością czy awariami (w przypadku przeciążenia systemu produkcyjnego) (Liker, 2004; Bohnen, Maschek i Deuse, 2011).

W poziomowaniu produkcji wyróżnić można również inne cele:

- minimalizowanie efektu tzw. byczego bicza (ang. *the bullwhip effect*), polegającego na braku możliwości dokładnego oszacowania popytu ze strony poszczególnych uczestników łańcucha dostaw przy wahaniami wielkości zamówień odbiorców końcowych (Lee, Padmanabhan i Whang, 1997; Smalley, Creating Level Pull, 2004; Slack, Chambers i Johnston, 2007),
- poprawę wydajności operacyjnej (Monden, 1993; Araujo, 2008; Araujo i Queiroz, 2010),
- równomierne obciążenie pracą zarówno w procesach produkcyjnych jak i logistycznych (Liker, 2004; Hüttmeir, Treville, Ackere, Monnier i Prenninger, 2009; Schürle, 2009),
- skrócenie czasu wykonywania zleceń (ang. *lead time*) (Coleman i Vaghefi, 1994; Rother, 2010),
- wygładzony przepływ w całym łańcuchu dostaw (Rother, 2010),
- eliminację skoków w produkcji (Andel, 1999),
- redukcję zapasów, co prowadzi również do zmniejszenia kosztów magazynowania (Yano i Rachamadugu, 1991; Digiesi, Facchini i Silvestri, 2022),
- maksymalizację efektywności zasobów produkcyjnych (Xiaobo, Zhou i Asres, 1996),
- zwiększanie konkurencyjności (Teece, Pisano i Shuen, 1997),
- stabilizację procesów produkcyjnych (Coleman i Vaghefi, 1994).

Przeanalizowane opracowania, dostępne w literaturze, dotyczące poziomowania produkcji odnoszą się w głównej mierze do procesu produkcyjnego, jego wskaźników czy mierników (jak efektywność zasobów).

Pomimo pozytywnych efektów, jakie można osiągnąć dzięki zastosowaniu poziomowania produkcji, jego implementacja nie jest równoznaczna z bezodpadową produkcją na zamówienie. Przeciwnie, skuteczne wdrażanie poziomowania często wymaga nieustannego kontrolowania zapasów wyrobów gotowych. W takim przypadku przyjmuje się określony stopień strat w zamian za niwelowanie skoków w całym strumieniu wartości (Bohnen, Maschek i Deuse, 2011). Każdy etap procesu musi być dobrze przemyślany i zbalansowany, aby poziomowanie przyniosło oczekiwane rezultaty (Babalska, 2013). Mówi się, że „poziomowanie dzieli wielkość i różnorodność produkcji na krótkie okresy” (Syska, 2006). W praktyce związane jest to z częstym przezbrajaniem maszyn, aby produkować różnorodny asortyment wyrobów w jak najmniejszych partiach (Syska, 2006).

Blanchard (Blanchard, 1983) badając empirycznie zjawisko poziomowania produkcji w przemyśle samochodowym odkrył, że zachowanie zapasów jest niestabilne, co powoduje, że zmienność produkcji jest większa niż zmienność sprzedaży. Także Blinder (Blinder, 1986), korzystając z miesięcznych, sezonowo dostosowanych danych stwierdził, że stosunek zmienności produkcji do zmienności dostaw mieści się w zakresie od 0,93 do 1,38, przy czym 17 z 20 branż ma współczynnik większy niż jeden. Stosunek odchyłeń produkcji i zamówień mniejszy niż jeden, silnie wspiera hipotezę poziomowania produkcji. Ghali (Ghali, 2003) wykazał, że dostosowanie sezonowe wpływa na wyniki poziomowania produkcji. Jego dane z procesów produkcji cementu portlandzkiego potwierdzają

wyrównanie produkcji tylko w produkcji wyrobów, które nie są korygowane sezonowo; po dostosowaniu sezonowym uzyskuje wyniki podobne do Blindera. Ghali i Dimelis (Dimelis i Ghali, 1994), korzystając z danych dla sześciu wysoce zdezagregowanych gałęzi przemysłu od 1950 do 1960, znajdują dowody na wygładzanie produkcji albo przy użyciu testu granic wariancji, albo szacując równanie w postaci zredukowanej. Sugerują, że niepowodzenie poprzednich modeli w wykrywaniu wygładzania produkcji jest spowodowane poziomem agregacji lub zastosowanym testem. Przytoczone powyżej argumenty przeciwko słuszności idei poziomowania produkcji zaczerpnięte są jednak z literatury ekonomicznej, gdzie model poziomowania produkcji opiera się na funkcji kosztów. Jeśli funkcje kosztów są wypukłe to w pewnych warunkach plany produkcyjne przedsiębiorstwa mogą wykazywać mniejszą zmienność niż zapotrzebowanie klienta. Wynika to z warunku pierwszego rzędu minimalizacji kosztów w horyzoncie planowania produkcji (Ghali, 2003). Niemniej jednak w pozycji Cachon i in. (Cachon, Randall i Schmidt, 2007) przedstawione zostały najnowsze dowody wspierające hipotezę poziomowania produkcji (Cantora i Katok, 2012).

Skuteczność poziomowania produkcji można sprawdzać wieloma miernikami, związanymi na przykład z wydajnością operacyjną (Andel, 1999; Araujo, 2008; Araujo i Queiroz, 2010), czasem realizacji zleceń (Coleman i Vaghefi, 1994; Rother, 2010), czy kosztami magazynowania (Yano i Rachamadugu, 1991). Mierniki mogą odnosić się do:

- jakości obsługi klienta,
- terminowości dostaw,
- elastyczności produkcji,
- obciążenia pracą pracowników lub stanowisk roboczych.

1.3.3. Metodyki implementacji poziomowania produkcji

W literaturze przedmiotu można znaleźć opisy oraz wyniki badań dotyczących sposobów implementacji poziomowanej produkcji w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Metodyki różnią się między sobą podejściem do formułowania założeń, stopniem skomplikowania obliczeń oraz realną możliwością implementacji metodyki w warunkach rzeczywistych. Można tutaj wyróżnić podejścia analityczne oraz intuicyjne. Do pierwszej grupy należą przede wszystkim modele poziomowania produkcji stosowane przez ekonomistów oraz metodyka Bohnena (Buhl, Bohnen, Deuse i Schneider, 2009; Bohnen, Maschek i Deuse, 2011) opierająca się na tworzeniu matematycznego wzoru poziomowania. Do drugiej grupy zaliczyć można metodyki oparte na doświadczeniach przemysłowych i są to np. metodyki wg Araujo (Araujo i Queiroz, 2010) oraz Likera (Liker i Meier, 2011).

Jednym z pierwszych modeli poziomowania produkcji stosowanych przez ekonomistów jest model wg Modigliani i Hohn (Modigliani i Hohn, 1955), który zakłada realizowanie zamówień klientów z zastosowaniem sterowania zapasami wyrobów gotowych. W modelu tym decyzje opierają się na kryterium kosztów zapasów.

Model wg Modigliani i Hohn na przestrzeni lat był modyfikowany, udoskonalany i analizowany m.in. przez (Blinder, 1986; Fair, 1989; Blinder i Maccini, 1991; Ramey, 1991; Gorman i Brannon, 2000; Synáková, 2017). Ponowna analiza modelu w wielu przypadkach kończyła się zaprzeczeniem jego słuszności. Jednakże (Miron i Zeldes, 1988; Fair, 1989; Krane i Braun, 1991; Gorman i Brannon, 2000) sugerują, że przyczyną niepowodzenia w stosowaniu modelu może być problem ze stosowanymi w nim danymi. Niemniej jednak wnioski płynące z modelu ekonomistów są proste: jeśli funkcje kosztów są wypukłe, w pewnych warunkach plany produkcyjne przedsiębiorstwa mogą wykazywać mniejszą zmienność niż sprzedaż firmy. Mimo wszystko model stosowany przez ekonomistów dalej jest rozwijany, co sugerują najnowsze pozycje literaturowe (Kumar i Aouam, 2019; Kamhuber, Sobottka, Heinzl, Henjes i Sihn, 2020; Bohnen, Maschek i Deuse, 2011). Niestety z punktu widzenia rzeczywistości produkcyjnej modele stosowane przez ekonomistów nie sprawdzają się. Służą one głównie wyznaczaniu i wskazywaniu relacji między kosztami (głównie zapasów) a planem produkcji.

Procedurę implementacji poziomowanej produkcji dla produkcji ze strategią *Just in Time* z wielowariantowymi wyrobami, gdzie końcowym etapem produkcji jest zsynchronizowana linia montażowa opisał w swoich pracach Bohnen (Buhl, Bohnen, Deuse i Schneider, 2009; Bohnen, Maschek i Deuse, 2011). Procedura rozpoczyna się od sporządzenia i analizy mapy strumienia wartości oraz, w razie potrzeby, analizy popytu. Drugi etap to podział produktów na rodziny. Podział ten zależy od podobieństwa procesów technologicznych lub konstrukcji wyrobów. Trzeci etap to utworzenie wzoru poziomowania. Obrazuje on częstość wytwarzania wyrobów w ramach ustalonego harmonogramu w określonej podziale czasowej. W ostatnim etapie zakłada się uruchomienie wcześniej utworzonego wzoru produkcji poziomowanej oraz ciągłe jej doskonalenie. W tym przypadku jako doskonalenie rozumie się zawężanie rodzin wyrobów aż do momentu kiedy będzie się tworzyć harmonogram dla pojedynczych sztuk wyrobów. Podejście Mondena zostało rozwinięte przez Miltenburg i Sinnamon (Miltenburg i Sinnamon, 1989; Miltenburg i Sinnamon, 1992; Miltenburg i Sinnamon, 1995), którzy rozważali poziomowanie zarówno tempa produkcji wyrobu gotowego, jak i tempa produkcji podzespołów. Przedstawiona metodyka reprezentuje podejście analityczne do tematu implementacji poziomowania produkcji. Niestety nie ma dowodów na stosowanie tej metodyki w praktyce. Być może przyczyną są rozbudowane obliczenia matematyczne oraz tworzenie matematycznego wzoru poziomowania.

Jednym z niewielu dokładnie opisanych przykładów wdrożenia poziomowanej produkcji dostępnych w literaturze opisany został w pracy Araujo (Araujo i Queiroz, 2010). Wdrożenie obejmuje dwa etapy: priorytetyzację produktu, czyli wybór produktów najczęściej kupowanych przez klienta, oraz utworzenie poziomowanego planu produkcji. Autorzy wykazali również, że w wyniku podjętych działań średnie miesięczne zapasy zmniejszyły się o 23%, średnia wielkość partii produkcyjnej zmniejszyła się o 18%, co w efekcie spowodowało wzrost miesięcznej produkcji o 10%.

Metodykę wdrażania poziomowanej produkcji przy dużym zróżnicowaniu wyrobów przedstawili Liker i Meier (Liker i Meier, 2011). Autorzy swoją metodę określają jako *tnij*

i szatkuj i zawiera ona takie etapy jak: podział produktów na rodziny wyrobów o wspólnych cechach i krokach produkcji, ustalenie harmonogramu, uruchomienie produkcji.

Podejścia Araujo oraz Likera i Meiera ukazują metodyki reprezentujące podejście intuicyjne. W literaturze nie znaleziono dowodów na stosowanie tych metodyk w praktyce. Prawdopodobną przyczyną jest zbyt ogólne podejście, które uniemożliwia rzeczywiste wdrożenie zaprezentowanych metodyk poziomowania w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

W wielu przedsiębiorstwach produkcyjnych poziomowania produkcji dokonuje się bez stosowania specjalnych metodyk, a metodą „*prób i błędów*”. W pracy (Koide i Iwata, 2007) opisany został przykład wdrożenia poziomowania w przedsiębiorstwie wytwarzającym wyroby w dużych partiach produkcyjnych na dwóch liniach produkcyjnych. W pierwszej kolejności skupiono się na modyfikacjach linii produkcyjnych, tak aby umożliwić przepływ jednej sztuki. Wprowadzono standaryzację narzędzi, zaprojektowano specjalne skrzynki narzędziowe, wykonano balansowanie linii. Wszystkie te aktywności spowodowały wyrównanie taktów produkcji wszystkich wyrobów (wyroby A, B, C), dzięki czemu możliwy stał się przepływ jednej sztuki. W drugiej kolejności zajęto się określeniem miksu produkcyjnego. Na obu liniach wprowadzono produkcję miksu produkcyjnego: na jednej linii ABCABC... oraz na drugiej linii CBACBA... Osiągnięto następujące rezultaty: zmniejszenie zapasów w toku o 86%, skrócenie *lead time* o 45% oraz wzrost produktywności o 300%.

1.4. Narzędzia poziomowania produkcji

Przedstawione w kolejnych punktach 1.4.1 do 1.4.4 narzędzia zastosowane zostaną w metodyce poziomowania produkcji, proponowanej i opisanej w niniejszej rozprawie.

1.4.1. Analiza ABC/XYZ

Analiza ABC jest wykorzystywana w porządkowaniu i szeregowaniu pozycji asortymentowych wchodzących w skład zapasów. Kryterium porządkowania wyrobów mogą być m.in. wielkość zapotrzebowania, produkcji, czy sprzedaży, wyrażone w różnych jednostkach. Odnosi się do metody Pareto, którą opracował włoski ekonomista Pareto (Burnett, 2002). Analiza ABC opiera się na zasadzie, którą sformułował amerykański teoretyk zarządzania Juran, mówiąca, że 20% badanych obiektów jest związanych z 80% pewnych zasobów (Lysons, 2004).

Analiza ABC dzieli asortyment produktów na trzy kategorie: A, B oraz C. W klasycznym ujęciu poszczególne kategorie obejmują (Krzyżaniak i Cyplik, 2007):

- kategoria A – 20% wszystkich wyrobów, które stanowią 80% wartości kryterialnej,
- kategoria B – 30% wszystkich wyrobów, które stanowią 15% wartości kryterialnej,
- kategoria C – pozostałe 50% wyrobów, które stanowią 5% wartości kryterialnej.

Według innej klasyfikacji kategorie w analizie ABC obejmują (Szymański, 2007):

- kategoria A – 10% wszystkich wyrobów, które stanowią 70% wartości kryterialnej,
- kategoria B – 20% wszystkich wyrobów, które stanowią 20% wartości kryterialnej,
- kategoria C – pozostałe 70% wyrobów, które stanowią 10% wartości kryterialnej.

W odniesieniu do zarządzania zapasami, z którego wywodzi się analiza ABC, w grupie A znajdują się wyroby o dużej wartości, mające zasadniczy wpływ na wielkość sprzedaży, płynność produkcji lub sytuację finansową przedsiębiorstwa. W grupie B znajdują się elementy średniej wartości, stanowiące około 30% wszystkich wyrobów. Grupa C natomiast, jest grupą najliczniejszą, w której znajdują się elementy o najniższej wartości (Kaczorowska, Staniec i Szczygieł, 2019).

Analiza ABC ma szerokie zastosowanie w wielu elementach zarządzania przedsiębiorstwem, jak na przykład (Wan Lung, 2007; Grondys, 2009; Ziółkowski i Łada, 2014; Handanhal i Misra, 2014):

- kontrola zużycia/sprzedaży/zakupów materiałów/wyrobów/surowców,
- sterowanie procesami,
- zarządzanie jakością,
- obsługa eksploatacyjna,
- redukcja różnorodności oferowanych wyrobów.

W praktyce, analiza ABC wykonywana jest w połączeniu z analizą XYZ, w której podstawowym kryterium jest częstość lub regularność zapotrzebowania, np. wielkość zużycia materiałów, regularność sprzedaży, itd. Analiza XYZ dzieli asortyment na trzy kategorie (Buliński, Waszkiewicz i Buraczewski, 2013; Aktunc, Basaran, Ari, Irican i M., 2019):

- kategoria X – wyroby o stałym i regularnym zapotrzebowaniu, które wymagają dokładnego planowania i terminowej dostawy,
- kategoria Y – wyroby o zapotrzebowaniu zmiennym, najczęściej sezonowym,
- kategoria Z – wyroby o zapotrzebowaniu nieregularnym i nieciągłym, które charakteryzują się niską dokładnością prognoz.

W analizie XYZ często za kryterium podziału przyjmuje się współczynnik zmienności V , lub inaczej, błąd prognozy (Staniec i Stajuda, 2012). Współczynnik ten przyjmuje wzór:

$$V = \frac{\sigma_x}{\bar{X}_x} \quad (1)$$

gdzie:

- σ_x – odchylenie standardowe cechy,
- \bar{X}_x – wartość średnia cechy.

W literaturze można znaleźć wiele podziałów granic współczynnika zmienności (Šaderová i Marasová, 2015; Kumar i inni, 2017; Zenkova, Musoni i Tarima, 2020). W praktyce najczęściej przyjmuje się wartości podane w tabeli 1.2.

Tabela 1.2 Wartości współczynnika zmienności dla klasyfikacji XYZ, źródło: (Staniec i Stajuda, 2012)

Kategoria	Współczynnik zmienności
X	0 – 0,5
Y	0,51 – 0,9
Z	> 0,91

W wyniku przeprowadzenia analizy ABC oraz XYZ powstaje macierz o wymiarach 3x3, która dzieli cały asortyment produkcji na 9 grup, od grupy AX (wyroby najczęściej sprzedawane i o największej wartości), do CZ (wyroby rzadko sprzedawane, o niewielkiej wartości). Szczegółowy opis grup przedstawiono w tabeli 1.3.

Tabela 1.3 Podział grup asortymentowych, źródło: (Krzyżaniak, 2008)

Kategoria	A	B	C
X	Wysoka wartość sprzedaży, duża dokładność prognozy popytu	Średnia wartość sprzedaży, duża dokładność prognozy popytu	Niska wartość sprzedaży, duża dokładność prognozy popytu
Y	Wysoka wartość sprzedaży, średnia dokładność prognozy popytu	Średnia wartość sprzedaży, średnia dokładność prognozy popytu	Niska wartość sprzedaży, średnia dokładność prognozy popytu
Z	Wysoka wartość sprzedaży, brak dokładności prognozy popytu	Średnia wartość sprzedaży, brak dokładności prognozy popytu	Niska wartość sprzedaży, brak dokładności prognozy popytu

Wadami klasyfikacji ABC/XYZ jest z pewnością statyczność oraz brak możliwości uwzględniania czynników zewnętrznych, jak zmiany zachodzące na rynku. Jednakże niewątpliwą zaletą jest prostota w użyciu oraz uniwersalność, przez co analiza, choć prosta, znajduje szerokie zastosowanie w rzeczywistości produkcyjnej.

1.4.2. Macierz i wskaźnik podobieństwa technologicznego wyrobów

Wskazywanie podobieństwa technologicznego wyrobów jest szeroko stosowane w praktyce produkcyjnej, m.in. w przypadku wydzielenia strumieni wartości i przypisywania do nich wyrobów, budowy dedykowanych linii produkcyjnych, wydzielenia grup wyrobów lub gniazd czy też podczas mapowania strumienia wartości. Stopień podobieństwa wyrobów względem siebie określa się wskazując i porównując ich trasy technologiczne (proces technologiczny). W tym celu tworzy się macierz, w której w wierszach tabeli znajdują się produkowane wyroby, natomiast w kolumnach stanowiska robocze lub jednorodne grupy stanowisk (komórki produkcyjne 0 lub 1 stopnia). Zawartość samej tabeli jest binarna: wartość 1 oznacza, że dany wyrób jest wytwarzany na danym stanowisku, natomiast wartość 0 oznacza, że dany wyrób nie jest wytwarzany na danym stanowisku (Kusiak i Cho, 1992; Domański i Hadaś, 2008). Przykład macierzy obrazuje rysunek 1.7.

Stanowiska/ Wyroby	1	2	3	4	5	6
A	1	1	1	1	0	0
B	1	1	1	1	0	0
...						
F	1	1	0	0	1	1
G	1	1	1	1	0	0
H	0	1	1	0	1	1
...						
L	1	1	1	1	0	0
M	1	1	0	0	1	1
N	1	1	0	0	1	1
...						
Z	0	1	1	0	1	1

Rysunek 1.7 Przykład macierzy podobieństwa technologicznego wyrobów, opr. wł.

Podobieństwo technologiczne wyrobów względem siebie określane jest za pomocą wzoru (Mazurczak, 2002; Domański i Hadaś, 2008):

$$\alpha_{i,k} = \frac{\sum_{j=1}^{j=r_r} X_{i,j} \cdot X_{k,j}}{\min \left(\sum_{j=1}^{j=r_r} X_{i,j} ; \sum_{j=1}^{j=r_r} X_{k,j} \right)} \quad (2)$$

gdzie:

$i, k = 1, 2, \dots, a$ – identyfikator pozycji,

$j = 1, 2, \dots, r_r$ – identyfikator jednorodnej grupy stanowisk roboczych,

a – liczba asortymentu,

r_r – liczba jednorodnych grup stanowisk roboczych,

$X_{i,j}, X_{k,j}$ – elementy macierzy procesów technologicznych,

$X_{i,j} = 0$ gdy $m_{i,j} = 0$

$X_{i,j} = 1$ gdy $m_{i,j} \geq 1$

$m_{i,j}$ – liczba operacji technologicznych wykonywanych na i -tym wyrobie na j -tym stanowisku.

Obliczanie wskaźnika podobieństwa technologicznego odbywa się poprzez porównanie ze sobą poszczególnych wyrobów (wg procedury iteracyjnej, porównuje się wyrób A z B, A z C, B z C, itd.) oraz obliczenia wartości wskaźnika. Uzyskany w ten sposób wynik mieści się w przedziale $\langle 0, 1 \rangle$. Wynik „0” oznacza, że porównywane wyroby nie wykazują żadnego podobieństwa technologicznego, a więc nie dzielą między sobą żadnego stanowiska. Wynik „1” oznacza całkowite podobieństwo technologiczne porównywanych wyrobów. Liczba z zakresu $(0, 1)$ wskazuje na pewne różnice technologiczne porównywanych wyrobów. Im bliżej wartości „1” tym podobieństwo wyrobów jest większe. Jak wskazuje literatura (Domański i Hadaś, 2008), wartość wskaźnika powyżej 0,8 sugeruje duże podobieństwo technologiczne wyrobów, natomiast

poniżej 0,5 sugeruje niewielkie podobieństwo technologiczne i nie jest wtedy zalecane tworzenie rodziny wyrobów.

1.4.3. Wskaźnik EPEI

Wskaźnik EPEX (ang. *Every Part Every X*) służy w głównej mierze do określania elastyczności procesu, czyli grupy identycznych maszyn o identycznych zadaniach technologicznych. Wskaźnik EPEI (ang. *Every Part Every Interval*) natomiast odnosi się do kalkulacji elastyczności dla pojedynczego stanowiska produkcyjnego (Mazurczak, 2002; Zwolińska i Zaręba, 2018). Aby określić wartość wskaźnika EPEI należy wykonać szereg obliczeń i analiz.

Pierwszym etapem wyznaczania wartości wskaźnika EPEI jest określenie parametrów pracy każdego stanowiska (Zwolińska, 2017), a więc: średniego zapotrzebowania na wyroby, czasu cyklu każdego z nich, czasu pracy, liczby dni roboczych w tygodniu, liczby zmian, czasu przerw w dniu roboczym. Następnie określony zostaje nominalny dostępny czas pracy (*NDC*) oraz efektywny czas pracy (*EDC*). Nominalny dostępny czas pracy określa się wzorem:

$$NDC = (t_p - t_{zp}) * LZ \quad (3)$$

gdzie:

NDC – nominalny dostępny czas pracy,

t_p – czas pracy na zmianę roboczą,

t_{zp} – czas przerw na zmianę roboczą,

LZ – liczba zmian w ciągu dnia roboczego.

Efektywny czas pracy określany jest natomiast wzorem:

$$EDC = NDC * OEE \quad (4)$$

gdzie:

EDC – efektywny czas pracy,

OEE – wskaźnik efektywności wyposażenia.

Kolejnym etapem analizy jest wyznaczenie wartości *MPL*, czyli możliwej liczby przebrojeń danej rodziny wyrobów w przyjętym okresie czasu. W pierwszej kolejności obliczyć wartość dostępnego czasu na przebrojenia dla określonej rodziny wyrobów według wzoru:

$$t_{C/O}^x = EDC - \sum_{i=1}^{n_x} OP_i \quad (5)$$

gdzie:

t_{C/O}^x – dostępny czas na przebrojenia dla określonej rodziny wyrobów,

OP_i – czas produkcji rodziny wyrobów,

n_x – maksymalna liczba wyrobów gotowych rodziny wyrobów, x to indeks rodziny wyrobów.

Następnie, na podstawie danych produkcyjnych ustala się średni czas przebrojenia dla rodziny wyrobów oraz możliwą liczbę przebrojeń w ramach produkcji danej rodziny wyrobów:

$$MPL_x = \frac{t_{C/O}^x}{t_{C/O}^x} \quad (6)$$

gdzie:

$\overline{t_{C/O}^x}$ = średni czas przebrojenia dla rodziny wyrobów,

MPL_x – możliwa liczba przebrojeń danej rodziny wyrobów.

Ostatecznie wskaźnik EPEI przyjmuje postać (Czerska, 2009; Chabowski i Rewers, 2015):

$$EPEI = \frac{LPA_x}{MPL_x} \quad (7)$$

gdzie:

LPA_x – liczba pozycji asortymentowych danej rodziny wyrobów.

W przypadku produkcji poziomowanej wskaźnik EPEI może obrazować również częstość wytwarzania wyrobów w ramach ustalonego harmonogramu w określonej podziale czasowej, a więc pozwala wstępnie określić, co jaki czas może zostać powtórzona sekwencja produkcji poszczególnych wyrobów.

1.4.4. Wielkość zapasów w supermarkecie

Supermarket, to w rozumieniu inżynierii produkcji, miejsce między dwoma procesami lub stanowiskami, w którym przechowywana jest standardowa ilość zapasów w celu zapewnienia ciągłości procesu (Hänggi, Fimpel i Siegenthaler, 2022). Jednostki w supermarkecie powinny mieć przypisane swoje miejsce, a przy ich pobieraniu powinna być zachowana kolejka FIFO. Powinien też być określony maksymalny oraz minimalny poziom wielkości zapasów.

W supermarkecie można wyróżnić trzy rodzaje zapasów (Kovács, 2012):

- zapas rotujący do pokrycia normalnego zapotrzebowania klienta,
- zapas buforowy do pokrycia zmienności w zapotrzebowaniu klienta,
- zapas bezpieczeństwa do pokrycia strat wewnętrznych.

Zapasy całkowite w supermarkecie jest sumą zapasu rotującego, buforowego i bezpieczeństwa. Wzór na obliczenie zapasu rotującego jest następujący:

$$\text{Zapasy rotujący} = \text{cykl odnawiania zapasu} * \text{liczba zamówień w cyklu odnawiania zapasu} * \text{wielkość średniego zamówienia} \quad (8)$$

lub

$$\text{Zapas rotujący} = \text{średni popyt} * \text{czas uzupełnienia} \quad (9)$$

Jak można zauważyć na powyższych wzorach, kluczową determinantą poziomu zapasu rotującego jest cykl dostaw (lub inaczej czas uzupełnienia wyrobów w supermarkecie) oraz wielkość zamówień.

Zapas buforowy związany jest z wartością zapasu rotującego i współczynnikiem zmienności zapotrzebowania. Zakłada się, że zapotrzebowanie klienta nie jest w 100% przewidywalne i ulega zmianom w czasie. Zapas ten określa się wzorem:

$$\text{Zapas buforowy} = \text{współczynnik zmienności} * \text{zapas rotujący} \quad (10)$$

Współczynnik zmienności popytu związany jest ze stopniem przewidywalności popytu oraz zakresem zmienności zapotrzebowania na wyroby.

Zapas bezpieczeństwa związany jest z zapasem rotującym i buforowym oraz współczynnikiem bezpieczeństwa. Zapas bezpieczeństwa ma za zadanie chronić przedsiębiorstwo przed opóźnieniami w dostawach materiałów. Współczynnik ten zależy od wielu czynników, np.: poziomu wyrobów niezgodnych, częstości awarii. Zapas bezpieczeństwa można obliczyć ze wzoru:

$$\text{Zapas bezpieczeństwa} = \text{współczynnik bezpieczeństwa} * (\text{zapas rotujący} + \text{buforowy}) \quad (11)$$

W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele innych wzorów oraz interpretacji poszczególnych składowych zapasu w supermarkecie (Smalley, 2004; Rewers, Hamrol, Żywicki, Kulus i Bożek, 2017). Różnią się one jednak nieznacznie od podanych wzorów powyżej. Najczęściej przyczyną różnic jest chęć dostosowania podstawowych wzorów do rzeczywistej sytuacji w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

1.5. Wnioski z analizy literatury

Najczęściej stosowane metody planowania produkcji w warunkach produkcyjnych, są związane z systemami informatycznymi klasy MRP (DSR Solution, 2016). Systemy MRP są również fundamentem systemów klasy APS, które w obecnych czasach stają się coraz bardziej powszechne. Zasadniczym celem systemów tej klasy jest zautomatyzowanie pracy w zakresie planowania w systemie ERP (Jardzioch, Kalinowski i Kłós, 2023).

W wielu przedsiębiorstwach produkcyjnych systemy klasy MRP oraz APS nie sprawdzają się. Przyczyn można upatrywać w specyficznych uwarunkowaniach tych systemów. Ich prawidłowe działanie uzależnione jest m.in. od koordynacji wszystkich poziomów planowania, od planowania długo do krótkoterminowego i stopnia szczegółowości i poprawności danych zawartych w systemie. W przypadku wielu przedsiębiorstw produkcyjnych, dane, na których bazuje planowanie produkcji w dużej mierze nie są zbieżne z danymi posiadanymi w systemach ERP, a wynikają przede wszystkim z doświadczeń planistów i ich rzeczywistej znajomości procesów produkcyjnych. Poza tym w wielu przypadkach wdrożenie systemów klasy APS jest

niemożliwe ze względu na znaczące koszty wdrożeń oraz późniejszej obsługi systemu, do której potrzeba specjalnie przeszkolonych specjalistów (PSI Polska, 2016).

W związku z powyższym wiele przedsiębiorstw produkcyjnych nie decyduje się automatyzować procesu planowania produkcji, pozostając tym samym przy planowaniu ręcznym, wykonywanym fizycznie przez planistów. Wielu z nich, w zależności od charakteru produkcji, korzysta ze znanych metod harmonogramowania, jak metoda szeregową czy równoległą oraz z reguł priorytetów, pozwalających na szeregowanie zadań produkcyjnych w zależności od przyjętego kryterium. W przypadku produkcji seryjnej najczęściej stosuje się harmonogramowanie *job-shop*, gdzie każde zlecenie posiada określoną kolejność wytwarzania na poszczególnych maszynach (Skołud, 2006). Jak opisano w rozdziale dotyczącym metod harmonogramowania, harmonogramowanie *job-shop* posiada wiele ograniczeń, które często uniemożliwiają wdrożenie proponowanych rozwiązań w rzeczywistości produkcyjnej. Jednym z najbardziej złożonych problemów, jest niemożność wykonywania zadań w zleceniu produkcyjnym w sposób równoległy. Oznacza to, że produkcja wyrobów złożonych, gdzie najpierw produkowane są części i podzespoły do następującego po nich montażu wyrobu gotowego nie mogą być produkowane według nurtu *job-shop scheduling*. Natomiast w praktyce produkcyjnej wiele wyrobów seryjnych to właśnie wyroby złożone. Wychodząc jednak naprzeciw rzeczywistym problemom przedsiębiorstw produkujących wyroby w sposób seryjny, badacze i praktycy podejmują próby eliminacji tych ograniczeń (Xiong, Shi, Ren i Hu, 2022). Dzięki temu wiele z tych ograniczeń zostało zniwelowanych, jak na przykład ograniczenie opisane wyżej, a nurt harmonogramowania *job-shop* coraz bardziej jest możliwy do zastosowania w praktyce produkcyjnej.

Niemniej jednak dzisiejsza gospodarka rynkowa, duża konkurencja i coraz większe wymagania docelowych klientów, którzy oczekują wyrobów zindywidualizowanych (czyli kastomizowanych) wymaga stosowania coraz to nowych zasad w obrębie planowania produkcji. Wiele przedsiębiorstw produkujących standardowe wyroby seryjnie na magazyn zwraca uwagę na coraz większą różnorodność w zamówieniach klientów i, ze względu na rosnącą konkurencję, na coraz krótszy wymagany termin obsługi zleceń. Sytuacja ta często wymaga produkcji różnorodnych wyrobów w krótkich seriach, tak aby w magazynie znajdowała się paleta zróżnicowanych wyrobów. Wiele firm wskazuje jednak, iż oczywiście produkcja w krótkich seriach pozwalałaby na szybsze zaspokajanie potrzeb klienta, jednakże ze względu na m.in. długie czasy przebrojeń maszyn i urządzeń oraz konieczność częstej zmiany harmonogramów, z uwagi na skoki w zamówieniach klientów, nie jest to rozwiązanie, które w sposób bezproblemowy można zastosować w praktyce. Z pomocą w przypadku długich czasów przebrojeń czy problemów z właściwą organizacją stanowisk roboczych przychodzi *lean manufacturing*, coraz chętniej stosowany w przedsiębiorstwach produkcyjnych (Akanmu, Nordin i Gunasilan, 2022). Narzędzia *lean manufacturing* pozwalają m.in. skracać czas przebrojeń (z zastosowaniem *SMED*), doskonalić przepływ produkcji (*VSM*), organizować stanowiska robocze (*5S*), czy zapobiegać błędom (*Poka Yoke*) (Van Landeghem i Johannes, 2022). Dzięki zastosowaniu przytoczonych metod i narzędzi wiele przedsiębiorstw produkcyjnych jest w stanie

uporządkować i udoskonalić proces na tyle, aby skutecznie móc dostosować planowanie produkcji do obecnie panujących warunków rynkowych.

Jednym z rozwiązań zakładającym produkcję zróżnicowanych wyrobów w krótkich seriach jest planowanie i harmonogramowanie w taki sposób, aby uzyskiwać tzw. poziomowanie produkcji (rozumiane jako sposób harmonogramowania produkcji, prowadzący do uzyskania równomiernego spływu wyrobów z procesu). Poziomowanie oznacza produkcję stałej sekwencji różnorodnych wyrobów, która zapewnia dostępność wyrobów gotowych dla klienta, a także zminimalizuje nadprodukcję i różnice w obciążeniach stanowisk roboczych (Mayr i inni, 2018; Naciri i inni, 2022). Jednakże, jak wskazano w analizie literatury, istnieje wiele definicji poziomowania produkcji, które często są względem siebie sprzeczne. Mnogość różnych definicji, ich niespójność, niekonsekwencja i brak potwierdzenia ich słuszności poprzez badania naukowe, czy praktykę produkcyjną, pozwala zauważyć, że poziomowanie produkcji jest zagadnieniem jeszcze nieusystematyzowanym, w którym jest miejsce na rzetelne badania pozwalające stwierdzić, czym produkcja poziomowana tak naprawdę jest.

Poziomowanie pozytywnie wpływa na proces produkcyjny, m.in. eliminując skoki w produkcji, stabilizując procesy produkcyjne, czy wygładzając przepływ w całym łańcuchu dostaw, jednakże nie jest także pozbawione wad. Jedną z najpoważniejszych, wskazywanych w literaturze, jest konieczność ciągłego kontrolowania zapasów wyrobów gotowych, a więc wskazane jest przyjęcie określonego stopnia marnotrawstwa w zamian za niwelowanie skoków w całym strumieniu wartości (Bohnen, Maschek i Deuse, 2011).

Istotnym problemem poziomowania produkcji jest dostępność sposobów jej implementacji. Jak wskazano w analizie literatury istnieją dwa podejścia do wdrażania poziomowania – podejście analityczne i intuicyjne. W obu podejściach wyróżnić można kilka różnych sposobów implementacji. Niemniej jednak wszystkie opisane w literaturze sposoby nie znalazły szerszego, realnego zastosowania w rzeczywistych przedsiębiorstwach produkcyjnych. Przyczyny tego stanu mogą być różne. W przypadku sposobów reprezentujących podejście intuicyjne (Araujo i Queiroz, 2010; Liker i Meier, 2011) prawdopodobną przyczyną może być zbyt ogólne podejście, brak konkretnych etapów postępowania, a także brak niezbitych dowodów na możliwość realnego wdrożenia poziomowania w przedsiębiorstwie. Z kolei w przypadku sposobów reprezentujących podejście analityczne, a więc m.in. metodyki według Bohnera (Bohnen, Maschek i Deuse, 2011), mimo znacznego ustrukturyzowania etapów implementacji poziomowania, metodyka zakłada rozbudowane obliczenia matematyczne, w tym tworzenie matematycznego wzoru poziomowania, co dla przeciętnych przedsiębiorstw produkcyjnych może okazać się zbyt trudnym i czasowo- oraz kosztochłonnym zadaniem do zrealizowania. W związku z powyższym, można z całą pewnością uznać, że jest w literaturze miejsce na inne podejście do poziomowania, a mianowicie podejście praktyczne. W tym podejściu, nowy sposób poziomowania produkcji powinien być przede wszystkim praktyczny, ustrukturyzowany i szczegółowy, czyli taki, który będzie można realnie zastosować w warunkach produkcyjnych. Powinien być również na tyle prosty, aby przedsiębiorstwo mogło go zrealizować, wykorzystując posiadaną wiedzę i korzystając

z dostępnych, znanych narzędzi do analizy i doskonalenia procesów, a więc m.in. ze wskaźnika EPEI, analizy ABC/XYZ, czy macierzy podobieństwa technologicznego wyrobów.

Ważne jest stosowanie odpowiednich mierników poziomowania produkcji. Jak wskazuje analiza literatury, najczęściej stosowanymi miernikami są m.in. wydajność operacyjna, czasy wykonywania zleceń, czy koszty magazynowania. Brak jednak udokumentowanych i szczegółowych badań dotyczących wpływu poziomowania produkcji na rotację zapasów oraz dostępność wyrobów gotowych. Zapewnienie dostępności wyrobów gotowych jest szczególnie istotne dla produkcji MTS, gdzie zamówienia klientów realizowane są właśnie z magazynu. W tej strategii produkcji ważne jest dostarczanie wyrobów do klienta dokładnie w czasie przez niego oczekiwanym, niejednokrotnie w chwili złożenia zamówienia. Przy czym, zapewnienie dostępności wyrobów gotowych, może prowadzić do zwiększenia zapasów wyrobów, a tym samym zmniejszenia rotacji zapasów, która może powodować zwiększenie kosztów magazynowania, czy wzrost zamrożonego kapitału. Żeby tego uniknąć należy znaleźć balans pomiędzy tymi dwoma miernikami.

W wielu przedsiębiorstwach planiści widzą realną potrzebę i zalety zmniejszania liczby sztuk w partii, czy też ustalenia odpowiedniej sekwencji wyrobów, jednakże w większości przypadków odbywa się to w sposób intuicyjny na bazie zdobytego doświadczenia i wiedzy o rzeczywistym przebiegu procesu produkcji. Jak wynika z rozmów przeprowadzonych z kilkoma przedstawicielami przedsiębiorstw produkcyjnych, większość z nich słyszała o pojęciu „*poziomowanie produkcji*”, czy „*heijunka*”, wskazując przy tym, że nie mają odpowiedniej wiedzy ani narzędzi czy zasobów do zastosowania poziomowania w praktyce. Niemniej jednak podejmują próby jej implementacji stosując metodę „*prób i błędów*”, opierając się przy tym na własnych przemyśleniach i doświadczeniach. W związku z powyższym istnieje realna potrzeba zbudowania praktycznej metodyki poziomowania produkcji, która dałaby przedsiębiorstwom produkcyjnym narzędzie, które można rzeczywiście zastosować i które przyniesie wymierne i zdefiniowane korzyści dla realizacji procesu produkcyjnego i procesu obsługi klienta.

2. Cel, teza pracy i metody badawcze

2.1. Cel i teza pracy

Biorąc pod uwagę fakt, że z matematycznego punktu widzenia, problemy szeregowania zadań są uważane za problemy NP-trudne, a wiele przedsiębiorstw zмага się z rozwiązaniem problemów z harmonogramowaniem zadań, które spełniałoby określone kryteria, uznano, że wskazane jest opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji, zaspokajającej zmienne zapotrzebowanie na wyroby, spełniającej określone kryteria poziomowania, dostosowanej do potrzeb i możliwości przedsiębiorstw nie stosujących w planowaniu zaawansowanych, dedykowanych do planowania, programów komputerowych.

Tworzona metodyka poziomowania produkcji, w odróżnieniu od innych, opisanych w literaturze przedmiotu, ma być z założenia metodyką szczegółową, ustrukturyzowaną i na tyle jednoznaczną, aby możliwe było zastosowanie jej w warunkach produkcyjnych.

W związku z powyższym przyjęto następującą tezę pracy:

Metodyka poziomowania produkcji (MPP), bazująca na znanych i stosowanych metodach i narzędziach zarządzania produkcją, umożliwi zwiększenie rotacji wyrobów gotowych w magazynie przy równoczesnym zwiększeniu dostępności wyrobów gotowych dla klienta w porównaniu do bazowego sposobu planowania i harmonogramowania produkcji.

W związku z tym, że dla produkcji MTS ważne jest szczególnie zapewnienie dostępności wyrobów gotowych, które jednak może powodować zwiększenie zapasów wyrobów, a tym samym zmniejszenie rotacji zapasów, przyjęto, że miernikami poziomowania produkcji, według których metodyka będzie weryfikowana:

- rotacji zapasów w magazynie wyrobów gotowych, rozumianej jako częstość odnawiania zapasów (wskaźnik rotacji zapasów),
- dostępności wyrobów gotowych dla klienta, rozumianej jako stopień zrealizowania zamówień na czas (procentowy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas). Zamówienie jest zrealizowane na czas wtedy, kiedy klient otrzymuje zamówienie w czasie przez siebie wymaganym.

Wskaźnik rotacji zapasów przedstawia średnią liczbę jednostki czasu, w których wyrób gotowy przebywał w magazynie wyrobów gotowych. Wskaźnik ten jest minimantą, co oznacza, że im mniejsza wartość tego wskaźnika, tym rotacja zapasów jest wyższa. Procentowy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas jest stosunkiem zamówień zrealizowanych w czasie przewidzianym przez klienta (tzw. zrealizowane na czas) do przyjętych do realizacji. Wskaźnik ten jest maksymantą, co oznacza, że im większa wartość tego wskaźnika tym dostępność wyrobów gotowych dla klienta jest wyższa.

Poniżej przedstawiono wzory wskaźnika rotacji zapasów oraz zamówień zrealizowanych na czas.

Wskaźnik rotacji zapasów:

$$R = \frac{f_{mag,śr}}{l_r} * t \quad (12)$$

gdzie:

$f_{mag,śr}$ – średnia liczba wyrobów w magazynie w danym czasie,
 l_r – całkowita liczba wyrobów w zrealizowanych zamówieniach klienta,
 t – czas trwania analizy.

Procentowy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas:

$$D = \frac{w_r}{W} * 100\% \quad (13)$$

gdzie:

w_r – liczba zamówień zrealizowanych na czas,
 W – ogólna liczba złożonych zamówień.

Zakłada się, że wskaźniki są wyznaczone co pewien przedział czasowy, w każdym oknie planistycznym dla zbioru losowych zamówień. Planowanie jest procesem regularnie powtarzalnym, a nie procesem dynamicznym. Zakłada się również, że harmonogram ma za zadanie niwelowanie skoków w zamówieniach klientów, a więc produkcja ma charakter stały (produkcja określonych wyrobów co stałą sekwencją czasową), natomiast zamówienia klientów są realizowane z magazynu wyrobów gotowych.

2.2. Metody badawcze

W pracy zastosowano następujące metody badawcze:

1. badanie literatury,
2. badania symulacyjne,
3. badania statystyczne (wnioskowanie statystyczne, statystyka opisowa),
4. badania ankietowe.

Badanie literatury obejmuje przegląd polskiego i światowego piśmiennictwa w zakresie planowania i harmonogramowania produkcji, ze szczególnym uwzględnieniem poziomowania produkcji. Celem badania literatury jest zebranie oraz przeanalizowanie informacji na temat poziomowania produkcji, jej definicji, zalet i wad oraz sposobów wdrażania, pod kątem narzędzi i wskaźników poziomowania produkcji oraz mierników efektywności poziomowania. Badania literatury zostały zaprezentowane w rozdziale 1 pracy doktorskiej.

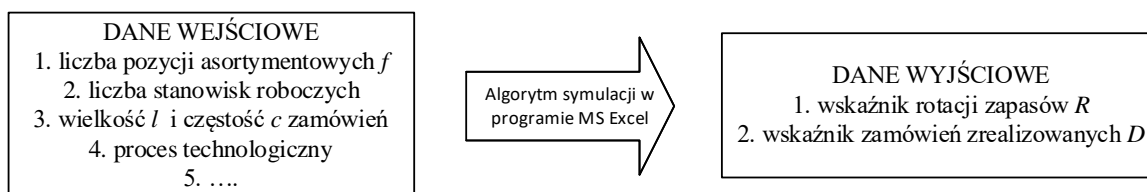
Badania symulacyjne zostały podzielone na dwie części:

- pierwsza obejmująca eksperyment symulacyjny dla danych losowo generowanych,
- druga obejmująca symulację komputerową dla danych pozyskanych z rzeczywistego procesu produkcyjnego.

W celu weryfikacji (rozumianej jako: sprawdzenie skuteczności działania) MPP przygotowano eksperyment symulacyjny, mający na celu sprawdzenie sposobu działania metodyki oraz porównanie: wskaźnika rotacji zapasów R i zamówień zrealizowanych na czas D , w przypadku produkcji poziomowanej oraz w przypadku produkcji niepoziomowanej (bazowej). Eksperyment symulacyjny rozumie się jako technikę numeryczną przeznaczoną do prowadzenia badań na modelach opisujących zachowanie się pewnego systemu. System stanowi źródło danych o reakcji będącej przedmiotem badań, a model jest zbiorem instrukcji (w tym przypadku modelem jest MPP) służących do wygenerowania danych reakcji. Eksperyment symulacyjny polegał na:

1. wygenerowaniu losowych danych wejściowych dotyczących m.in. procesu technologicznego,
2. przeprowadzeniu etapów MPP, w tym przygotowaniu harmonogramu poziomowanego oraz bazowego (niepoziomowanego),
3. porównaniu wielkości spływu wyrobów z procesu produkcji z wygenerowanymi zamówieniami klienta,
4. obliczeniu wskaźnika rotacji zapasów R oraz zamówień zrealizowanych na czas D .

Eksperyment został przeprowadzony w programie MS Excel, a jego realizacja została schematycznie zaprezentowana na rysunku 2.1.



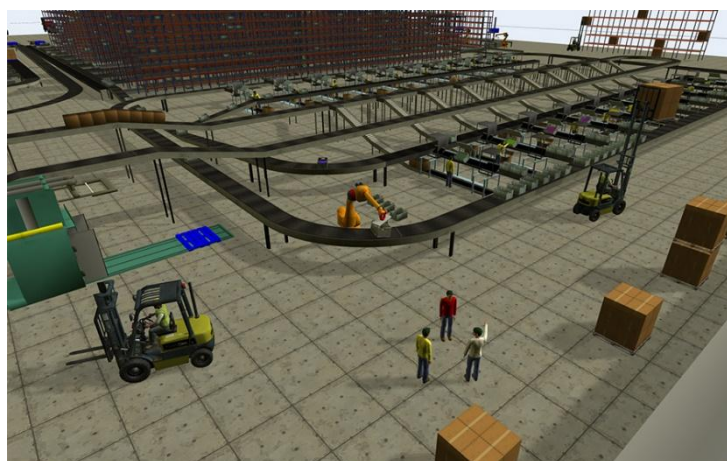
Rysunek 2.1 Schemat realizacji eksperymentu symulacyjnego, opracowanie własne

Wyniki wskaźników dla produkcji poziomowanej porównano ze wskaźnikami uzyskanymi dla produkcji bazowej. Aby stwierdzić statystycznie istotną różnicę w rozkładach wskaźników dla produkcji bazowej i produkcji poziomowanej wykonano **badanie statystyczne**. Zostało zastosowane wnioskowanie statystyczne w postaci testu kolejności par Wilcoxon'a średniego wskaźnika rotacji zapasów oraz wskaźnika realizacji zamówień. Test kolejności par Wilcoxon'a jest nieparametrycznym odpowiednikiem testu t-Studenta dla prób zależnych. Stosuje się go w sytuacji, gdy pomiarów badanej zmiennej dokonuje się dwukrotnie w różnych warunkach. Podczas realizacji eksperymentu symulacyjnego zastosowano również statystykę opisową, m.in. miary położenia (średnia arytmetyczna, mediana, kwartył), czy miary zróżnicowania (odchylenie standardowe, współczynnik zmienności), które zaprezentowano w postaci opisu tabelarycznego oraz graficznej metody prezentacji danych, m.in. wykresów typu boxplot typu: Q1-Me-Q3, czy wartości pojedynczych.

W celu sprawdzenia skuteczności metodyki w warunkach produkcyjnych, przeprowadzono symulację komputerową w programie FlexSim. Symulację komputerową rozumie się jako sposób opierający się na przeprowadzeniu badań eksperymentalnych na

dynamicznych modelach (np. symulacyjnych), omawiające istniejące lub opracowywane systemy. Model symulacyjny to zbiór instrukcji dla komputera, definiujących każdą zmienną i powiązania między nimi. Zaletą modeli symulacyjnych jest to, że w ciągu kilku sekund można zbadać skutki zmiany warunków i przewidzieć zachowanie badanego systemu w dłuższym czasie.

Program FlexSim, opracowany przez firmę FlexSim Software Products, pozwala na symulację rzeczywistych procesów produkcyjnych, celem optymalizacji obecnych i planowanych procesów, identyfikacji strat, redukcji kosztów, czy zwiększania przychodów. W programie możliwe jest wirtualne odwzorowanie rzeczywistych systemów, analiza danych produkcyjnych, czy przeprowadzanie eksperymentów symulacyjnych, które mogą odpowiadać, na pytanie: „co może się stać, jeśli...?”. W FlexSim możliwe jest tworzenie modeli trójwymiarowych, odwzorowujących rzeczywisty system, np. produkcyjny (rysunek 2.2).



Rysunek 2.2 Widok symulacji w programie FlexSim, źródło: (FlexSim Software Products, 2023)

Narzędzie to klasyfikowane jest jako program do symulacji zdarzeń dyskretnych. Oprogramowanie FlexSim umożliwia zapoznanie się nie tylko z tym jak dany system funkcjonuje, ale także pokazuje wyniki alternatywnych rozwiązań czy zmiany logiki przepływu. Pozwala to zauważyć wszystkie przyczyny oraz skutki zjawisk powstających w systemie.

FlexSim jest stosowany w różnych projektach symulacyjnych obejmujących zarówno standardowe, jak i elastyczne systemy produkcyjne (Tikasz, McCulloch, Pentiah i Baxter, 2012). W literaturze program FlexSim jest często opisywany i stosowany, m.in. przy badaniach mających na celu zmianę harmonogramu produkcji linii produkcyjnej (Huang, Pei, Wu i May, 2013), optymalizację linii montażowych elektroniki (Gebus, Martin, Soulas i Juuso, 2004) i planowanie produkcji stali (Yao i Zhu, 2010).

Program jest również stosowany do automatyzacji tworzenia modeli symulacyjnych. Dostępne są rozwiązania oparte na FlexSim, które komunikują się z oprogramowaniem do zarządzania cyklem życia wyrobu PLM (ang. *Product Lifecycle Management*). FlexSim jest również stosowany do opracowywania komputerowych modeli symulacyjnych dla aplikacji Przemysłu 4.0.

Do przeprowadzenia symulacji komputerowej zbudowano dwa modele symulacyjne w programie FlexSim, po jednym dla wydziału. Dla każdego z nich przeprowadzono dwie symulacje:

- bazową, symulującą sposób harmonogramowania rzeczywiście stosowany na danym wydziale,
- poziomowaną, z zastosowaniem metodyki MPP.

Obie symulacje porównano pod względem wartości wskaźnika rotacji zapasów R oraz zamówień zrealizowanych na czas D .

Przeprowadzenie symulacji komputerowej odbywało się w czterech krokach:

1. zgromadzenie danych wejściowych z rzeczywistych procesów produkcyjnych (m.in. proces technologiczny, produkowany asortyment, zamówienia klienta),
2. wyznaczenie harmonogramu produkcji poziomowanej z pomocą MPP,
3. przeprowadzenie symulacji i wyznaczenie wskaźnika rotacji zapasów i zamówień zrealizowanych według:
 - harmonogramu poziomowanego,
 - harmonogramu obecnie realizowanego w przedsiębiorstwie,
4. porównanie otrzymanych wyników.

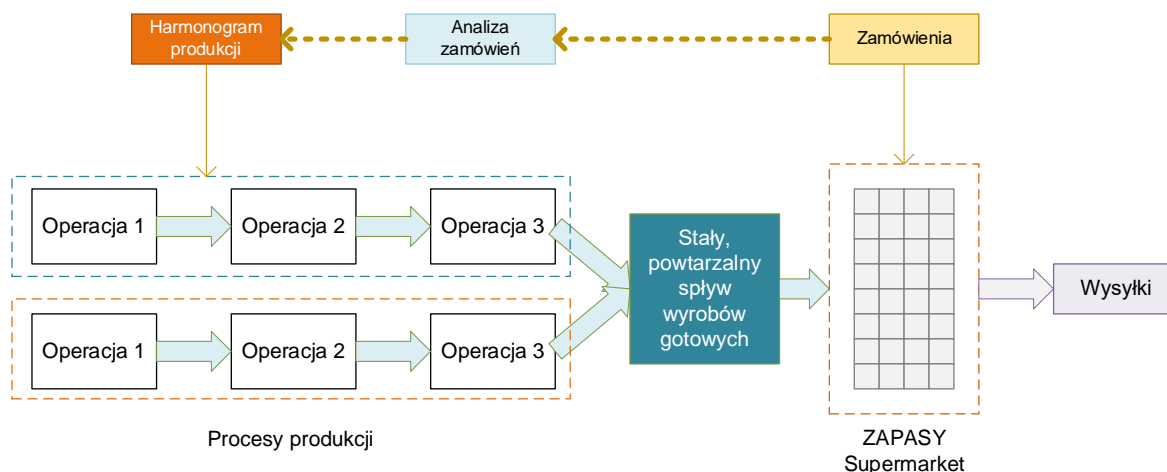
Podczas realizacji symulacji komputerowej również zastosowano statystykę opisową, m.in. miarę położenia (średnia arytmetyczna) i miarę zróżnicowania (odchylenie standardowe, współczynnik zmienności), które zaprezentowano w postaci opisu tabelarycznego.

Badanie ankietowe miały na celu ustalenie, czy opracowana metodyka MPP jest „wykonalna” i algorytm jest jednoznaczny i poprawny. Poproszono trzech ekspertów (planistę produkcji, kierownika produkcji oraz pracownika naukowo-dydaktycznego) o wykonanie wszystkich etapów metodyki dla zestawu wskazanych danych, a następnie wyniki porównano ze sobą oraz z wynikami wzorcowymi. Przeprowadzono ankietę na temat trudności w wykonaniu poszczególnych kroków metodyki, szczegółowości instrukcji oraz ogólnej opinii na temat metodyki. Kwestionariusz ankiety składał się z 14 pytań zamkniętych oraz 7 pytań otwartych.

3. Metodyka poziomowania produkcji zorientowana na zwiększanie rotacji zapasów oraz dostępności wyrobów gotowych

3.1. Idea poziomowania produkcji

Podstawą opracowania metodyki jest przyjęte w tej pracy rozumienie poziomowania produkcji, jako sposobu harmonogramowania, polegającego na ustaleniu sekwencji oraz wielkości spływu wyrobów z procesu produkcji tak, aby bieżący popyt klienta był realizowany z magazynu (przy utrzymaniu ekonomicznie uzasadnionej wielkości zapasów wyrobów gotowych) i nie powodował nagłych zmian w harmonogramie produkcji. Zgodnie z tym, harmonogram produkcji powinien być stabilny w danym przedziale czasu. Poziomowanie dąży do tego, aby wyroby produkowane były w określonej sekwencji, w partiach o jak najmniejszej liczbie sztuk. Ideę poziomowania produkcji przedstawia rysunek 3.1.



Rysunek 3.1 Idea poziomowania produkcji, opracowanie własne

3.2. Definicje

Wyrób finalny (inaczej wyrób gotowy) jest to produkt stanowiący końcowy wynik procesu produkcyjnego. Każdy wyrób posiadający m.in. unikalne cechy użytkowe, czy jakościowe, stanowi odrębną pozycję asortymentową. Wyrób finalny może być wyrobem prostym lub złożonym. Wyrób prosty to jednolity element konstrukcyjny otrzymany w wyniku przetwarzania jednego gatunku materiału i nieposiadający powiązań z innymi elementami. Natomiast wyrób złożony to zespół lub zbiór zespołów i podzespołów części. Innymi słowy jest to złożenie składające się przynajmniej z dwóch wyrobów prostych, połączonych ze sobą. W niniejszej pracy zakłada się, że metodyka poziomowania produkcji może być stosowana zarówno w przypadku produkcji wyrobów prostych jak i złożonych. Niemniej jednak wszystkie wyroby, zarówno proste jak i złożone mogą być jedynie częściami oryginalnymi. Jednocześnie przyjmuje się, że tylko części oryginalne mogą wchodzić w skład wyrobu złożonego. Części oryginalne to części, które wytwarzane są w zakresie działalności przedsiębiorstwa produkcyjnego.

W związku z powyżej przedstawionymi definicjami przyjęto następujące oznaczenia:

- $f = 1, \dots, F$ – numery porządkowe wyrobów finalnych,
- $b = 1, \dots, B$ – numery porządkowe części oryginalnych, będących wyrobami prostymi,
- $o = 1, \dots, O$ – numery porządkowe części oryginalnych, będących wyrobami złożonymi.

Przyjmuje się, że każdy wyrób finalny f produkowany jest w systemie wytwórczym o uporządkowanej strukturze. Składowymi systemy produkcyjnego są komórki produkcyjne różnego stopnia w zależności od stopnia uszczegółowienia. W związku z powyższym rozróżnia się:

- komórki produkcyjne 0 stopnia K_x^0 – są to pojedyncze stanowiska robocze,
- komórki produkcyjne 1 stopnia K_x^1 – jest to uporządkowany zbiór stanowisk roboczych,
- komórki produkcyjne 2 stopnia K_x^2 – stanowią wydziały produkcyjne, które zawierają w sobie komórki produkcyjne 1 stopnia.

Przyjmuje się następujące oznaczenia:

- $K_x^0 = K_1^0, \dots, K_x^0$ – numery porządkowe komórki produkcyjnej 0 stopnia,
- $K_x^1 = K_1^1, \dots, K_x^0$ – numery porządkowe komórki produkcyjnej 1 stopnia,
- $K_x^2 = K_1^2, \dots, K_x^2$ – numery porządkowe komórki produkcyjnej 2 stopnia.

Zakłada się, że zlecenie produkcyjne może być wykonywane przez jedną lub więcej komórek produkcyjnych 2 stopnia. Zlecenie produkcyjne z jest dokumentem określającym liczbę sztuk wyrobu finalnego do wykonania oraz termin realizacji wykonania zadań. Zlecenie produkcyjne może być utworzone dla wyrobu finalnego prostego ($z(b)$) lub złożonego ($z(o)$). Zlecenia powstałe na wyrób finalny złożony powodują konieczność powstania zbioru podzleceń na części składowe wyrobu złożonego.

Wyroby finalne f mogą być wytwarzane w jednej lub w kilku operacjach technologicznych e , do których przypisana jest jedna komórka produkcyjna (a więc jedno stanowisko robocze) 0 stopnia K_x^0 , w związku z tym, jak wcześniej wspomniano nie zakłada się alternatywnych komórek produkcyjnych dla wykonywania operacji technologicznej:

- $e = 1, \dots, E$ – numer porządkowy operacji technologicznej wyrobu finalnego f .

Przyjmuje się, że operacja technologiczna opisana jest parametrem t_{jef} , który definiuje czas jednostkowy wykonania operacji na danej maszynie.

Zatem każdej maszynie przypisany został zbiór operacji technologicznych e , koniecznych do wykonania wyrobów finalnych f . Zakłada się, że przy zmianie produkcji poszczególnych wyrobów finalnych zachodzi konieczność przebrojenia maszyny. Przebrojenie opisane jest parametrem:

- $p_{f-1,f}$ – czas przebrojenia maszyny z wyrobu $f-1$ na wyrób f .

Nie umniejszając ogólności analizy, przyjmuje się, że czas przebrojenia maszyny z wyrobu $f-1$ na wyrób f wynosi tyle samo co przebrojenie z wyrobu f na $f-1$.

Klientem jest każdy nabywca towarów (lub usług) produkowanych przez przedsiębiorstwo. Można w tym miejscu rozróżnić klienta wewnętrznego i zewnętrznego. Klientem zewnętrznym kz określa się nabywcę końcowego wyrobu finalnego. Są to najczęściej osoby fizyczne lub prawne, które kupują dobra od przedsiębiorstw w celu zaspokojenia własnych potrzeb lub w celu dalszej ich dystrybucji. Klientem wewnętrznym kw może być np. pojedyncza komórka produkcyjna K_x^0 , czy wydział produkcyjny K_x^2 znajdujący się wewnątrz organizacji, który otrzymuje części oryginalne o lub b od komórki poprzedzającej, np. K_{x-1}^0 .

Klienci składają zamówienia w na wyroby finalne f w określonym przedziale czasowym. Zakłada się, że zamówienia otrzymywane są w sposób losowy i realizowane są z magazynu wyrobów gotowych:

- $w = 1, \dots, W$ - numer porządkowy zamówienia klienta.

Zamówienia opisywane są przez dwa parametry:

- $l = 1, \dots, L$ – liczba sztuk w zamówieniu klienta,
- $c = 1, \dots, C$ – częstość zamówień klienta, gdzie 1 oznacza jeden okres analityczny, np. zmiana robocza.

Z zamówień w ujęciu historycznym wyznacza się średnią liczbę sztuk w zamówieniach \bar{x}_l oraz odchylenie standardowe od wartości średniej σ_l , a także średnią częstość zamówień klientów \bar{x}_c oraz odchylenie standardowe od wartości średniej σ_c . Częstość zamówień rozumiana jest jako odstęp czasu co jaki klienci składają zamówienia na wyroby finalne f .

Przyjmuje się, że wyroby finalne f po ukończeniu procesu produkcji składowane są w magazynie wyrobów gotowych. Jako magazyn wyrobów gotowych przyjmuje się jednostkę organizacyjną, która przeznaczona jest do składowania dóbr. W magazynie w zależności od realizacji zamówień klientów w przebywać może różna liczba magazynowych wyrobów finalnych f_{mag} :

- $f_{mag} = 1, \dots, F_{mag}$ - numer porządkowy wyrobów finalnych składowanych w magazynie.

Zamówienia klientów realizowane są z magazynu wyrobów gotowych. W związku z tym przyjmuje się następujące parametry:

- w_r – liczba zamówień klientów, które zostały zrealizowane w wymaganym terminie,
- w_n – liczba zamówień klientów, które nie zostały zrealizowane w wymaganym terminie,
- l_r – liczba sztuk wyrobów finalnych f w zrealizowanych zamówieniach klientów w danym okresie analitycznym t .

3.3. Założenia

Aby jak najbardziej przybliżyć metodykę do warunków rzeczywistych, przyjęto następujące założenia:

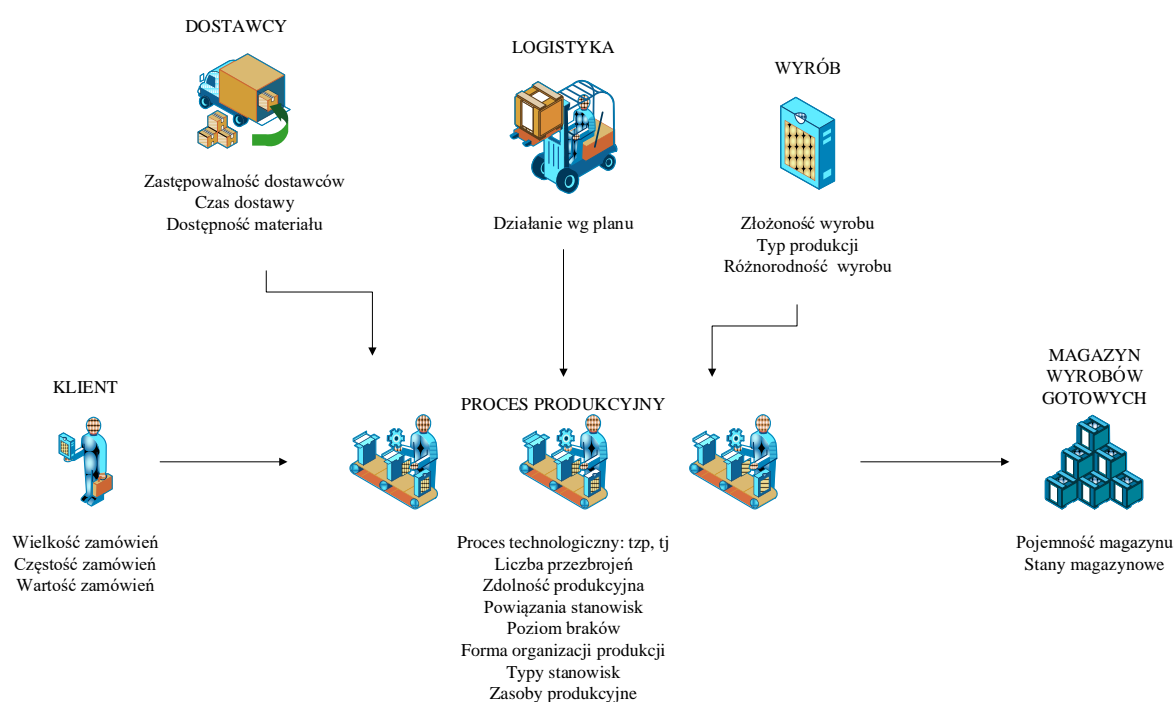
1. Planowaniu produkcji podlegają procesy produkcji *job-shop*, charakteryzujące się produkcją wieloasortymentową (planuje się produkcję wielu różnych wyrobów).
2. Wyroby produkowane są w sposób seryjny (wytwarza się partie wyrobu, po zakończeniu produkcji której maszyny mogą zostać przezbrajane na produkcję innego wyrobu).
3. Zamówienia klientów wpływają do systemu w sposób nieregularny (losowy, zmienny).
4. W systemie produkcyjnym jest realizowana strategia MTS, polegająca na utrzymywaniu zapasu wyrobów gotowych. Tak więc wyroby gotowe produkowane są na magazyn skąd realizowane są zamówienia klientów, zarówno wewnętrznych jak i zewnętrznych.
5. System produkcyjny posiada określony park maszynowy, z ustalonym układem (layout). Maszyny mogą być rozmieszczone w dowolnej formie, gniazd technologicznych, przedmiotowych, czy linii produkcyjnych.
6. Nie uwzględnia się wpływu czynnika ludzkiego na planowanie produkcji. W związku z tym harmonogramuje się tylko i wyłącznie operacje technologiczne wykonywane na maszynach. Ewentualny spadek wydajności produkcji jest pośrednio uwzględniony przy obliczeniach efektywnego czasu pracy.
7. Dysponuje się danymi historycznymi o zamówieniach klientów, dotyczących liczby zamówień oraz częstotliwości zamówień.
8. Nie rozpatruje się możliwości zastosowania alternatywnych marszrut technologicznych. Zakłada się, że marszruty są znane i niezmiennie w całym okresie planistycznym.
9. Występuje niezmiennosc czasów wykonywania operacji, czasów przygotowawczo-zakończeniowych, w tym czasów przebrojeń oraz asortymentu produkowanych wyrobów.
10. Zapewniona jest dostępność surowców i materiałów do produkcji, a także dostępność zdolności produkcyjnych. Oznacza to, że w systemie produkcyjnym nie przewiduje się wystąpienie nieoczekiwanych zakłóceń, a dostępność zasobu jest stała.
11. Zamówienia klientów są realizowane na czas tylko w momencie wejścia do systemu.
12. Wartości współczynnika bezpieczeństwa są wartościami hipotetycznymi. W pracy nie dokonuje się określania wartości tych współczynników.
13. Ustalone są stany początkowe magazynu wyrobu gotowego.

3.4. Czynniki determinujące i mierniki poziomowania produkcji

Bazując na przygotowanej analizie literatury dotyczącej planowania produkcji, w tym jej poziomowania, usystematyzowano czynniki determinujące oraz mierniki poziomowania produkcji. Czynniki determinujące poziomowanie produkcji przedstawione zostały na rysunku 3.2. Czynniki zostały podzielone na 6 kategorii, związanych z:

- klientem - wielkość, częstość oraz wartość zamówień. Wskazane czynniki determinują przede wszystkim wskazanie wyrobów dla których poziomowanie może zostać zaimplementowane,
- dostawcą – zastępowalność dostawców, założony czas dostaw surowców, dostępność materiału. Są to czynniki wpływające przede wszystkim na realność wykonania planu produkcji. W niniejszej pracy zakłada się jednak, że materiał/surowiec jest zawsze dostępny,
- logistyką – realizowanie planu transportu wyrobów. Ten czynnik również związany jest z realnością wykonywania planu produkcji. W niniejszej pracy międzystanowiskowy transport wyrobów został pominięty,
- wyrobem – złożoność wyrobu (struktura wyrobu), typ produkcji, różnorodność produkowanych wyrobów (wielkość asortymentu). Czynniki determinują możliwość zastosowania poziomowania produkcji. Złożoność wyrobu wpływa na wybór wyrobów do poziomowania, np. przedsiębiorstwo produkuje podzespoły części oraz montuje je w wyrób finalny złożony. W niektórych przypadkach, może okazać się, że choć teoretycznie wyrób finalny jest wyrobem zindywidualizowanym (kustomizowanym) to złożony jest z podzespołów produkowanych w sposób seryjny (typ produkcji). Oznaczać to będzie, że dla takich podzespołów możliwe będzie zastosowanie poziomowania produkcji. Jak wspomniano wcześniej, ograniczenia metodyki zakładają, że poziomowanie jest możliwe do zastosowania w przypadku produkcji seryjnej. Różnorodność wyrobów natomiast wpływa na stopień skomplikowania analizy,
- magazynem wyrobów gotowych – pojemność magazynu, stany magazynowe. Czynniki, które w znaczący sposób wpływają na poziomowanie produkcji, szczególnie w kontekście wyznaczania wpływu poziomowania na rotację zapasów oraz dostępność wyrobów gotowych. W przypadku produkcji poziomowanej zakłada się właśnie produkcję na magazyn, w związku również z tym czynniki opisujące magazyn są w jej przypadku niezwykle istotne,
- procesem produkcyjnym – w tym:
 - proces technologiczny, w tym parametry go opisujące jak czasy jednostkowe operacji technologicznych, czy czas przebrojeń maszyn. W poprzednim punkcie te czynniki zostały już opisane,
 - możliwa liczba przebrojeń – czynnik, który bezpośrednio wpływa na plan produkcji, ponieważ od niego zależy m.in. jak często dana sekwencja wyrobów będzie mogła zostać produkowana. Czynnik ma swoje odzwierciedlenie we wskaźniku EPEI,

- o zdolność produkcyjna – a więc możliwość produkowania określonej liczby wyrobów. w pracy zakłada się dostępność zdolności produkcyjnej,
- o powiązania stanowisk – uszczegóławiając poziom ich skomplikowania. Im więcej stanowisk jest ze sobą powiązanych i realizuje przy tym wiele różnorodnych wyrobów, tym trudniejsza stanie się analiza dotycząca m.in. podobieństwa technologicznego wyrobów czy obliczanie wskaźnika EPEI,
- o forma organizacji produkcji – związana z powiązaniem stanowisk roboczych,
- o typy stanowisk – powiązane są ze stopniem specjalizacji stanowisk roboczych. Typ stanowisk związany jest również ściśle z typem produkcji,
- o zasoby produkcyjne – maszyny, urządzenia, zasoby ludzkie, itd. W pracy założono, że zasoby produkcyjne są dostępne, w związku z tym spadek efektywności pracowników, czy awarie maszyn nie występują.



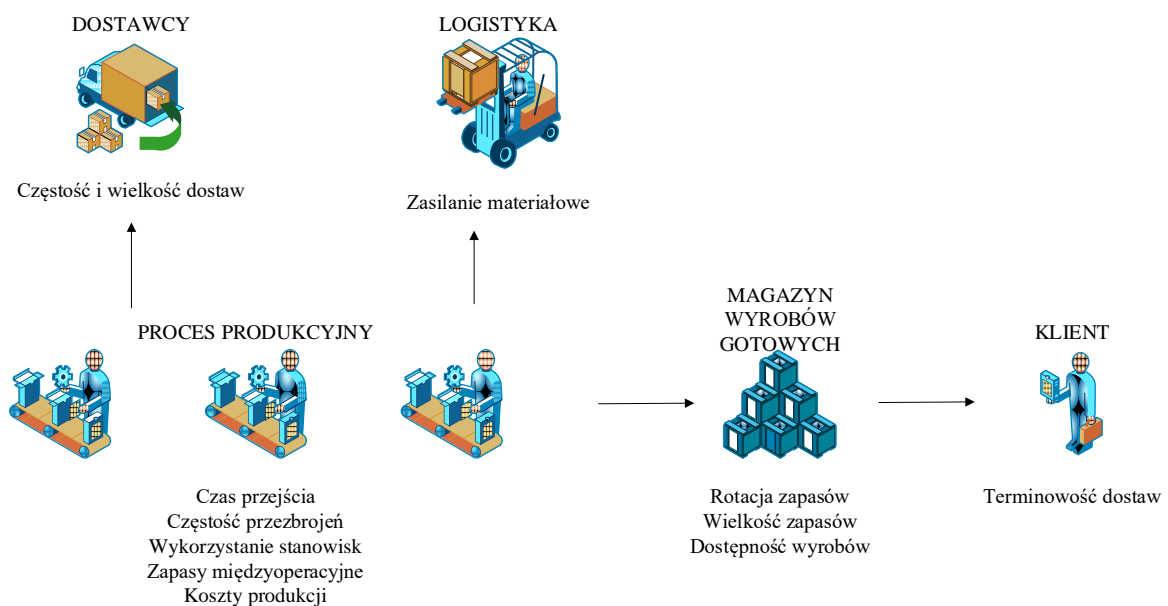
Rysunek 3.2 Czynniki wpływające na poziomowanie produkcji, opracowanie własne

Mierniki poziomowania produkcji zostały wyznaczone na podstawie analizy literatury i badań własnych oraz podzielone na pięć kategorii, w zależności od miejsca w systemie produkcyjnym. Miejsce w systemie i związane z nim wielkości charakterystyczne to (rysunek 3.3):

- dostawca – przede wszystkim częstość i wielkość dostaw materiałów,
- logistyka – częstość i wielkość zasileń materiałowych,
- proces produkcyjny – w tym:
 - o czas przejścia – czas potrzebny na wyprodukowanie wyrobu,
 - o częstość przebrojeń – liczba przebrojeń maszyn w analizowanym okresie czasu,

- wykorzystanie stanowisk roboczych, obciążenie stanowisk roboczych – w jakim stopniu maszyny i urządzenia są wykorzystywane,
- zapasy międzyoperacyjne – wielkość tych zapasów oraz częstość ich odnawiania,
- koszty produkcji,
- magazyn wyrobów gotowych – w tym w szczególności rotacja zapasów, wielkość zapasów oraz dostępność wyrobów gotowych dla klienta,
- terminowość realizacji dostaw – stopień zrealizowania zamówień klientów na czas.

Przedstawione wyżej mierniki poziomowania mają za zadanie określić skuteczność poziomowania produkcji. W niniejszej pracy skupiono się na dwóch miernikach, które, jak wynika z analizy literatury, nie są dokładnie określone, a mianowicie na rotacji zapasów oraz dostępności wyrobów gotowych dla klienta.

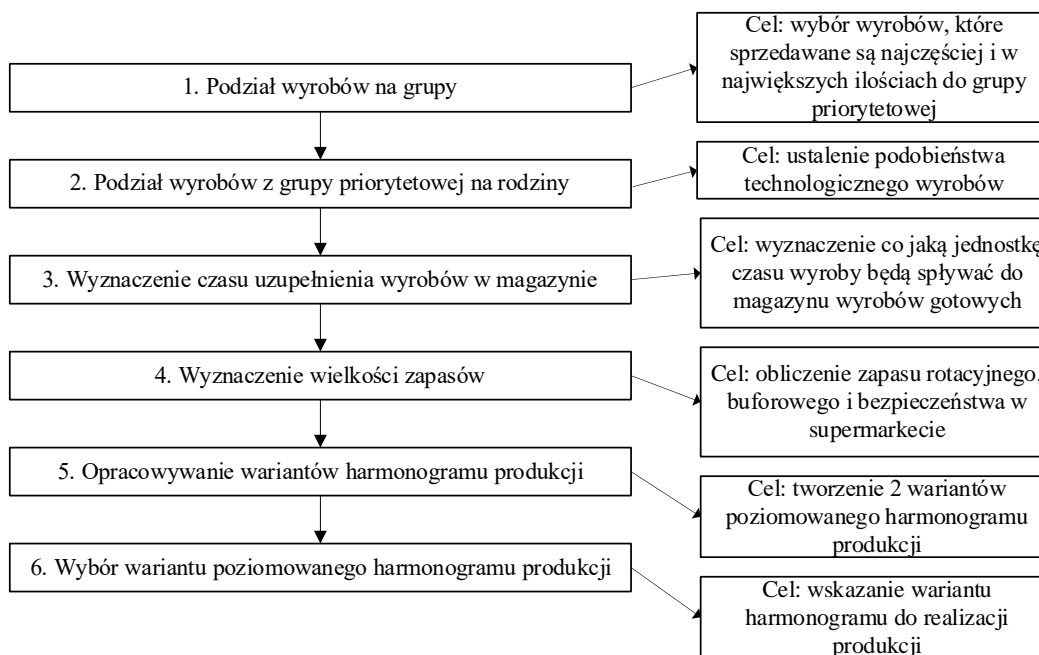


Rysunek 3.3 Mierniki poziomowania produkcji, opracowanie własne

3.5. Etapy poziomowania według proponowanej metodyki

3.5.1. Ogólny schemat metodyki

Metodyka MPP składa się z sześciu etapów przedstawionych na rysunku 3.4. Poniżej zostały również zaprezentowane cele każdego z etapów, a w dalszej części rozdziału każdy etap został opisany w szczegółach.



Rysunek 3.4 Ogólny schemat metodyki poziomowania produkcji (MPP), opracowanie własne

1. **Podział wyrobów na grupy**, w zależności od liczby sprzedawanych wyrobów oraz częstości sprzedaży. Celem jest wyznaczenie priorytetowej grupy wyrobów, dla których będzie stosowana produkcja poziomowana. Podział jest przeprowadzany z zastosowaniem analizy ABC/XYZ. Ponieważ poziomowanie produkcji powinno się odbywać dla wyrobów produkowanych według zasad produkcji seryjnej, to jeżeli przedsiębiorstwo posiada w swoim asortymencie wyroby, które produkowane są jednostkowo lub nawet małoseryjnie, ale niezwykle rzadko, to takie wyroby nie powinny być zawarte w codziennym harmonogramie produkcji. Warto w tym punkcie nadmienić, iż w przypadku produkcji wyrobów finalnych złożonych, należy wziąć również pod uwagę strukturę wyrobu, tym samym rozbijając wyrób złożony na wyroby proste. Szerzej będzie to opisane w kolejnym punkcie.
2. **Podział wyrobów z grupy priorytetowej na rodziny** ma na celu ustalenie podobieństwa technologicznego wyrobów, tak aby wskazać rodziny wyrobów produkowane na podobnej marszrucie technologicznej, tym samym w komórkach produkcyjnych 0 stopnia. Ustalenie podobieństwa technologicznego odbywa się przy pomocy macierzy podobieństwa technologicznego wyrobów. Wyznaczenie rodzin wyrobów jest istotne z punktu widzenia obliczania wskaźnika EPEI, jak również wskazania marszrut technologicznych wykonania wyrobów.
3. **Wyznaczenie czasów uzupełnienia zapasów wyrobów w magazynie** wyrobów gotowych. Celem etapu jest wyznaczenie częstości uzupełniania zapasów, czyli przedziału czasu po którym zapas będzie się odnawiał. Czas uzupełnienia wyznaczany jest na podstawie wartości wskaźnika EPEI. W zależności to tego czy w procesie technologicznym realizowana jest jedna czy więcej operacji technologicznych, obliczane są odpowiednio wskaźniki EPEI dla komórki produkcyjnej lub wskaźniki EPEI dla całego procesu technologicznego. Wskaźnik

EPEI może równocześnie określać maksymalną podziałkę czasu, w której może być produkowana dana sekwencja wyrobów, tym samym określając możliwą liczbę powtórzeń produkcji sekwencji wyrobów w danym czasie.

4. **Wyznaczenie wielkości zapasów** w magazynie wyrobów gotowych jest liczone według standardów obliczania i podziału zapasów w supermarkecie. Przyjęto, iż zastosowanie podziału zapasów zaczerpniętego z supermarketu, będzie odzwierciedlało założenia produkcji poziomowanej. W podziale zapasów znajdują się zapas rotacyjny, odpowiedzialny za realizację bieżących zamówień klientów, buforowy, odpowiedzialny za niwelowanie zmienności w popycie klienta oraz bezpieczeństwa, który pozwala na ciągłość dostaw wyrobów dla klienta w przypadku nieprzewidzianych zdarzeń, które mogą wystąpić na produkcji.
5. **Opracowanie wariantów harmonogramów produkcji** jest dokonywane na podstawie obliczeń dokonanych w czterech pierwszych etapach metodyki. Utworzone zostają 2 warianty harmonogramu produkcji:
 - wariant 1, w którym następuje podział na partie transportowe. Harmonogram realizowany jest według cyklu szeregowego, przy czym jednostką harmonogramowania jest partia transportowa wyrobów. W tym przypadku zastosowana została reguła priorytetu „najpierw najdłuższy czas operacyjny”,
 - wariant 2, w którym, tak samo jak w wariantcie 1 zastosowano podział na partie transportowe, przy czym w tym przypadku zastosowana została reguła priorytetu „najpierw najkrótszy czas operacyjny”.

Powyższe reguły priorytetu zostały wybrane, ponieważ, z analizy literatury wynika, obie pozwalają na osiągnięcie minimalnych wartości wskaźnika C_{max} , który jest brany pod uwagę przy wyborze jednego z wariantów. Również obserwacja dokonana w przedsiębiorstwach produkcyjnych wskazuje na powszechne zastosowanie obu reguł w praktyce. Harmonogram szeregowy został wskazany dlatego, że w przypadku przepływu nieukierunkowanego (*job-shop*) wskazywany jest w literaturze właśnie ten cykl harmonogramu.

Warianty poziomowanego harmonogramu produkcji, na etapie weryfikacji metodyki zostaną porównane z wariantem bazowym. Wariant bazowy jest to harmonogram produkcji, który zakłada produkcję według harmonogramu szeregowego, bez podziału na mniejsze partie transportowe, a zadaną regułą priorytetu jest reguła najpierw najdłuższy czas operacyjny. Reguła ta wybrana została po przeprowadzeniu serii symulacji, z których wynika, że jej zastosowanie, w przypadku, w którym nie jest założony podział na partie transportowe, pozwala w większości przypadków na realizację założonego planu produkcji w zadanych ramach czasowych.

6. **Wybór harmonogramu produkcji.** Na podstawie otrzymanych w punkcie piątym harmonogramów produkcji następuje wybór tego, który będzie można realizować w przedsiębiorstwie. Wybór harmonogramu odbywa się na podstawie wskaźnika

C_{max} , który jest długością uszeregowania. Im wartość C_{max} jest mniejsza, tym założona produkcja zrealizowana będzie szybciej, tym samym spływ wyrobów z produkcji będzie szybszy, co pozwoli na bardziej skuteczną realizację zamówień klientów. Mniejsza wartość wskaźnika C_{max} , pozwoli również na realizację innych, pilnych zleceń, dzięki zapewnieniu dostępności zasobów produkcyjnych w każdej sekwencji harmonogramu. Dokonano również serii symulacji potwierdzających, że wskazanie harmonogramu o mniejszej wartości wskaźnika pozwala na uzyskanie niższego wskaźnika rotacji zapasów oraz wyższego wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas.

3.5.2. Podział wyrobów na grupy

Pierwszy etap dotyczy podziału wyrobów na grupy w zależności od sprzedawanych ilości tych wyrobów oraz częstości ich sprzedaży. W tym celu zastosowana została analiza ABC/XYZ. Analizę należy rozpocząć od pozyskania danych dotyczących:

- indeksów produkowanych wyrobów,
- struktur wyrobów gotowych (jeśli wyroby są wyrobami złożonym);
- ilości zamawianych wyrobów przez klientów z okresu minimum 1 roku,
- częstości zamówień klientów.

W przypadku produkcji i sprzedaży wyrobów prostych, punkt związany z określeniem struktury wyrobu nie ma zastosowania. Dla tej sytuacji należy jedynie pozyskać indeksy produkowanych wyrobów oraz częstość i wielkość ich sprzedaży.

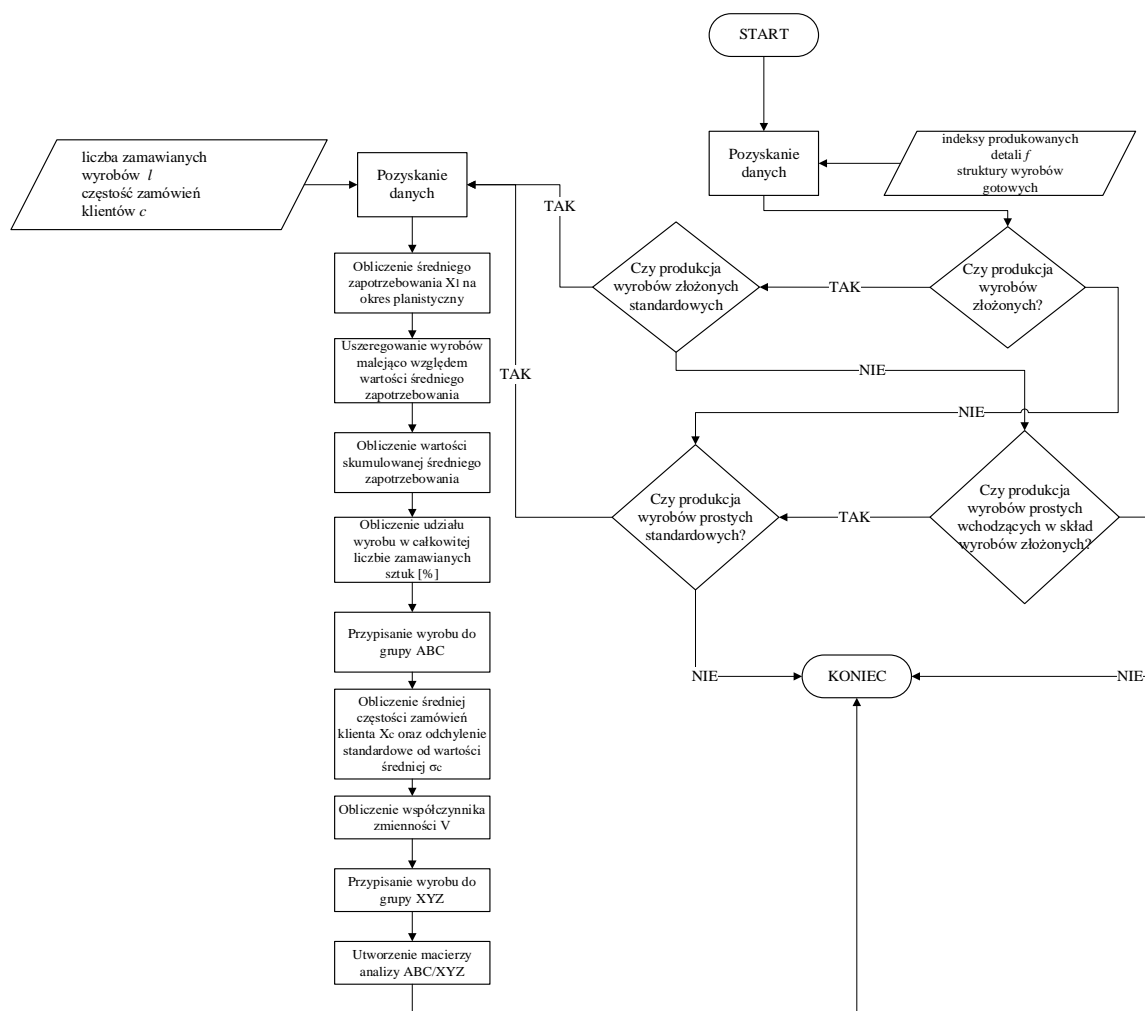
Jednakże w przypadku sprzedaży wyrobów złożonych, dla których przedsiębiorstwo również produkuje wyroby proste, wchodzące w skład wyrobu złożonego, należy wziąć pod uwagę listę materiałową BOM (ang. *Bill Of Materials*) wyrobu złożonego. W rzeczywistości produkcyjnej można spotkać się z następującymi sytuacjami:

- produkcja standardowych wyrobów złożonych *o*, na które składają się standardowe wyroby proste – w takim przypadku, ze względu na powtarzalność produkcji, poziomowanie może być zastosowane zarówno w przypadku wyrobów złożonych jak i wyrobów prostych,
- produkcja kastomizowanych wyrobów złożonych (np. według ATO – *Assembly To Order*, montaż na zamówienie), na które składają się standardowe wyroby proste – w takim przypadku zastosowanie produkcji poziomowanej dla wyrobów złożonych nie jest możliwe, ponieważ jak wskazano w założeniach pracy, metodyka może być stosowana w przypadku produkcji seryjnej. Jednakże w przypadku produkcji standardowych wyrobów prostych, które produkowane są seryjnie, metodyka ma zastosowanie,
- produkcja kastomizowanych wyrobów złożonych, na które składają się zindywidualizowane wyroby proste – w tym przypadku produkcja poziomowana nie będzie miała zastosowania, zarówno dla wyrobów złożonych jak i prostych ze względu na brak powtarzalności produkcji.

Powyższe przypadki mają zastosowanie nie tylko w sytuacji kiedy wyroby są zamawiane przez klienta zewnętrznego *kz*, ale także klienta wewnętrznego *kw*. W przypadku wyrobów produkowanych w ramach różnych wydziałów produkcyjnych możliwa jest produkcja elementów, wykorzystywanych następnie na innych wydziałach. Najczęściej taka sytuacja ma miejsce w przypadku produkcji wyrobów prostych, które następnie wchodzi w skład wyrobów złożonych (np. proces produkcji części, a następnie ich montażu). W takich przypadkach występować może pierwsza lub druga sytuacja opisana powyżej.

Warto w tym miejscu nadmienić, iż analiza ABC/XYZ, jak i poziomowanie produkcji powinny być przeprowadzone oddzielnie dla wyrobów produkowanych według różnych harmonogramów produkcji. Zasada ta dotyczy przede wszystkim wyrobów prostych.

Ogólny algorytm ukazujący poszczególne etapy pierwszego kroku metodyki pokazany jest na rysunku 3.5.



Rysunek 3.5 Algorytm podziału wyrobów na grupy (pierwszy etap metodyki), opracowanie własne

W dalszej części rozdziału przedstawiono przykład wykonania analizy ABC/XYZ dla danych symulacyjnych. Na bazie poniższych danych będą również przedstawione

kolejne etapy metodyki, tak aby zachować ciągłość w prezentowaniu realizacji całej metodyki.

Na potrzeby przykładu przyjęto dane dotyczące liczby sztuk zamawianych przez klientów dla 10 wyrobów (A-J) z okresu 1 roku w ujęciu miesięcznym (tabela 3.1), a obliczenia będą wykonywane w skali dnia roboczego, przy czym przyjmuje się, że liczba dni roboczych w miesiącu wynosi 20. Dla wyrobów A-J obliczane jest średnie miesięczne zapotrzebowanie na wyroby \bar{x}_i oraz przeprowadza się szeregowanie wyrobów od najwyższego średniego zamówienia. W dalszej kolejności oblicza się średnie zapotrzebowanie dzienne, wielkość skumulowaną zamawianej liczbie wyrobów oraz udział procentowy w całkowitej wielkości zamówień (tabela 3.2).

Tabela 3.1 Liczba sztuk w zamówieniach klientów na wyroby A-J w 12 kolejnych miesiącach, opracowanie własne

Miesiąc/ Wyrób	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1000	1200	1500	1100	1000	2000	800	1000	700	300	2000	100
B	200	150	200	500	300	700	100	200	150	200	300	400
C	500	300	400	800	500	300	100	400	500	900	100	500
D	1200	800	1000	600	2000	1000	1500	700	1000	600	1000	1400
E	50	100	300	50	50	50	100	50	50	50	100	150
F	400	250	300	450	350	500	350	350	300	150	600	400
G	550	600	750	600	300	800	600	1000	200	500	600	700
H	600	800	700	550	400	50	900	700	550	400	700	600
I	400	1200	800	500	700	800	600	400	500	700	600	800
J	2000	1000	1200	1800	1000	1500	1600	1200	1200	900	2000	120

Tabela 3.2 Przypisanie wyrobów A-J do grup ABC, opracowanie własne

Wyrób	Średnie zapotrzebowanie miesięczne [szt./miesiąc]	Średnie zapotrzebowanie dzienne [szt./dzień]	Wartość skumulowana zapotrzebowania dziennego [szt./dzień]	Udział wyrobu w całkowitej liczbie zamawianych sztuk [%]	Grupa ABC
J	1294	65	65	19,9	A
D	1067	54	119	36,4	A
A	1059	53	172	52,6	A
I	667	34	206	63,0	A
G	600	30	236	72,2	A
H	580	29	265	81,0	B
C	442	23	288	88,1	B
F	367	19	307	93,9	B
B	284	15	322	98,5	C
E	92	5	327	100,0	C
SUMA	6452	327	-	-	-

Kolejnym krokiem etapu jest wykonanie analizy XYZ. W pierwszej kolejności są przygotowywane dane dotyczące częstości zamówień klientów c w czasie 1 roku w ujęciu miesięcznym (tabela 3.3).

Następnie obliczana jest średnia częstość zamówień klienta \bar{x}_c oraz odchylenie standardowe od wartości średniej σ_c . W dalszej kolejności oblicza się współczynnik zmienności V (wzór 1) oraz przyporządkowuje się wyrób do kategorii X, Y lub Z (tabela 3.4). Przyjęto wartości współczynnika zmienności dla klasyfikacji XYZ według tabeli 1.2.

Tabela 3.3 Liczba zamówień klientów c wyrobów A-J w 12 kolejnych miesiącach, opracowanie własne

Miesiąc/ Wyrób	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	100	4	100	100	50	4	12	10	20	10	42	10
B	90	6	6	60	3	3	6	7	34	5	6	4
C	90	20	6	80	90	9	10	9	60	5	4	80
D	4	4	21	31	80	9	20	20	32	50	40	40
E	12	10	15	8	5	10	8	8	6	20	17	10
F	30	4	4	100	5	30	2	4	6	3	25	2
G	22	15	21	31	31	9	20	20	15	14	12	12
H	60	75	100	10	45	98	65	65	45	20	63	10
I	30	40	32	42	18	44	23	43	87	45	42	12
J	81	60	18	31	38	90	25	45	32	87	49	63

Tabela 3.4 Przypisanie wyrobów A-J do grup XYZ, opracowanie własne

Wyrób	Średnia dzienna liczba zamówień	Odchylenie standardowe	Współczynnik zmienności V	Grupa XYZ
A	1,78	1,99	1,12	Z
B	0,88	1,41	1,59	Z
C	1,78	1,88	1,05	Z
D	1,35	1,08	0,80	Y
E	0,5	0,23	0,46	X
F	0,83	1,41	1,70	Z
G	0,85	0,36	0,42	X
H	2,52	1,51	0,60	Y
I	1,76	0,95	0,54	Y
J	2,38	1,23	0,52	Y

W wyniku analizy ABC oraz XYZ powstaje macierz o wymiarach 3x3, która dzieli produkowane wyroby na 9 grup, od grupy AX (wyroby najczęściej sprzedawane i o największej wartości), do CZ (wyrobu rzadko sprzedawanych, o niewielkiej wartości). Według koncepcji poziomowania produkcji, do dalszej analizy powinny być wybrane wyroby o największej oraz najczęstszej sprzedaży. Zakłada się zatem, że wyroby znajdujące się w grupach AX, AY oraz BX spełniają powyższe kryterium. Wyroby z grup AZ, BY oraz CX są wyrobami, które np. jeśli produkowane są dla klienta kluczowego lub są to wyroby wchodzące na rynek, dla których prognozuje się wzrost częstości lub

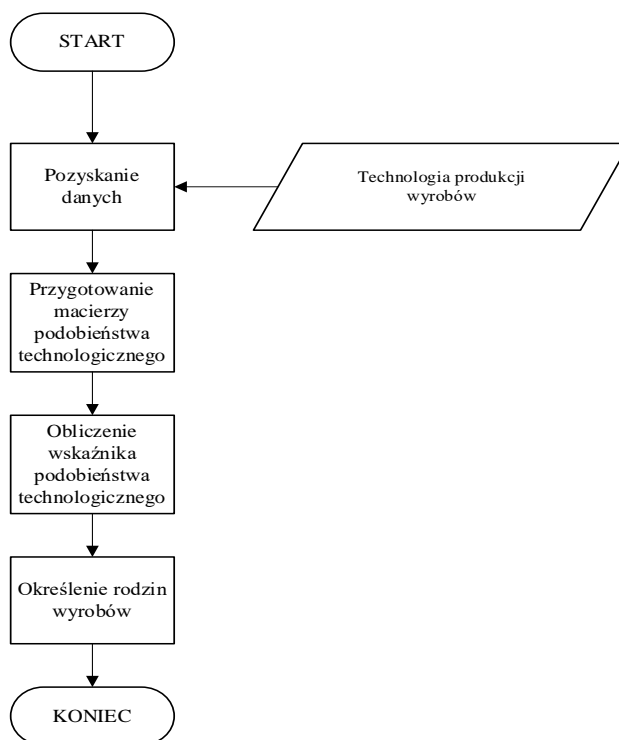
wielkości sprzedaży również mogą być brane pod uwagę przy poziomowaniu produkcji. Natomiast wyroby z grup BZ, CY oraz CZ są produkowane w małych ilościach i z dużą zmiennością zamówień w związku z czym nie powinny być brane pod uwagę przy wprowadzaniu poziomowania produkcji. Podsumowanie otrzymanych wyników w przykładzie przedstawia tabela 3.5.

Tabela 3.5 Przepisanie wyrobów A-J według analizy ABC/XYZ, opracowanie własne

Grupa	X	Y	Z
A		D, H, J, I,	A,
B	G, E		C, F, B,
C			

3.5.3. Podział wyrobów z grupy priorytetowej na rodziny

W tym etapie stosuje się macierz podobieństwa technologicznego wyrobów. Analizę rozpoczyna się od pozyskania danych dotyczących technologii wykonywania wyrobów, które zostały przypisane do grupy priorytetowej. Następnie przygotowuje się macierz, w której wiersze reprezentują poszczególne wyroby z grupy priorytetowej, natomiast kolumny reprezentują stanowiska produkcyjne K_x^0 , na których produkowane są wyroby. Jeśli stanowiska produkcyjne są zgrupowane w gniazdach technologicznych, kolumny w takim przypadku będą reprezentowały właśnie gniazda technologiczne a niekoniecznie pojedyncze stanowiska. W przypadku organizacji liniowej lub w formie gniazd przedmiotowych, automatycznie wyroby na nich produkowane trafiają do jednej rodziny wyrobów i nie ma konieczności wykonywania dla tych wyrobów macierzy. Ogólny algorytm przedstawiający etapy realizacji tego punktu metodyki przedstawia rysunek 3.6.



Rysunek 3.6 Algorytm określania rodzin wyrobów (drugi etap metodyki), opracowanie własne

Wyznaczenie rodzin wyrobów ma kluczowe znaczenie przy obliczeniu wskaźnika EPEI, a także w dalszej części przy budowie harmonogramów produkcji. Przy znacznej liczbie wyrobów w grupie priorytetowej lub przy produkcji liniowej bądź w gniazdach przedmiotowych, możliwe jest tworzenie harmonogramów produkcji dla rodzin wyrobów, a nie pojedynczych indeksów.

Na potrzeby przykładu przyjęto 4 stanowiska produkcyjne $K_1^0, K_2^0, K_3^0, K_4^0$, na których produkowane są wyroby z grupy priorytetowej: D, F, G, H, I, J. Tabela d pokazuje macierz podobieństwa technologicznego dla analizowanego przykładu.

Tabela 3.6 Macierz podobieństwa technologicznego wyrobów z grupy priorytetowej, opracowanie własne

Stanowisko/ Wyrób	K_1^0	K_2^0	K_3^0	K_4^0
D	1	1	0	0
E	1	0	1	0
G	1	1	0	0
H	1	0	1	0
I	0	1	1	0
J	0	1	1	1

W powyższej macierzy podobieństwo technologiczne wykazują wyroby D i G oraz E i H. W przypadku wyrobów I i J podobieństwo technologiczne nie jest jasne. W związku z tym, należy skorzystać ze wskaźnika podobieństwa technologicznego wyrobów (wzór 2).

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^{j=r_r} X_{i,j} * X_{k,j}}{\min(\sum_{j=1}^{j=r_r} X_{i,j}; \sum_{j=1}^{j=r_r} X_{k,j})} = \frac{0*0+1*1+1*1+1*0}{\min(3;2)} = \frac{2}{2} = 1$$

Zatem wyroby I oraz J wskazują podobieństwo technologiczne i mogą należeć do jednej rodziny wyrobów. Jak wspomniano w części literaturowej rozprawy, w przypadku wartości wskaźnika większego od 0,8 można uznać podobieństwo technologiczne wyrobów.

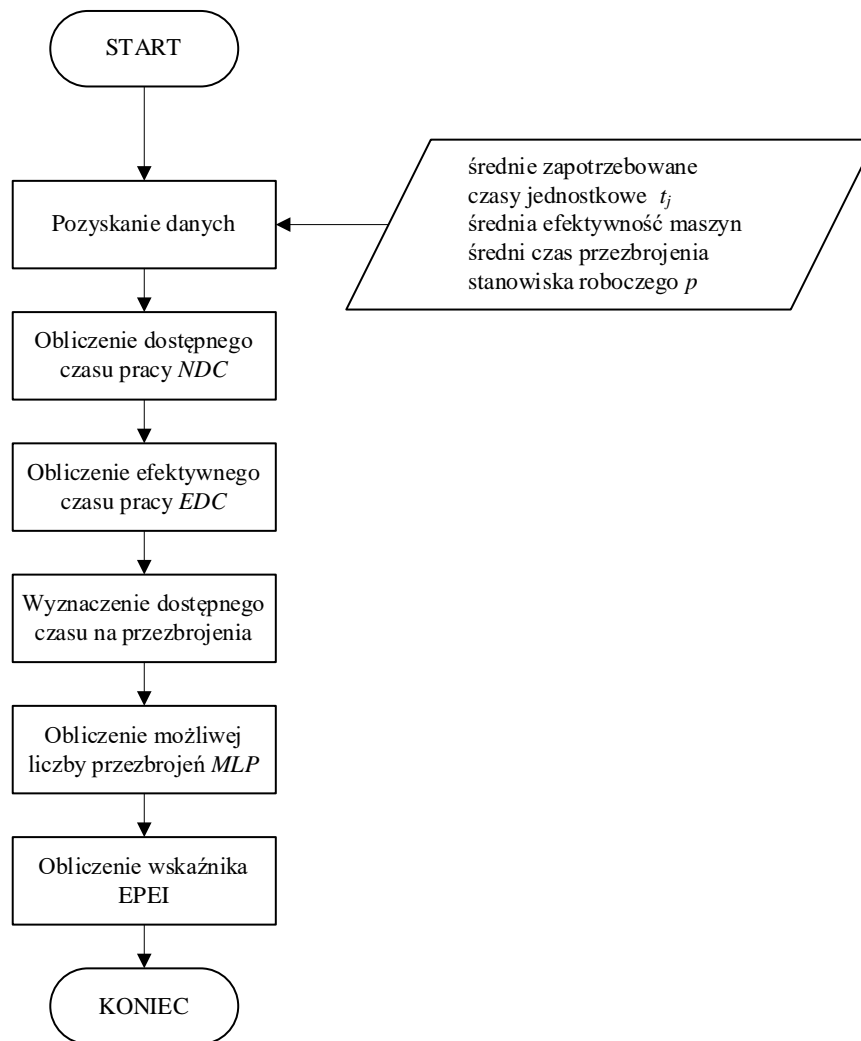
3.5.4. Wyznaczenie częstości uzupełniania zapasów w magazynie

Wskaźnik EPEI informuje o tym, jak często możliwe jest wytworzenie każdego spośród wszystkich wyrobów. Jednocześnie wskaźnik w opisywanej metodyce służy do wyznaczenia najmniejszej z możliwej liczności partii produkowanych wyrobów. Dla przykładu, jeśli wartość wskaźnika jest równa 0,5 to oznacza, że potrzeba 0,5 okresu (np. zmiany roboczej) aby wyprodukować wszystkie zakładane wyroby. Wskaźnik EPEI jest obliczany dla stanowisk produkcyjnych K_x^0 (lub grupy stanowisk, np. w przypadku gniazda technologicznego), a następnie wyznaczany jest wskaźnik dla całego procesu i jest to największa spośród uzyskanych wartości.

Analizę rozpoczyna się od pozyskania danych dotyczących:

- średniego zapotrzebowania w analizowanym okresie \bar{x}_l (np. jednego dnia). Okres jest w dużej mierze zależny od: czasu wytworzenia jednej sztuki wyrobu oraz od częstości zamówień klientów,
- czasów jednostkowych wytworzenia wyrobów t_j ,
- średniej efektywności maszyn, wyrażonej w procentach. Efektywność maszyn często obliczana jest za pomocą wskaźnika OEE,
- średniego czasu przebrojenia stanowiska roboczego p .

Następnie wykonuje się obliczenia dotyczące dostępnego i efektywnego czasu pracy, możliwej liczby przebrojeń oraz w efekcie wskaźnika EPEI. Ogólny algorytm wykonania kroku trzeciego metodyki pokazuje rysunek 3.7.



Rysunek 3.7 Algorytm obliczenia wskaźnika EPEI (trzeci etap metodyki), opracowanie własne

Na poniższym przykładzie pokazano sposób obliczenia wskaźnika EPEI dla stanowiska 1 K_1^0 . Natomiast wartości wskaźnika EPEI dla pozostałych stanowisk znajdują się pod przykładem obliczeniowym.

Na potrzeby przykładu przyjęto następujące dane produkcyjne dla wyrobów D, E, G, H (tabela 3.7).

Tabela 3.7 Dane produkcyjne przyjęte dla przykładu, opracowanie własne

Wyroby	D	G	E	H
Średnie zapotrzebowanie \bar{x}_i [sztuk/dzień]	54	30	5	29
Czas t_j [h]	0,02	0,02	0,09	0,03
Czas realizacji zapotrzebowania [h/dzień]	1,08	0,06	0,45	0,87
Czas realizacji zapotrzebowania dla rodziny wyrobów OP_i [h/dzień]	1,14		1,32	
Średni czas przezbrojenia p [h]	0,25			

Kroki postępowania:

1. Obliczenie dostępnego czasu pracy. Dostępny czas pracy jest to czas nominalny pracy pomniejszony o zakładane przerwy w pracy. Dostępny czas pracy powinien być zbieżny z czasem brany pod uwagę przy wyznaczaniu średniego zapotrzebowania. Jeśli średnie zapotrzebowanie jest przyjęte na zmianę roboczą, to również dostępny czas pracy będzie zmianą roboczą. Jeśli jednak średnie zapotrzebowanie jest w okresie tygodnia, to dostępny czas pracy również będzie wyrażony w tygodniach. Na potrzeby przykładu przyjęto czas zmiany roboczej 8 godzin, 0,5 godziny czasu przerw i liczbę zmian równą 1.

$$NDC = (t_p - t_{zp}) * LZ = (8 - 0,5) * 1 = 7,5 \text{ godzin/dzień}$$

2. Obliczenie efektywnego czasu pracy. Efektywny czas pracy jest to czas dostępny z uwzględnieniem średniej efektywności maszyny (lub grupy maszyn). Na potrzeby przykładu przyjęto wskaźnik OEE na poziomie 80%.

$$EDC = NDC * OEE = 7,5 * 80\% = 6 \text{ godzin/dzień}$$

3. Wyznaczenie dostępnego czasu na przezbrojenia.

$$t_{c/o}^x = EDC - \sum_{i=1}^{nx} OP_i = 6 \frac{\text{godzin}}{\text{dzień}} - 2,46 \frac{\text{godzin}}{\text{dzień}} = 3,54 \text{godzin/dzień}$$

W tym punkcie możliwe jest również zawarcie innych czasów zmniejszających dostępny czas na przezbrojenia, np. czasu na produkcję zleceń pilnych lub zleceń na wyroby niestandardowe, obowiązkowych spotkań, czy szkoleń.

4. Obliczenie możliwej liczby przezbrojeń na danym stanowisku pracy.

$$MPL_x = \frac{t_{c/o}^x}{t_{c/o}} = \frac{3,54 \text{godzin/dzień}}{0,25 \text{godzin}} = 14,6 = 14$$

5. Obliczenie wskaźnika EPEI dla stanowiska 1, które uwzględnia możliwą liczbę przezbrojeń oraz liczbę pozycji asortymentowej, produkowanej na stanowisku.

$$EPEI = \frac{LPA_x}{MPL_x} = \frac{4}{14} = 0,28$$

Otrzymana wartość wskaźnika EPEI oznacza, że potrzeba 0,28 dnia roboczego aby wyprodukować zakładane wyroby.

Obliczenia wskaźnika EPEI dla pozostałych stanowisk obrazują poniższe tabele (3.8, 3.9).

Tabela 3.8 Wartość wskaźnika EPEI dla stanowiska 2, opracowanie własne

Wyroby	D	G	I	J
Średnie zapotrzebowanie \bar{x}_i [sztuk/dzień]	54	30	34	65
Czas t_j [h]	0,02	0,02	0,04	0,02
Czas realizacji zapotrzebowania [h/dzień]	1,08	0,06	1,36	1,3
Czas realizacji zapotrzebowania dla rodziny wyrobów OP_i [h/dzień]	1,14		2,66	
Średni czas przebrojenia p [h]	0,25			
Dostępny czas pracy NDC [h/dzień]	7,5			
Efektywny czas pracy EDC [h/dzień]	6			
Dostępny czas na przebrojenia $t_{C/O}^x$ [h/dzień]	2,2			
Możliwa liczba przebrojeń MPL	8			
Wskaźnik EPEI	0,5			

Tabela 3.9 Wartość wskaźnika EPEI dla stanowiska 3, opracowanie własne

Wyroby	E	H	I	J
Średnie zapotrzebowanie \bar{x}_i [sztuk/dzień]	5	29	34	65
Czas t_j [h]	0,09	0,03	0,04	0,02
Czas realizacji zapotrzebowania [h/dzień]	0,45	0,87	1,36	1,3
Czas realizacji zapotrzebowania dla rodziny wyrobów OP_i [h/dzień]	1,32		2,66	
Średni czas przebrojenia p [h]	0,25			
Dostępny czas pracy NDC [h/dzień]	7,5			
Efektywny czas pracy EDC [h/dzień]	6			
Dostępny czas na przebrojenia $t_{C/O}^x$ [h/dzień]	2,02			
Możliwa liczba przebrojeń MPL	8			
Wskaźnik EPEI	0,5			

Dla stanowiska 4 nie ma konieczności obliczania wskaźnika EPEI ponieważ, tylko wyrób J jest na nim produkowany, a więc nie będą występować przebrojenia.

Dla podanego przykładu wartość wskaźnika EPEI dla całego procesu wynosi 0,5, ponieważ jest to największa wartość w procesie.

W rzeczywistości produkcyjnej można spotkać się z następującymi wartościami wskaźnika EPEI:

- wartość 0-1. Wartość 1 oznacza, że potrzeba 1 okresu, żeby wyprodukować na danym stanowisku wszystkie zakładane wyroby. W tym przypadku możliwa liczba przebrojeń jest równa liczbie pozycji asortymentowych produkowanych na tym stanowisku. A więc liczba sztuk w partii produkcyjnej jest równa średniemu zapotrzebowaniu na wyroby. Jeśli wartość jest mniejsza od 1 (ale większa od 0) oznacza to, że jest możliwe wykonanie większej liczby przebrojeń w danym okresie, a więc liczba sztuk w partii produkcyjnej może być mniejsza niż średnie zapotrzebowanie w danym okresie. Jeśli wartość EPEI jest równa 0,5 to oznacza, że

można wykonać 2 razy więcej przebrojeń, a więc również zmniejszyć licznosc każdej partii produkcyjnej o połowę.

- wartość >1 . Wartości powyżej 1 oznaczają, że nie jest możliwe wyprodukowanie wszystkich zakładanych wyrobów w podanym okresie. Na przykład wartość 2 oznacza, że potrzeba 2 okresów, żeby wyprodukować zakładane wyroby. Sytuacja najczęściej ma miejsca w przedsiębiorstwach, które otrzymują więcej zamówień niż są w stanie wyprodukować. W tej sytuacji konieczne staje się posiadanie znacznych zapasów wyrobów gotowych, podjęcie współpracy z poddostawcami lub podjęcie działań inwestycyjnych rozbudowujących obecny park maszynowy.
- wartość <0 . Wartość poniżej 0 występuje wtedy, kiedy dostępny czas na przebrojenia ma wartość poniżej 0. Nie jest wówczas możliwe stwierdzenie, ile okresów potrzeba aby zrealizować zakładaną produkcję wyrobów. W tym przypadku należy zwielokrotnić dostępny czas pracy aż do uzyskania dodatniej wartości wskaźnika. Interpretacja wskaźnika odnosi się wtedy do okresu, który został zwiększony, na przykład, jeśli wartość wskaźnika wynosi 2, a dostępny czas pracy z jednej zmiany roboczej został zwiększony do dwóch, to oznacza, że potrzeba 4 zmian roboczych aby w pełni zrealizować zakładane zapotrzebowanie na wyroby. W takiej sytuacji również, jak w poprzednim punkcie, konieczne stają się inwestycje lub zwiększone stany magazynowe.

3.5.5. Wyznaczenie wielkości zapasów w magazynie wyrobów gotowych

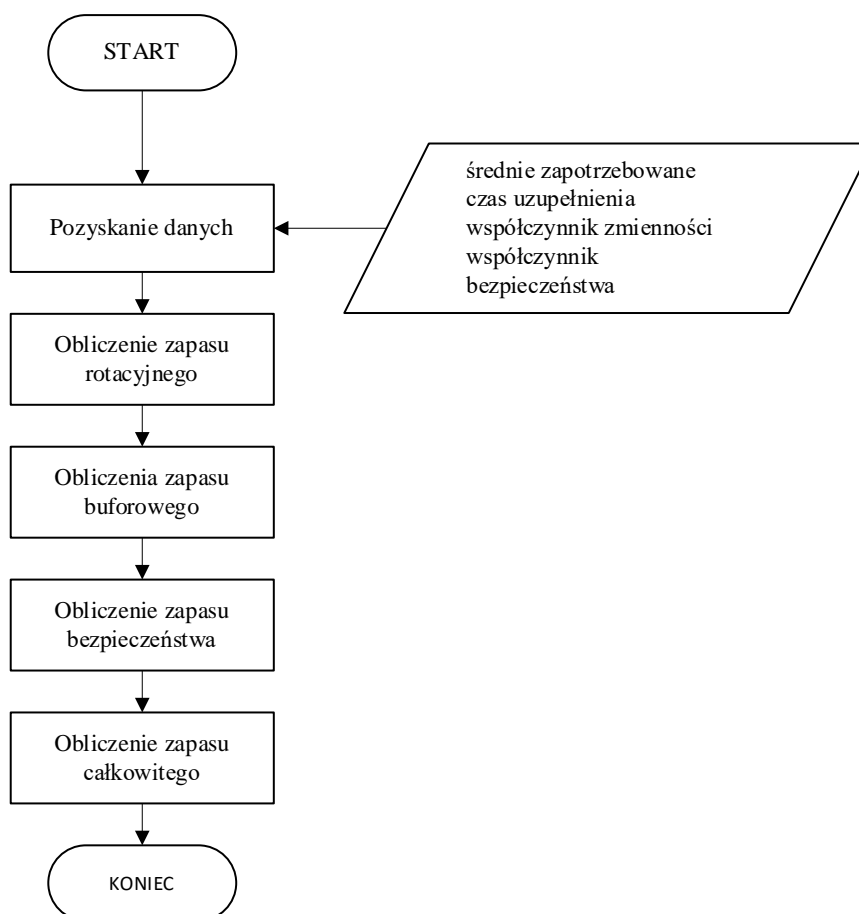
Etap czwarty jest niezwykle istotny, ponieważ założeniem metodyki jest realizacja bieżących zamówień klienta z magazynu, bez konieczności wprowadzania zmian w harmonogramie produkcji. Zdecydowano, że magazyn wyrobów gotowych, będzie zorganizowany według zasad stosowanych w przypadku supermarketu.

Ogólny algorytm wykonania kroku czwartego metodyki pokazuje rysunek 3.8.

Dla zachowania ciągłości przykładu zapas całkowity zostanie obliczony dla wyrobów D, E, G i H. Tabela 3.10 prezentuje kroki obliczeń poszczególnych rodzajów zapasów.

Tabela 3.10 Dane produkcyjne, opracowanie własne

Wyrób	Średnie zapotrzebowanie \bar{x}_i [szt./dzień]	Czas uzupełnienia [dzień]	Zapas rotujący [szt.]	Współczynnik zmienności V_s	Zapas buforowy [szt.]	Współczynnik bezpieczeństwa [%]	Zapas bezpieczeństwa [szt.]	Zapas całkowity [szt.]
D	54	0,5	27	0,8	15	20	9	51
E	5	0,5	3	0,46	1	20	1	5
G	30	0,5	15	0,42	6	20	5	26
H	29	0,5	15	0,6	8	20	5	28
I	34	0,5	17	0,54	9	20	6	32
J	65	0,5	33	0,52	14	20	10	57



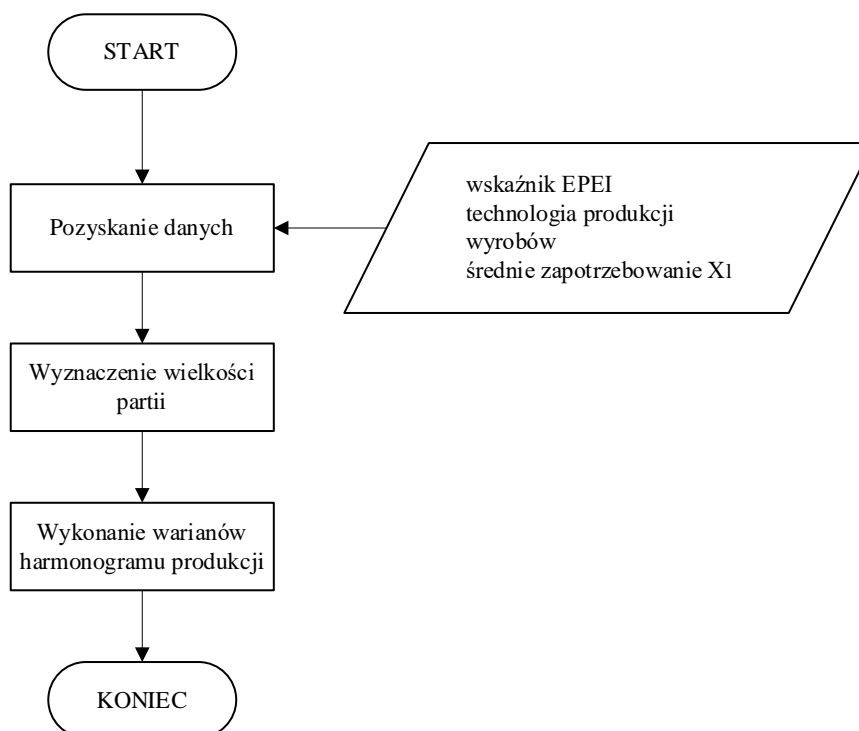
Rysunek 3.8 Algorytm obliczeń zapasu całkowitego (etap czwarty metodyki), opracowanie własne

Wyznaczenie zapasu rotującego odbywa się poprzez pomnożenie średniego zapotrzebowania \bar{x}_l i czasu uzupełnienia. Czasem uzupełnienia jest wartość wskaźnika EPEI, obliczonego dla danego stanowiska (lub grupy stanowisk) wytwarzającego dany wyrób. Wyznaczenie zapasu buforowego odbywa się poprzez pomnożenie zapasu rotującego i współczynnika zmienności V . Współczynnik zmienności dla każdego z wyrobów został wyznaczony w punkcie pierwszym metodyki – podział wyrobów na grupy. Wyznaczenie zapasu bezpieczeństwa odbywa się poprzez dodanie zapasu rotującego i buforowego a następnie pomnożenie tej sumy i współczynnika bezpieczeństwa. Współczynnik bezpieczeństwa jest zależny od wielu czynników, m.in. poziomu wyrobów niezgodnych, czy częstości awarii. Na potrzeby przykładu przyjęto współczynnik bezpieczeństwa na poziomie 20%. Wyznaczenie zapasu całkowitego odbywa się poprzez zsumowanie zapasu rotującego, buforowego i bezpieczeństwa.

Aby wprowadzić produkcję poziomowaną według zaprezentowanej metodyki, w magazynie powinno znaleźć się tyle wyrobów ile wskazuje wartość zapasu całkowitego. Jest to niezbędne dla prawidłowego funkcjonowania procesu, w którym głównym założeniem jest realizacja zamówień klientów z magazynu wyrobów gotowych.

3.5.6. Opracowanie wariantów harmonogramu produkcji

Ogólny algorytm opracowania wariantów harmonogramu produkcji przedstawia rysunek 3.9.



Rysunek 3.9 Ogólny algorytm wykonania wariantów harmonogramu produkcji (piąty etap metodyki), opracowanie własne

Ponieważ metodyka poziomowania produkcji dotyczy w szczególności harmonogramowania produkcji nieukierunkowanej tzw. job-shop zdecydowano, że harmonogram będzie przybierał postać przebiegu szeregowego. Wielkość partii produkcyjnej oraz częstość powtórzeń produkcji partii wyrobów wyznacza się według możliwej liczby przebrojeń oraz wskaźnika EPEI. Oznacza to, że:

1. jeżeli możliwa liczba przebrojeń MPL_x będzie równa liczbie pozycji asortymentowych danej rodziny wyrobów LPA_x (wskaźnik EPEI = 1) to wielkość partii produkcyjnej będzie równa średniemu zapotrzebowaniu na wyroby \bar{x}_l w obliczeniowej jednostce czasu (dzień, tydzień, miesiąc, itd.). W takim przypadku częstość powtórzeń produkcji partii wyrobów będzie wynosiła 1 jednostkę czasu.
1. jeżeli możliwa liczba przebrojeń MPL_x będzie większa od liczby pozycji asortymentowych danej rodziny wyrobów LPA_x (wskaźnik EPEI mieści się w przedziale (0; 1)) to można rozdzielić partie produkcyjne na mniejsze, według zasady:
 - a. wskaźnik EPEI mieści się w zakresie (0; 0,25> to można podzielić partie produkcyjne wszystkich produkowanych wyrobów na 4 lub więcej mniejszych partii. Na przykład jeśli liczba sztuk do wyprodukowania pewnego wyrobu równa się 100, a wskaźnik EPEI wynosi 0,25 to można ją

podzielić na cztery mniejsze partie po 25 sztuk w każdej z nich. W takim przypadku częstość powtórzeń partii wyrobów będzie równa 0,25 jednostek czasu. Natomiast jeśli wskaźnik EPEI wynosi 0,1 to takich partii może być aż 10. Największą możliwą liczbę partii (NMLP) można również wyznaczyć ze wzoru:

$$NMLP = 1/EPEI$$

przy czym obliczoną wartość należy zaokrąglić do dołu. W ten sposób można otrzymać największą możliwą liczbę partii.

- b. wskaźnik EPEI mieści się w zakresie (0,25; 0,5> to można podzielić partie produkcyjne wszystkich produkowanych wyrobów na 2 lub 3 mniejsze partie (np. jeśli liczba sztuk do wyprodukowania pewnego wyrobu równa się 100 to można ją podzielić na dwie mniejsze partie po 50 sztuk w każdej z nich). W takim przypadku częstość powtórzeń partii wyrobów będzie równa 0,5 jednostki czasu. W tym przypadku można również skorzystać z powyżej wyjaśnionego wzoru na największą możliwą liczbę partii.
- c. wskaźnik EPEI mieści się w zakresie (0,5; 1) to można podzielić partie produkcyjne wybranych wyrobów na mniejsze, według zasady, że w pierwszej kolejności należy rozdzielić na mniejsze partie wyroby, których sumaryczny czas realizacji zapotrzebowania będzie najdłuższy. Liczba wyrobów, które można podzielić na partie (LW) będzie równa:

$$LW_x = MPL_x - LPA_x \quad (15)$$

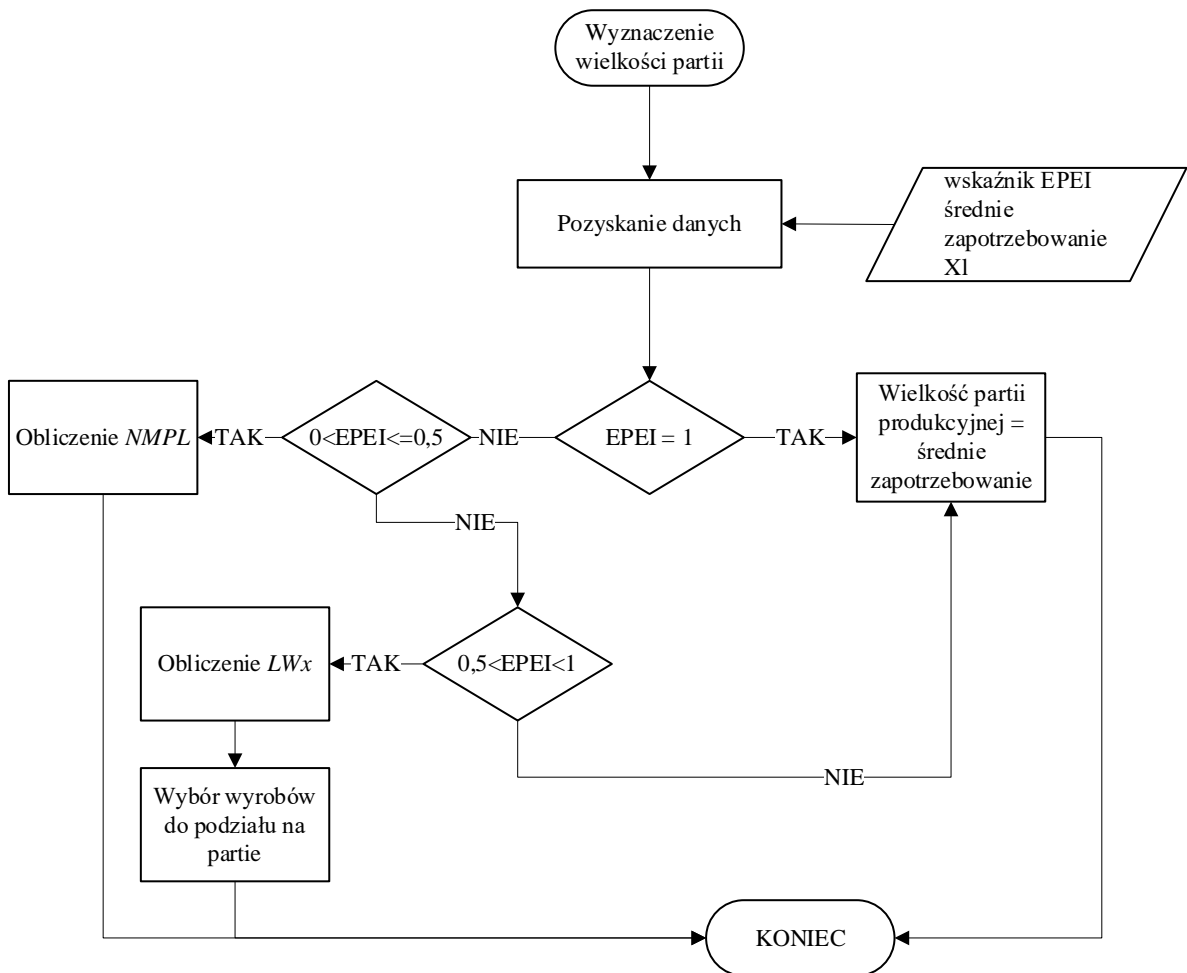
W takim przypadku częstość powtórzeń partii wyrobów może być różna dla każdego z nich.

2. jeżeli możliwa liczba przebrojeń MPL_x będzie mniejsza niż liczba pozycji asortymentowych danej rodziny wyrobów LPA_x (wskaźnik EPEI > 1) to wielkość partii produkcyjnej będzie równa średniemu zapotrzebowaniu na wyroby \bar{x}_i w obliczeniowej jednostce czasu (dzień, tydzień, miesiąc, itd.), z tym, że produkcja nie będzie w stanie zaspokoić wymagań klienta (wyjaśnienie: patrz: punkt EPEI).

Algorytm wyboru wielkości partii pokazany jest na rysunku 3.10.

Po wskazaniu wielkości partii produkcyjnej oraz częstości powtórzeń produkcji partii wyrobów wykonuje się 2 warianty harmonogramu produkcji. Wariant 1 jest wariantem, w którym w zależności od wyniku wskaźnika EPEI następuje podział na partie. Harmonogram realizowany jest według cyklu szeregowego, przy czym jednostką harmonogramowania jest partia transportowa wyrobów. W tym przypadku zastosowana została reguła priorytetu „najpierw najdłuższy czas operacyjny”. Wariant 2 jest wariantem w którym, tak samo jak w wariacie 1 zastosowano podział na partie transportowe, przy czym w tym przypadku wybrana została reguła priorytetu „najpierw najkrótszy czas operacyjny”. Powyższe reguły priorytetu wskazano, ponieważ według badań literatury oraz własnych, obie dają najlepsze efekty pod kątem minimalizacji czasu cyklu

wytwarzania C_{max} oraz są często stosowane w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Minimalizacja tego czasu pozwoli w jak największym stopniu spełnić założenia związane z powtarzalnością produkcji w określonych jednostkach czasu.



Rysunek 3.10 Algorytm wyboru wielkości partii, opracowanie własne

W prezentowanym przykładzie produkowanych jest łącznie 10 wyrobów (A-J), z których, w drodze poprzednich analiz, zostało wybranych do produkcji poziomowanej 6. Tabela 3.11 prezentuje procesy technologiczne poszczególnych wyrobów, wraz z liczbą sztuk do wyprodukowania w zakładanym czasie – jednego, ośmiogodzinnego dnia roboczego.

Zgodnie z obliczonym EPEI dla procesu, wynoszącym 0,5 postanowiono, iż wszystkie wyroby będą produkowane w dwóch partiach transportowych. W przypadku wyrobów E, H, oraz J postanowiono, że jedna partia będzie się różniła od drugiej o jeden wyrób, a więc, np. dla wyrobu H, wielkość jednej partii będzie wynosiła 14, a drugiej 15 sztuk. W warunkach produkcyjnych dopuszczalna jest produkcja jednej sztuki wyrobu więcej, aby otrzymać równe partie transportowe.

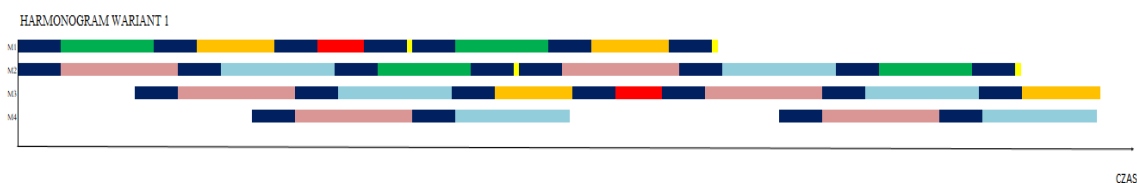
Tabela 3.11 Procesy technologiczne wyrobów wraz z liczbą sztuk do wyprodukowania, opracowanie własne

Wyrób	Liczba sztuk do wyprodukowania [szt.]	Czasy jednostkowe t_j [h]			
		K_1^0	K_2^0	K_3^0	K_4^0
D	54	0,02	0,02	-	-
E	5	0,09	-	0,09	-
G	30	0,02	0,02	-	-
H	29	0,03	-	0,03	-
I	34	-	0,04	0,04	0,04
J	65	-	0,02	0,02	0,02

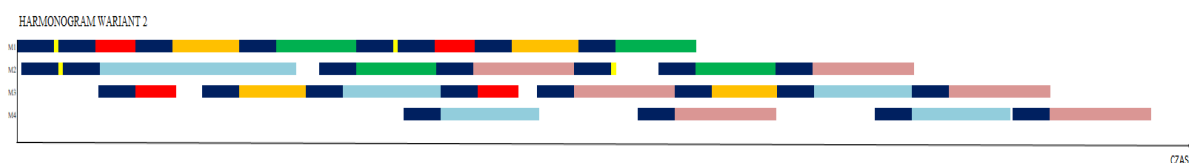
Na rysunku 3.11 przedstawiony został harmonogram wariantu 1 zakładającego produkcję dwóch partii transportowych każdego wyrobu, zgodnie z regułą najpierw najdłuższy czas operacyjny. Podział na 2 partie transportowe nastąpił, ponieważ obliczoną największą możliwą liczbą partii (NMLP) jest 2 (według wzoru 14). Na rysunku 3.12 natomiast przedstawiono harmonogram wariantu 2 zakładającego produkcję dwóch partii transportowych każdego wyrobu, zgodnie z regułą najpierw najkrótszy czas operacyjny.

Legenda:

- M1, M2, M3, M4 – komórki produkcyjne 0 stopnia odpowiednio: $K_1^0, K_2^0, K_3^0, K_4^0$,
- kolor granatowy – przebrojenie maszyny,
- kolor zielony – produkcja wyrobu D,
- kolor czerwony – produkcja wyrobu E,
- kolor żółty – produkcja wyrobu G,
- kolor pomarańczowy – produkcja wyrobu H,
- kolor różowy – produkcja wyrobu I,
- kolor niebieski – produkcja wyrobu J,
- kolor szary – oznaczenie 8 godzin pracy.



Rysunek 3.11 Harmonogram wariantu 1, opracowanie własne

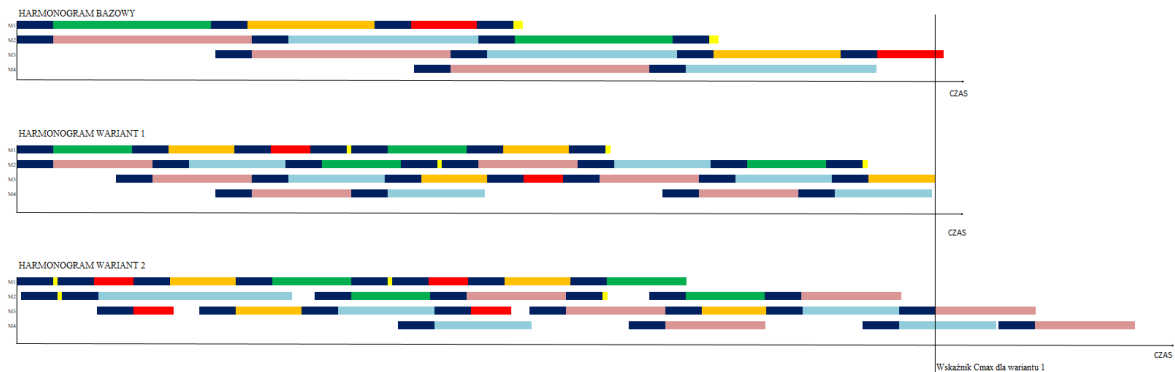


Rysunek 3.12 Harmonogram wariantu 2, opracowanie własne

3.5.7. Wybór wariantu harmonogramu produkcji

W punkcie piątym metodyki zostały przygotowane 2 warianty harmonogramu produkcji poziomowanej. Wybór wariantu odbywa się na podstawie wskaźnika C_{max} . Im wartość C_{max} jest mniejsza, tym założona produkcja zrealizowana będzie szybciej, a przez to szybciej rozpocznie się produkcja kolejnego cyklu produkcji, jak również tym więcej czasu zostanie na produkcję wyrobów nieujętych w poziomowanej produkcji. Wybrany wariant, przy badaniu skuteczności metodyki, zostanie porównany z wariantem bazowym. Wariant bazowy jest to harmonogram produkcji, który zakłada produkcję według harmonogramu szeregowego, a więc bez podziału na mniejsze partie transportowe, a zadaną regułą priorytetu jest reguła najpierw najdłuższy czas przetwarzania.

W analizowanym przykładzie najmniejszą wartością wskaźnika C_{max} cechuje się wariant 1. W związku z tym wariant 1 powinien zostać wskazany do realizacji produkcji. Na rysunku 3.13 została zaznaczona wartość wskaźnika dla wariantu 1 w porównaniu do wariantu 2 i bazowego.



Rysunek 3.13 Wskaźnik C_{max} dla wariantu 1, opracowanie własne

4. Eksperyment symulacyjny

4.1. Założenia i metoda symulacji

W celu weryfikacji przedstawionej metodyki poziomowania produkcji przygotowano eksperyment symulacyjny mający na celu porównanie: wskaźnika rotacji zapasów R i zamówień zrealizowanych na czas D , w przypadku produkcji poziomowanej oraz w przypadku produkcji niepoziomowanej (bazowej). Przygotowano 100 wariantów symulacji. Każdą symulację przeprowadzono według następującego schematu:

1. wygenerowanie danych wejściowych takich jak: liczba pozycji asortymentowych f , liczba stanowisk roboczych, wielkość l i częstość c zamówień historycznych, czas jednostkowy wykonania operacji technologicznych t_j , czas przebrojeń p , itp.,
2. przeprowadzenie etapów MPP, w wyniku czego otrzymane zostały harmonogram produkcji poziomowanej oraz harmonogram bazowy,
3. wygenerowanie, na podstawie wcześniej wygenerowanych danych (zamówienia historyczne) oraz przyszłych zamówień klienta – wielkości l i częstości c zamówień,
4. porównanie wielkości spływu wyrobów z produkcji z zamówieniami klienta oraz wskazanie: średniej liczby wyrobów w magazynie $f_{mag,śr}$, całkowitej liczby wyrobów w zrealizowanych zamówieniach l_r , liczby zamówień zrealizowanych w_r ,
5. obliczenie wskaźnika rotacji zapasów R i zamówień zrealizowanych na czas D w przypadku produkcji poziomowanej oraz bazowej.

Symulację przeprowadzono w programie MS Excel. Przygotowano w tym celu: generator danych wejściowych, formularz do przeprowadzenia etapów metodyki poziomowania produkcji, generator przyszłych zamówień klienta oraz formularz do wyznaczenia średniej liczby wyrobów w magazynie, całkowitej liczby wyrobów w zrealizowanych zamówieniach, liczby zamówień zrealizowanych oraz obliczenia wskaźnika rotacji zapasów i zamówień zrealizowanych na czas. Sposób przeprowadzenia symulacji przedstawiony został na przykładzie w punkcie 4.2.

Przyjęto następujące założenia:

1. liczba pozycji asortymentowych f jest losowana z przedziału liczb całkowitych $\langle 2; 10 \rangle$,
2. liczba stanowisk roboczych K_x^0 jest losowana z przedziału liczb całkowitych $\langle 1; 10 \rangle$,
3. wielkość średnia \bar{x}_l zamówień historycznych klienta dla każdego wyrobu jest losowana z przedziału liczb całkowitych $\langle 10; 100 \rangle$ przy założeniu, że liczby narastają co 10, natomiast odchylenie standardowe σ_l od wielkości zamówień jest losowane z przedziału $\langle 10; 100 \rangle$, przy założeniu, że liczby narastają co 10,

4. częstość średnia \bar{x}_c zamówień jest losowana z przedziału liczb całkowitych $\langle 1; 5 \rangle$, natomiast odchylenie standardowe σ_c od częstości zamówień jest losowane w przedziału $\langle 0,5; 10 \rangle$,
5. czas jednostkowy wykonania operacji technologicznych t_j (w godzinach) jest losowany z przedziału $\langle 0,01; 0,2 \rangle$, przy założeniu, że liczby narastają co 0,01,
6. średni czas przebrojeń p jest losowany dla wszystkich stanowisk z przedziału $\langle 0,1; 0,5 \rangle$ przy założeniu, że liczby narastają co 0,1,
7. liczba operacji technologicznych e oraz przypisanie operacji technologicznych do stanowisk jest generowane losowo,
8. jednostka czasu wykonania produkcji i wykonania harmonogramu jest równa 40 godzinom pracy (tygodniowi roboczemu),
9. dostępny czas pracy równy 37,5 godziny, średnia efektywność maszyn równa 80%,
10. zapas czas na produkcję zleceń pilnych/niestandardowych to 4 godziny w tygodniu,
11. w chwili rozpoczęcia eksperymentu, w magazynie wyrobów gotowych znajduje się tyle wyrobów ile zostało obliczonych przy zapasie całkowitym,
12. współczynnik bezpieczeństwa wynosi 20%,
13. przyszłe zamówienia klienta generowane na 20 dni (4 tygodnie robocze), przy czym zamówienia na każdy dzień losowane są z rozkładu normalnego, zgodnie z wcześniej wylosowanymi danymi dotyczącymi wielkości zamówień historycznych.

W załączniku 1 zawarto dane wejściowe dla wszystkich stu symulacji.

4.2. Przykład wykonania symulacji

W przedstawianym przykładzie zostały wygenerowane następujące dane wejściowe:

1. liczba pozycji asortymentowych f : 10 (nazwano je wyrobami A-J), średnia i odchylenie standardowe wielkości l i częstości c zamówień historycznych, tabela 4.1,

Tabela 4.1 Średnia i odchylenie standardowe wielkości l i częstości c zamówień historycznych dla wyrobów A-J, opracowanie własne

Lp.	Wyrób	Średnia wielkość zamówień \bar{x}_l [szt/tydzień]	Odchylenie standardowe wielkości zamówień σ_l	Średnia częstość zamówień \bar{x}_c [zamówień/tydzień]	Odchylenie standardowe częstości zamówień σ_c
1	A	100	10	1	1,5
2	B	20	5	5	10
3	C	50	10	1	2
4	D	100	30	5	3
5	E	100	30	2	1
6	F	40	10	1	2,5
7	G	60	10	4	1,5
8	H	70	30	3	3
9	I	80	20	1	0,5
10	J	120	30	2	0,5

2. liczba stanowisk roboczych K_x^0 : 3 (K_1^0 „stanowisko 1”, K_2^0 „stanowisko 2”, K_3^0 „stanowisko 3”),
3. proces technologiczny, z przypisaniem operacji technologicznych do stanowisk (tabela 4.2),

Tabela 4.2 Proces technologiczny wyrobów A-J, opracowanie własne

Wyrób/Stnowisko	1	2	3
A	1	0	1
B	0	1	1
C	1	1	0
D	1	1	0
E	1	0	1
F	0	1	0
G	1	1	0
H	1	0	1
I	0	1	1
J	0	1	1

4. czasy jednostkowe operacji technologicznych t_j (tabela 4.3).

Tabela 4.3 Czasy jednostkowe operacji technologicznych t_j [h] na poszczególnych stanowiskach, opracowanie własne

Wyrób/ Stanowisko	1	2	3	Wyrób/ Stanowisko	1	2	3
A	0,02		0,04	F		0,2	
B		0,01	0,03	G	0,09	0,09	
C	0,08	0,02		H	0,12		0,12
D	0,09	0,09		I		0,02	0,02
E	0,01		0,01	J		0,02	0,02

Dla wygenerowanych danych wejściowych zostało przeprowadzone poziomowanie produkcji według zaproponowanej metodyki.

W pierwszym kroku przeprowadzono podział wyrobów na grupy, korzystając z metody ABC/XYZ. Wyniki analizy ABC przedstawione zostały w tabeli 4.4, natomiast analizy XYZ w tabeli 4.5.

W wyniku analizy ABC oraz XYZ powstaje macierz o wymiarach 3x3, która dzieli cały asortyment na 9 grup. Według powstałej macierzy, wyroby D, E, G, H, I, J zostały wybrane do dalszej analizy. Kolejnym krokiem jest podział wyrobów na rodziny. Wskazano 3 rodziny wyrobów technologicznie podobnych i są to rodziny: D i G, E i H oraz I i J.

Tabela 4.4 Wyniki analizy ABC, opracowanie własne

Lp.	Wyrób	Średnia wielkość zamówień \bar{x}_l [szt./tydzień]	Wartość skumulowana zapotrzebowania [szt./tydzień]	Udział wyrobu w całkowitej liczbie zamawianych sztuk [%]	ABC
10	J	120	120	16%	A
1	A	100	220	30%	A
4	D	100	320	43%	A
5	E	100	420	57%	A
9	I	80	500	68%	A
8	H	70	570	77%	A
7	G	60	630	85%	B
3	C	50	680	92%	B
6	F	40	720	97%	B
2	B	20	740	100%	C

Tabela 4.5 Wyniki analizy XYZ, opracowanie własne

Lp.	Wyrób	Średnia częstość zamówień \bar{x}_c [zamówień/tydzień]	Odchylenie częstości zamówień σ_c	Współczynnik zmienności V_s	XYZ
1	A	1	1,5	1,5	Z
2	B	5	10	2	Z
3	C	1	2	2	Z
4	D	5	3	0,6	Y
5	E	2	1	0,5	X
6	F	1	2,5	2,5	Z
7	G	4	1,5	0,375	X
8	H	3	3	1	Y
9	I	1	0,5	0,5	X
10	J	2	0,5	0,25	X

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie częstości powtórzeń produkcji wyrobów. Tabele 4.6-4.8 obrazują obliczenia możliwej liczby przebrojeń (MLP) dla każdego z 3 stanowisk.

Zgodnie z obliczeniami, wskaźniki EPEI dla stanowiska 1, 2 i 3 są następujące:

- EPEI dla stanowiska 1 = 0,45
- EPEI dla stanowiska 2 = 0,13
- EPEI dla stanowiska 3 = 0,08

Zatem EPEI dla całego procesu jest równe 0,45, co oznacza, że co 0,45 tygodnia roboczego można produkować partie wyrobów.

Tabela 4.6 Możliwa liczba przebrojeń MLP dla stanowiska 1, opracowanie własne

Wyroby	D	E	G	H	SUMA
Średnie zapotrzebowanie \bar{x}_i [sztuk/tydzień]	100	100	60	70	330
Czas t_j [h]	0,09	0,01	0,09	0,12	0,3100
Czas realizacji zapotrzebowania [h/tydzień]	9,0	1,0	5,4	8,4	23,8
Dostępny czas pracy [h/tydzień]					37,5
Średnia efektywność maszyn [%]					80%
Efektywny czas pracy [h/tydzień]					30
Czas na produkcję innych wyrobów					4
Dostępny czas na przebrojenia [h/tydzień]					2,20
Średni czas przebrojenia p [h]					0,25
Możliwa liczba przebrojeń <i>MPL</i>					8,8

Tabela 4.7 Możliwa liczba przebrojeń MLP dla stanowiska 2, opracowanie własne

Wyroby	D	G	I	J	SUMA
Średnie zapotrzebowanie \bar{x}_i [sztuk/tydzień]	100	60	80	120	360
Czas t_j [h]	0,09	0,09	0,02	0,02	0,2200
Czas realizacji zapotrzebowania [h/tydzień]	9,0	5,4	1,6	2,4	18,4
Dostępny czas pracy [h/tydzień]					37,5
Średnia efektywność maszyn [%]					80%
Efektywny czas pracy [h/tydzień]					30
Czas na produkcję innych wyrobów					4
Dostępny czas na przebrojenia [h/tydzień]					7,60
Średni czas przebrojenia p [h]					0,25
Możliwa liczba przebrojeń <i>MPL</i>					30,4

Tabela 4.8 Możliwa liczba przebrojeń MLP dla stanowiska 3, opracowanie własne

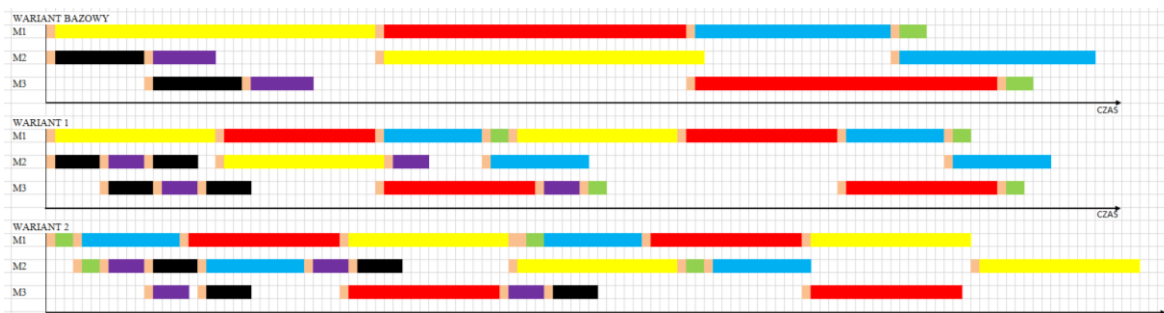
Wyroby	E	H	I	J	SUMA
Średnie zapotrzebowanie \bar{x}_i [sztuk/tydzień]	100	70	80	120	370
Czas t_j [h]	0,01	0,12	0,02	0,02	0,17
Czas realizacji zapotrzebowania [h/tydzień]	1,0	8,4	1,6	2,4	13,4
Dostępny czas pracy [h/tydzień]					37,5
Średnia efektywność maszyn [%]					80%
Efektywny czas pracy [h/tydzień]					30
Czas na produkcję innych wyrobów					4
Dostępny czas na przebrojenia [h/tydzień]					12,60
Średni czas przebrojenia p [h]					0,25
Możliwa liczba przebrojeń <i>MPL</i>					50,4

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie wielkości zapasów. Tabela 4.9 obrazuje obliczenia i wyniki.

Tabela 4.9 Obliczenia zapasu rotacyjnego, buforowego, bezpieczeństwa oraz całkowitego, opracowanie własne

Wyrób	Średnie zapotrzebowanie \bar{x}_i [szt./tydzień]	Czasu uzupełnienia (EPEI)	Zapasy rotacyjny [szt.]	Współczynnik zmienności V	Zapasy buforowy [szt.]	Współczynnik bezpieczeństwa [%]	Zapasy bezpieczeństwa [szt.]	Zapasy całkowity [szt.]
D	100	0,45	45	0,6	27	20%	15	87
E	100	0,45	45	0,5	23	20%	14	82
G	60	0,45	27	0,375	11	20%	8	46
H	70	0,45	32	1	32	20%	13	77
I	80	0,45	36	0,5	18	20%	11	65
J	120	0,45	54	0,25	14	20%	14	82

W kolejnym kroku przygotowano harmonogramy produkcji. Pierwszy z nich jest harmonogramem bazowym, drugi jest wariantem 1, w którym zastosowano regułę priorytetu „najpierw najdłuższy czas przetwarzania”, trzeci jest wariantem 2, w którym zastosowano regułę priorytetu „najpierw najkrótszy czas przetwarzania”. Podstawową podziałką czasu harmonogramu jest 0,25 godziny, a kolory na rysunku 4.1 przedstawiającym harmonogramy, oznaczają: beżowy – czas przebrojenia p , żółty – produkcja wyrobu D, czerwony – produkcja wyrobu H, niebieski – produkcja wyrobu G, zielony – produkcja wyrobu E, czarny – produkcja wyrobu J, fioletowy – produkcja wyrobu I. Oznaczenia M1, M2, M3 oznaczają trzy stanowiska, odpowiednio: stanowisko 1, stanowisko 2, stanowisko 3.



Rysunek 4.1 Warianty harmonogramu produkcji: bazowy, wariant 1 i wariant 2, opracowanie własne

Do dalszej części wzięto pod uwagę harmonogram wariantu 1, który miał najniższą wartość wskaźnika C_{max} .

W kolejnej części przeprowadzono generowanie przyszłych zamówień klienta – wielkości l i częstości c zamówień na kolejne 20 okresów (jeden okres to jeden dzień roboczy) – czyli jeden miesiąc roboczy. Zamówienia dla wskazanych wyrobów są pokazane w tabeli 4.10.

Dla każdego z wyrobów sprawdzono wielkości spływu z produkcji i porównano z zamówieniami klienta oraz wskazano: średnią liczbę wyrobów w magazynie, całkowitą liczbę wyrobów w zrealizowanych zamówieniach, liczbę zamówień zrealizowanych. Dla przykładu przedstawiono wyniki dla wyrobu D i G. Wybrano wyrobu D oraz G, ponieważ, wyrób D zarówno w wariacie bazowym jak i wybranym wariacie 1 jest produkowany jako pierwszy, natomiast wyrób G jest produkowany jako ostatni.

Tabela 4.10 Wielkości zamówień i wyrobów na 20 okresów, opracowanie własne

Lp.	D	E	G	H	I	J
1	20	20	15	25	0	60
2	24	24	16	30	80	0
3	20	20	15	0	10	0
4	22	22	15	30	0	70
5	20	20	21	0	0	0
6	35	35	15	40	0	75
7	20	20	15	20	0	60
8	24	24	0	0	60	10
9	20	20	15	30	40	0
10	18	18	15	0	0	0
11	20	20	0	20	70	50
12	30	30	11	15	0	80
13	20	20	15	0	20	0
14	35	35	15	35	0	0
15	17	17	15	20	0	0
16	28	28	17	10	0	100
17	20	20	0	0	0	0
18	20	20	15	25	75	0
19	18	18	14	0	15	30
20	20	20	15	35	0	0

Według harmonogramu produkcji przygotowanego w ramach piątego etapu metodyki, wyrób D w liczbie 50 sztuk będzie spływał w drugim oraz trzecim dniu produkcji – w przypadku harmonogramu produkcji poziomowanej, natomiast według harmonogramu bazowego – w liczbie 100 sztuk w dniu trzecim. Poniższe tabele obrazują stan magazynu oraz realizację zamówień „na czas” przy założonym spływie wyrobów (tabela 4.11 przy produkcji poziomowanej, tabela 4.12 przy harmonogramie bazowym) oraz zamówieniu klienta.

Stan magazynu przy wartości minusowej oznacza, że zamówienie klienta nie zostało zrealizowane, z powodu braku wyrobów w magazynie – brakuje wyrobów, żeby zamówienie zrealizować. Przy obliczaniu wskaźnika rotacji zapasów, wartości ujemne traktowane były jak wartość „0”. Dla powyższego przykładu obliczono wskaźnik rotacji zapasów oraz procentowy wskaźnik zamówień zrealizowanych.

Wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji poziomowanej:

$$R = \frac{f_{mag,śr}}{lr} * t = \frac{39sztuk}{445sztuk} * 20 dni = 1,75 dni$$

Wynik oznacza, że średnio wyrób przebywał w magazynie 1,75 dnia roboczego.

Wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji bazowej:

$$R = \frac{f_{mag,śr}}{lr} * t = \frac{33sztuk}{370sztuk} * 20 dni = 1,78 dnia$$

Wynik oznacza, że średnio wyrób przebywał w magazynie 1,78 dnia roboczego.

Tabela 4.11 Symulacja w przypadku produkcji poziomowanej wyrobu D, opracowanie własne

Bieżący okres	Produkcja [szt.]	Stan magazynu [szt.]	Wielkość zamówienia [szt.]	Stan magazynu po realizacji zamówienia [szt.]	Realizacja zamówienia [tak/nie]
1		87	25	62	tak
2	50	112	24	88	tak
3	50	138	35	103	tak
4		103	25	78	tak
5		78	20	58	tak
6		58	35	23	tak
7	50	73	25	48	tak
8	50	98	24	74	tak
9		74	20	54	tak
10		54	25	29	tak
11		29	22	7	tak
12	50	57	30	27	tak
13	50	77	20	57	tak
14		57	35	22	tak
15		22	17	5	tak
16		5	28	-23	nie
17	50	27	20	7	tak
18	50	57	25	32	tak
19		32	18	14	tak
20		14	20	-6	nie

Tabela 4.12 Symulacja przy harmonogramie bazowym wyrobu D, opracowanie własne

Bieżący okres	Produkcja [szt.]	Stan magazynu [szt.]	Wielkość zamówienia [szt.]	Stan magazynu po realizacji zamówienia [szt.]	Realizacja zamówienia [tak/nie]
1		87	25	62	tak
2		62	24	38	tak
3	100	138	35	103	tak
4		103	25	78	tak
5		78	20	58	tak
6		58	35	23	tak
7		23	25	-2	nie
8	100	98	24	74	tak
9		74	20	54	tak
10		54	25	29	tak
11		29	22	7	tak
12		7	30	-23	nie
13	100	77	20	57	tak
14		57	35	22	tak
15		22	17	5	tak
16		5	28	-23	nie
17		-23	20	-43	nie
18	100	57	25	32	tak
19		32	18	14	tak
20		14	20	-6	nie

Procentowy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji poziomowanej:

$$D = \frac{w_r}{W} * 100\% = \frac{18}{20} * 100\% = 90\%$$

Wynik oznacza, że 90% wszystkich zamówień zostało zrealizowanych.

Procentowy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji bazowej:

$$D = \frac{w_r}{W} * 100\% = \frac{15}{20} * 100\% = 75\%$$

Wynik oznacza, że 75% wszystkich zamówień zostało zrealizowanych.

Według harmonogramu produkcji przygotowanego w ramach piątego etapu metodyki, wyrób G w liczbie 30 sztuk będzie służył w drugim oraz czwartym dniu produkcji – w przypadku harmonogramu produkcji poziomowanej, natomiast według harmonogramu bazowego – w liczbie 60 sztuk w dniu czwartym. Poniższe tabele obrazują stan magazynu oraz realizację zamówień przy założonym sływie wyrobów (tabela 4.13 przy produkcji poziomowanej, tabela 4.14 przy harmonogramie bazowym) oraz zamówieniu klienta.

Stan magazynu przy wartości minusowej oznacza, że zamówienie klienta nie zostało zrealizowane, z powodu braku wyrobów w magazynie. Dla powyższego przykładu obliczono wskaźnik rotacji zapasów oraz procentowy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas.

Wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji poziomowanej:

$$R = \frac{f_{mag,śr}}{lr} * t = \frac{30sztuk}{259sztuk} * 20 dni = 2,34 dni$$

Wynik oznacza, że średnio wyrób przebywał w magazynie 2,34 dnia roboczego.

Wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji bazowej:

$$R = \frac{f_{mag,śr}}{lr} * t = \frac{19sztuk}{214sztuk} * 20 dni = 1,8 dni$$

Wynik oznacza, że średnio wyrób przebywał w magazynie 1,8 dnia roboczego.

Procentowy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji poziomowanej:

$$D = \frac{w_r}{W} * 100\% = \frac{17}{17} * 100\% = 100\%$$

Wynik oznacza, że 100% wszystkich zamówień zostało zrealizowane.

Procentowy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji bazowej:

$$D = \frac{w_r}{W} * 100\% = \frac{14}{17} * 100\% = 82\%$$

Wynik oznacza, że 82% wszystkich zamówień zostało zrealizowane.

Tabela 4.13 Symulacja w przypadku produkcji poziomowanej wyrobu G, opracowanie własne

Bieżący okres	Produkcja [szt.]	Stan magazynu [szt.]	Wielkość zamówienia [szt.]	Stan magazynu po realizacji zamówienia [szt.]	Realizacja zamówienia [tak/nie]
1		46	15	31	tak
2	30	61	16	45	tak
3		45	15	30	tak
4	30	60	15	45	tak
5		45	21	24	tak
6		24	15	9	tak
7	30	39	15	24	tak
8		24	0	24	tak
9	30	54	15	39	tak
10		39	15	24	tak
11		24	0	24	tak
12	30	54	11	43	tak
13		43	15	28	tak
14	30	58	15	43	tak
15		43	15	28	tak
16		28	17	11	tak
17	30	41	0	41	tak
18		41	15	26	tak
19	30	56	14	42	tak
20		42	15	27	tak

Tabela 4.14 Symulacja przy harmonogramie bazowym wyrobu G, opracowanie własne

Bieżący okres	Produkcja [szt.]	Stan magazynu [szt.]	Wielkość zamówienia [szt.]	Stan magazynu po realizacji zamówienia [szt.]	Realizacja zamówienia [tak/nie]
1		46	15	31	tak
2		31	16	15	tak
3		15	15	0	nie
4	60	60	15	45	tak
5		45	21	24	tak
6		24	15	9	tak
7		9	15	-6	nie
8		-6	0	-6	nie
9	60	54	15	39	tak
10		39	15	24	tak
11		24	0	24	tak
12		24	11	13	tak
13		13	15	-2	nie
14	60	58	15	43	tak
15		43	15	28	tak
16		28	17	11	tak
17		11	0	11	tak
18		11	15	-4	nie
19	60	56	14	42	tak
20		42	15	27	tak

4.3. Wyniki symulacji

Wartości średnie wskaźników rotacji zapasów oraz zamówień zrealizowanych dla harmonogramu produkcji poziomowanej oraz produkcji bazowej dla 100 przeprowadzonych symulacji przedstawiono w tabeli 4.15.

Tabela 4.15 Średnie wskaźniki rotacji zapasów oraz zamówień zrealizowanych, opracowanie własne

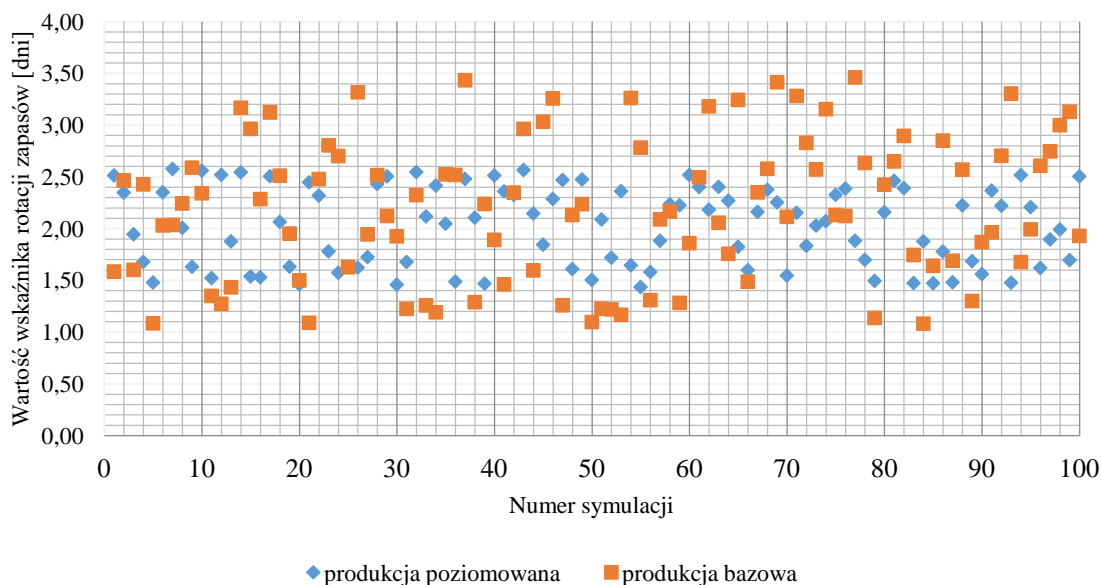
	Średnia arytmetyczna	Odchylenie standardowe
Wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji poziomowanej R_p	2,01	0,38
Wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji bazowej R_b	2,19	0,67
Wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji poziomowanej D_p	89%	8,19%
Wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji bazowej D_b	61%	14,6%

Wyniki wskazują, że w przypadku produkcji poziomowanej średnia rotacja zapasów jest mniejsza aniżeli w produkcji bazowej. Oznacza to, że wyroby gotowe średnio krócej przebywały w magazynie przy zastosowaniu produkcji poziomowanej.

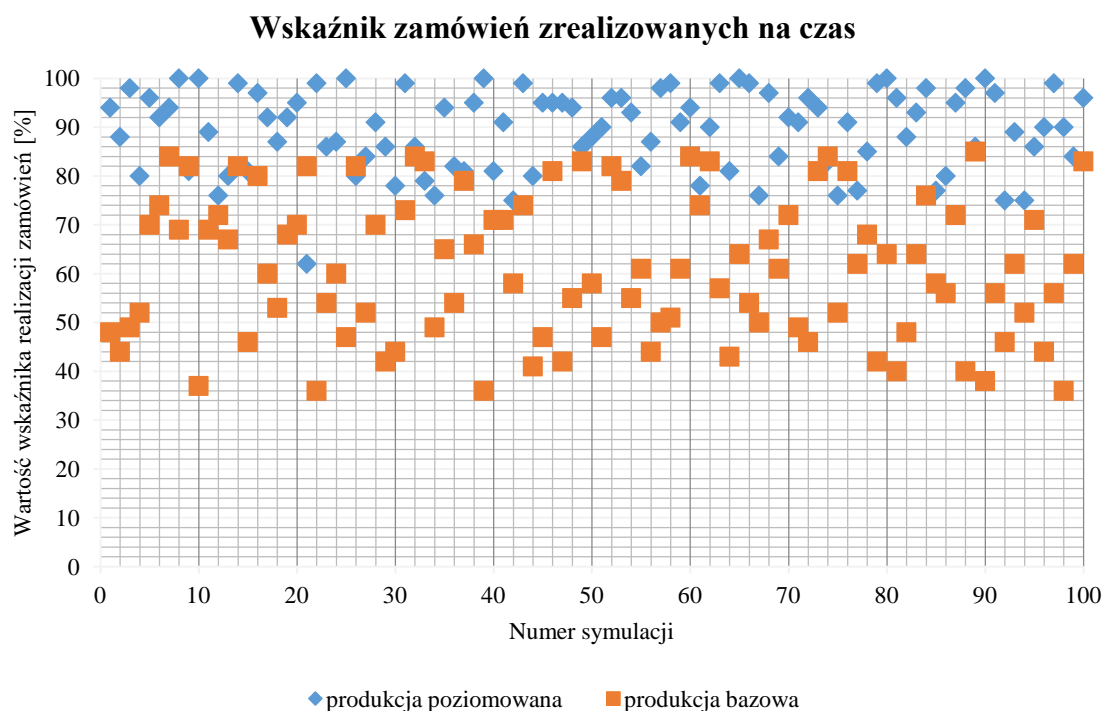
Natomiast wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas jest większy w przypadku produkcji poziomowanej, a więc więcej zamówień zostało zrealizowanych na czas.

Szczegółowe wyniki wszystkich symulacji zostały przedstawione w formie tabeli w załączniku 2 oraz w formie wykresów na rysunku 4.2 (wskaźnik rotacji zapasów) i 4.3 (wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas).

Wskaźnik rotacji zapasów



Rysunek 4.2 Wykres wartości średniego wskaźnika rotacji zapasów dla 100 symulacji, opracowanie własne



Rysunek 4.3 Wykres wartości średniego wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas dla 100 symulacji, opracowanie własne

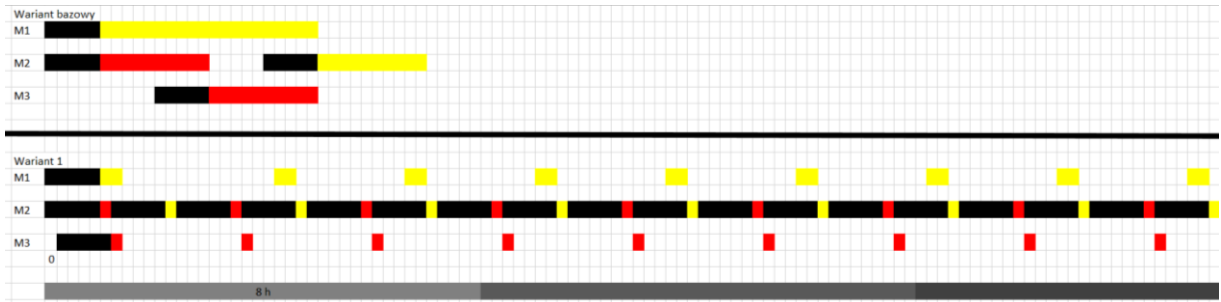
Na 100 przeprowadzonych symulacji produkcji poziomowanej, 57 miało niższy wskaźnik rotacji zapasów, a 95 wyższy wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas w porównaniu z produkcją bazową. Jedynie w dwóch z przeprowadzonych symulacji, produkcja bazowa uzyskała lepsze wyniki w obu wskaźnikach, natomiast produkcja poziomowana – w 54 symulacjach. W 41 symulacjach produkcja bazowa uzyskała co prawda lepszy wynik wskaźnika rotacji zapasów, jednakże w tych symulacjach wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas był zdecydowanie niższy niż w przypadku produkcji poziomowanej (tabela 4.16). Powodem niższej wartości wskaźnika rotacji był okresowo zerowy zapas w magazynie wyrobów gotowych, co skutkowało obniżeniem wskaźnika rotacji zapasów, jednocześnie nie zapewniając wystarczającej liczby wyrobów do realizacji zamówień.

Tabela 4.16 Zestawienie wyników symulacji, opracowanie własne

	Wskaźnik rotacji zapasów $R_p < R_b$	Wskaźnik rotacji zapasów $R_p > R_b$
Wskaźnik zamówień zrealizowanych $D_p > D_b$	54	41
Wskaźnik zamówień zrealizowanych $D_p < D_b$	3	2

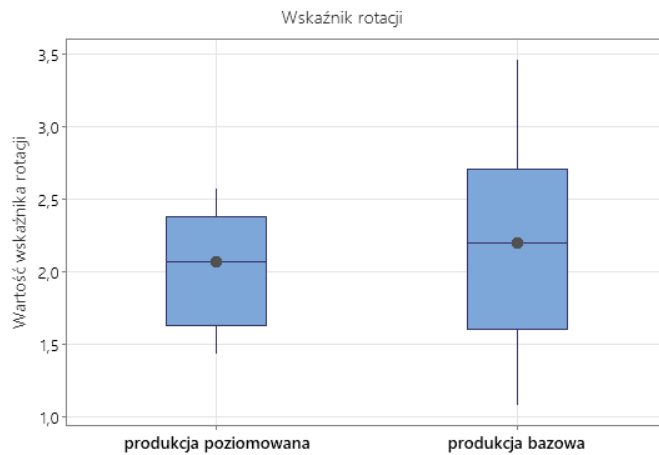
Tylko 3 symulacji osiągnęło lepszy wyniki pod kątem wskaźnika zamówień zrealizowanych. Po analizie wyników stwierdzono, że taka sytuacja miała miejsce wtedy, kiedy spływ całej partii wyrobu w produkcji bazowej był szybszy niż spływ w produkcji poziomowanej. Przykład takiej sytuacji pokazuje rysunek 4.4. Na rysunku widać, że dla

produkcji bazowej osiągnięto krótszy czas wykonania zleceń, aniżeli dla produkcji poziomowanej.

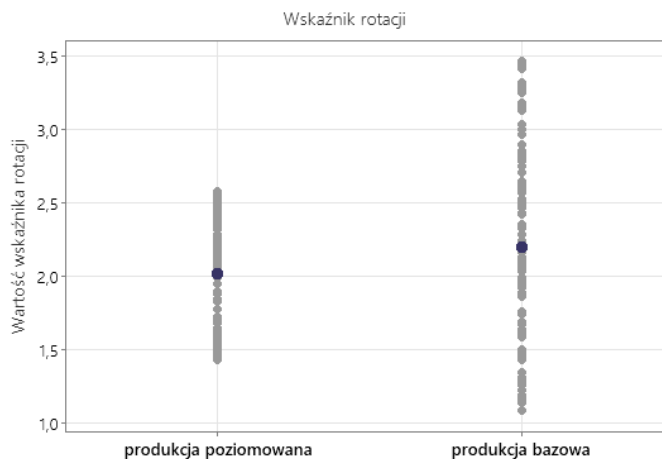


Rysunek 4.4 Przykład harmonogramów, gdzie produkcja bazowa osiągnęła lepszy wynik wskaźnika zamówień zrealizowanych, opracowanie własne

Statystyka wskaźnika rotacji zapasów z przeprowadzonych symulacji jest przedstawiona na wykresach: 4.5 (wykres boxplot) i 4.6 (wykres wartości pojedynczych).



Rysunek 4.5 Wykres boxplot typu: Q1-Me-Q3 (kwartył I-mediana-kwartył III) dla wskaźnika rotacji zapasów, opracowanie własne

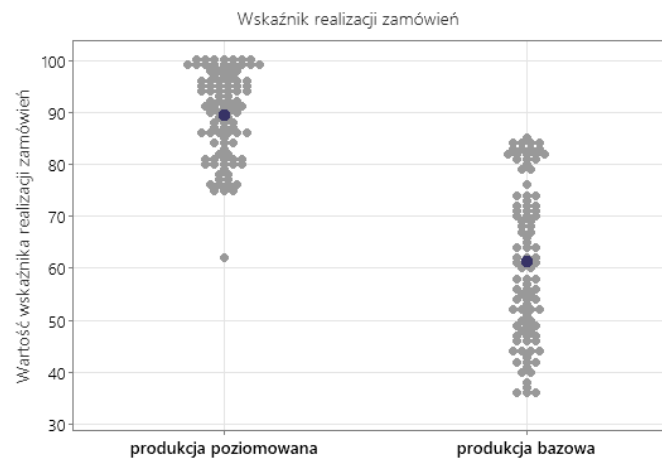


Rysunek 4.6 Wykres wartości pojedynczych dla wskaźnika rotacji zapasów, opracowanie własne

Statystyki wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas są przedstawione na wykresach: 4.7 (wykres boxplot) i 4.8 (wykres ramka-wąsy)



Rysunek 4.7 Wykres boxplot typu: Q1-Me-Q3 (kwartył I-mediana-kwartył III) dla wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas, opracowanie własne



Rysunek 4.8 Wykres wartości pojedynczych dla wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas, opracowanie własne

Uzyskane wyniki sugerują, że zastosowanie produkcji poziomowanej umożliwia wzrost wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas oraz zmniejszenie wskaźnika rotacji zapasów w stosunku do wartości tych wskaźników uzyskanych dla produkcji bazowej. Aby stwierdzić statystycznie istotną różnicę w rozkładach współczynników dla produkcji bazowej i produkcji poziomowanej zastosowany został test kolejności par Wilcozona średniego wskaźnika rotacji zapasów oraz wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas.

Przyjęto hipotezę zerową zakładającą, że nie ma różnic pomiędzy średnią wartością wskaźnika rotacji dla produkcji poziomowanej oraz dla produkcji bazowej, przy hipotezie alternatywnej, że średnia wartość wskaźnika rotacji dla produkcji poziomowanej jest statystycznie istotnie niższa od średniej wartości wskaźnika rotacji dla produkcji bazowej:

Hipoteza zerowa

$$H_0: \mu_{\text{poziomowanej}} = \mu_{\text{bazowej}}$$

Hipoteza alternatywna

$$H_1: \mu_{\text{poziomowanej}} < \mu_{\text{bazowej}}$$

gdzie:

- $\mu_{\text{poziomowana}}$: średnia wartość wskaźnika rotacji dla produkcji poziomowanej,

- μ_{bazowa} : średnia wartość wskaźnika rotacji dla produkcji bazowej.

Test przeprowadzony został w programie MiniTab. Wyniki testu są przedstawione w tabeli 4.17.

Tabela 4.17 Wyniki testu statystycznego dla wskaźnika rotacji zapasu, opracowanie własne

Statystyka testu	Wartość p
2,052	0,0401

Wartość statystyki wskazuje, że na poziomie istotności $\alpha=0,05$ są podstawy do odrzucenia H_0 . Można uznać, że średnio wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji poziomowanej jest istotnie niższy od wskaźnika rotacji zapasów dla produkcji bazowej.

Test przeprowadzono również w odniesieniu do wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas. Przyjęto następującą hipotezę zerową zakładającą, że nie ma różnic pomiędzy średnią wartością wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji poziomowanej a dla produkcji bazowej, przy hipotezie alternatywnej, że średnia wartość wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji poziomowanej jest statystycznie istotnie wyższa od średniej wartości wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji bazowej:

$$\begin{array}{ll} \text{Hipoteza zerowa} & H_0: \mu_{\text{poziomowanej}} = \mu_{\text{bazowej}} \\ \text{Hipoteza alternatywna} & H_1: \mu_{\text{poziomowanej}} > \mu_{\text{bazowej}} \end{array}$$

gdzie:

- $\mu_{\text{poziomowana}}$: średnia wartość wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji poziomowanej
- μ_{bazowa} : średnia wartość wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji bazowej

Jego wyniki są przedstawione w tabeli 4.18.

Tabela 4.18 Wyniki testu statystycznego dla wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas, opracowanie własne

Statystyka testu	Wartość p
8,5100	0,00000

Można uznać, że średnio wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji poziomowanej jest istotnie wyższy od wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji bazowej. Podsumowując, produkcja poziomowana według opracowanej w pracy metodyki daje statystycznie istotnie lepsze – w porównaniu z produkcją bazową – średnie wyniki wskaźnika rotacji zapasów oraz wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas.

5. Weryfikacja skuteczności metodyki w warunkach produkcyjnych

5.1. Charakterystyka przedsiębiorstwa i procesów produkcji

Do przeprowadzenia eksperymentu potwierdzającego efektywność opracowanej metodyki w warunkach produkcyjnych, wybrano procesy produkcji w jednym z przedsiębiorstw produkcyjnych, w którym wyroby gotowe, są montowane na indywidualne zamówienie klienta. Wyroby te montowane są ze standardowych elementów produkowanych na magazyn. Jest to klasyczny przykład produkcji według strategii: montaż na zamówienie, gdzie z gotowych, standardowych elementów, montuje się wyrób zamówiony przez klienta.

W przedsiębiorstwie funkcjonuje 5 wydziałów produkcyjnych. Do przeprowadzenia symulacji wybrano procesy produkcji na dwóch wydziałach, nazwanych w pracy odpowiednio „wydział 1” oraz „wydział 2”. Na obu działach produkowane są tylko wyroby standardowe, według strategii na magazyn.

Na **wydziale 1** pracuje 8 maszyn, technologicznie podobnych, które tworzą gniazdo przedmiotowe. Na każdej z nich możliwa jest produkcja wszystkich produkowanych na wydziale wyrobów. Do każdego z wyrobów jest dedykowane specjalistyczne oprzyrządowanie. Jednorazowo na maszynie jest wytwarzany jeden typ wyrobu. Przebrojenie odbywa się w sposób ręczny przez pracownika wydziału. Na wydziale 1 harmonogramy produkcji opracowywane są raz w tygodniu i uwzględniają bieżące zapotrzebowanie. Codziennie sprawdza się postępy z realizacji harmonogramu oraz koryguje się go, jeśli wystąpią nieplanowane zdarzenia (pilne zlecenie, awaria maszyny, produkcja wyrobów niezgodnych z wymaganiami, itd.). Z powodu braku aktualnych informacji o stanach magazynowych oraz nieplanowanych zdarzeniach, wydział często nie jest w stanie zrealizować zamówień wewnętrznych, co przekłada się na występowanie częstych przestoju na innych wydziałach przedsiębiorstwa.

Na **wydziale 2** znajduje się 12 maszyn. Maszyny są specjalizowane do wytwarzania określonej grupy wyrobów. Harmonogramy produkcji tworzone są raz w miesiącu (aktualizowane raz w tygodniu) i uwzględniają bieżące zapotrzebowanie. Codziennie sprawdza się postępy w realizacji planu, a w razie potrzeby koryguje się go. Z powodu braku aktualnych informacji o stanach magazynowych oraz nieplanowanych zdarzeniach, często wydział nie realizuje założonego planu produkcji.

5.2. Założenia i cele symulacji komputerowej

W celu sprawdzenia skuteczności opracowanej metodyki MPP w warunkach produkcyjnych, przeprowadzono symulację komputerową w programie FlexSim. Podstawą przeprowadzonych symulacji były dane produkcyjne pozyskane w ramach projektu

realizowanego dla rozpatrywanego przedsiębiorstwa produkcyjnego¹. Z uwagi na klauzulę niejawności efektów prowadzonych prac badawczych dane zostały zakodowane.

Do przeprowadzenia symulacji komputerowej zbudowano modele symulacyjne w programie FlexSim, po jednym dla wydziału. Dla każdego z nich przeprowadzono dwie symulacje:

- bazową, symulującą przebieg procesu z zastosowaniem harmonogramu stosowanego na danym wydziale,
- poziomowaną, symulującą przebieg procesu z zastosowaniem harmonogramu utworzonego za pomocą metodyki MPP.

Porównano również wskaźniki rotacji zapasów R oraz zamówień zrealizowanych na czas D uzyskane w każdej symulacji.

Przeprowadzenie symulacji komputerowej odbywało się w pięciu krokach:

1. Budowa w programie FlexSim modelu symulacyjnego procesu produkcyjnego.
2. Zgromadzenie danych wejściowych z rzeczywistych procesów produkcyjnych (m.in. dotyczących procesu technologicznego, asortymentu produkcji, zamówień klienta).
3. Przeprowadzenie na danych zebranych w p.2 etapów metodyki MPP – wyznaczenie harmonogramu poziomowanego.
4. Przeprowadzenie symulacji komputerowej procesów produkcji z zastosowaniem harmonogramu rzeczywistego i poziomowanego; wyznaczenie wskaźników rotacji zapasów i zamówień zrealizowanych,
5. Porównanie otrzymanych wyników.

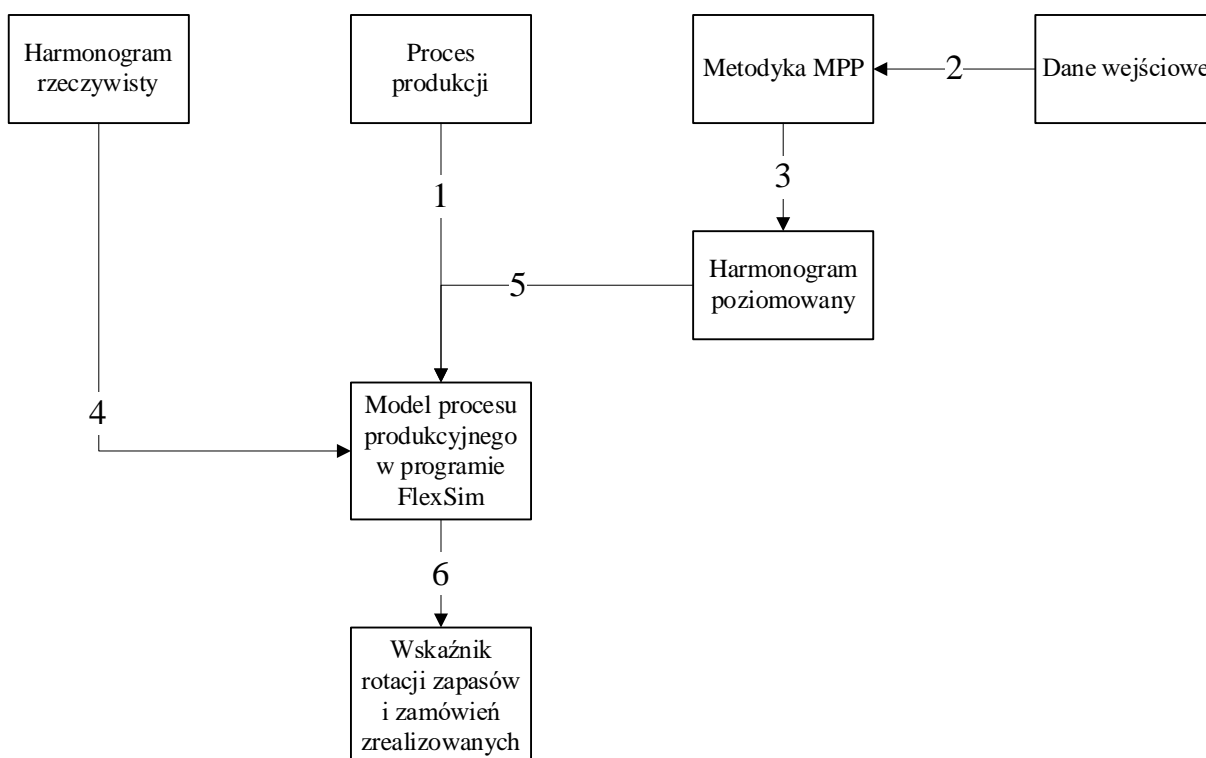
W pracy przedstawiono szczegółowo kroki symulacji dla wydziału 1. Prace realizowane dla wydziału 2 przebiegały dokładnie w taki sam sposób.

Schemat działań wykonanych w ramach oceny skuteczności metodyki opisuje rysunek 5.1.

Model symulacyjny w programie FlexSim odwzorowywał procesy produkcyjne (1) na wydziałach 1 i 2. W modelu zostały umieszczone, w odpowiednio przygotowanych tabelach, dane potrzebne do przeprowadzenia symulacji. Dane te dotyczyły m.in. produkowanego asortymentu, czy zamówień klientów i zostały pozyskane z rzeczywistych procesów. Dane wejściowe, dotyczące m.in. czasów przebrojeń, czy operacji, pozwoliły na przeprowadzenie etapów metodyki MPP (2), której efektem było określenie harmonogramu poziomowanego (3). Przeprowadzono po dwie symulacje dla każdego z wydziałów. Pierwsza obejmowała symulację z zastosowaniem rzeczywistego harmonogramu produkcji (4, „symulacja bazowa”), druga – poziomowanego harmonogramu produkcji (5, „symulacja poziomowana”). Wynikiem symulacji były

¹ Projekt nr 02/23/PRJG/7704 realizowany w Zakładzie Inżynierii Produkcji PP. Dane produkcyjne dostępne są u autorki pracy.

wskaźniki rotacji zapasów i zamówień zrealizowanych (6), które następnie porównano ze sobą.



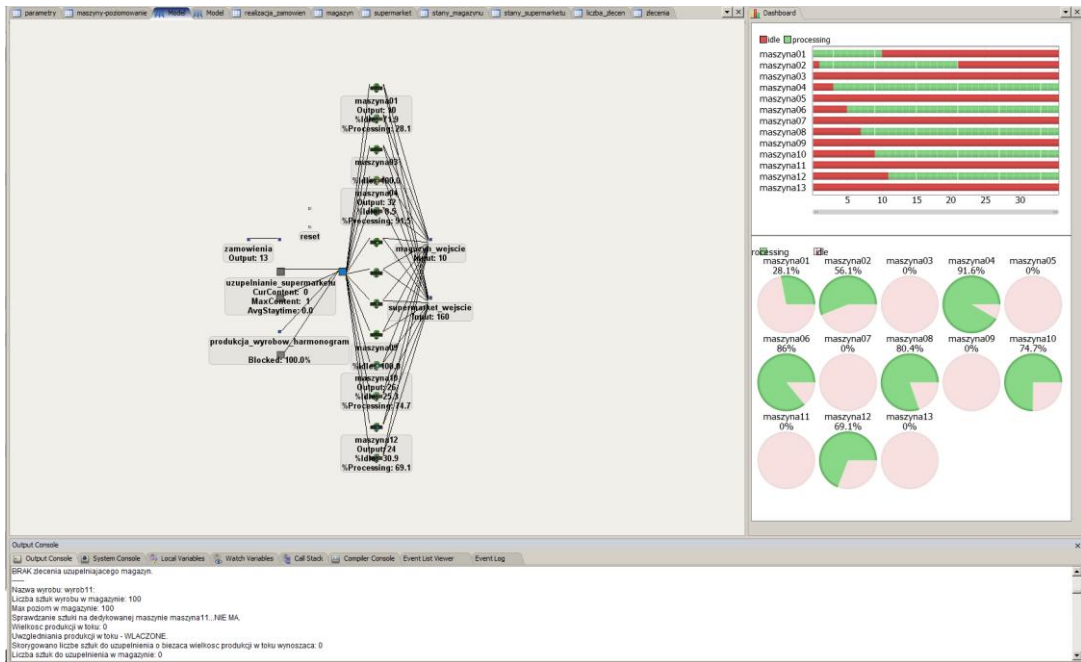
Rysunek 5.1 Schemat działań wykonanych w ramach symulacji komputerowej, opracowanie własne

5.3.Symulacja komputerowa na wydziale 1

Budowa modelu symulacyjnego w programie FlexSim

W modelu symulacyjnym dla wydziału 1 odzwierciedlono maszyny i magazyn. Pozostałe obiekty modelu reprezentują np. listę zamówień, lub są elementami technicznymi, tzn. zapewniają odpowiednie działanie modelu. Do elementów tych należą m.in. tabele zawierające parametry i wyniki działania modelu oraz obiekty wizualizujące działanie modelu (rysunek 5.2).

Działanie modelu symulacyjnego jest określone przez parametry, zawarte w tabeli „parametry”. Tabela ta zawiera parametry ogólne dla modelu symulacyjnego i parametry szczegółowe dla każdego z wyrobów, jak np. czas jednostkowy wykonania operacji, czy czas przebrojenia. Widok tabeli „parametry” wraz z przykładowymi wartościami przedstawiono na rysunku 5.3.



Rysunek 5.2 Widok ogólny modelu symulacyjnego dla wydziału 2, opracowanie własne

	wartosc	w2027483	w2027484	w2048050	w2030534	w2048023	w2028740	w2034141	w2041564	w2042010
miejsce_skladowania		s	s	s	s	s	s	s	s	s
stan_poczkotkowy		5741.00	4137.00	5124.00	5111.00	5801.00	3506.00	3326.00	3095.00	2388.00
max_poziom_w_miejscu_skladowania		5741.00	4137.00	5124.00	5111.00	5801.00	3506.00	3326.00	3095.00	2388.00
maszyna		maszyna02	maszyna02	maszyna07	maszyna07	maszyna10	maszyna11	maszyna11	maszyna11	maszyna03
czas_operacji		20.00	20.00	53.00	53.00	130.00	60.00	60.00	60.00	120.00
czas_operacji_jednostka		s	s	s	s	s	s	s	s	s
czas_przebrojenia		5400.00	5400.00	7200.00	7200.00	9000.00	7200.00	7200.00	7200.00	5400.00
czas_przebrojenia_jednostka		s	s	s	s	s	s	s	s	s
nr_wyjscia		2.00	2.00	7.00	7.00	10.00	11.00	11.00	11.00	3.00
liczba_sztuk_w_zleceniu_produkcyj_poziomowanej		5401.00	3891.00	2033.00	2028.00	1726.00	1095.00	1039.00	967.00	967.00
czas_pomiedzy_sprawdzaniem_stanu_magazynu	120.00									
uwzglednianie_produkcyj_w_toku	tak									
produkcja_poziomowana	nie									
zapis_wykresow_do_pliku	tak									
czas_pomiedzy_zapisem_wykresow_do_pliku	120.00									
rejestracja_stanow_miejsc_skladowania	tak									
czas_pomiedzy_rejestracja_stanow_miejsc_skladowania	120.00									

Rysunek 5.3 Widok fragmentu tabeli „parametry”: a) parametry ogólne i ich przykładowe wartości, b) parametry szczegółowe (dla poszczególnych wyrobów o nazwach określonych w nagłówkach kolumn) i ich przykładowe wartości, opracowanie własne

Produkcja poziomowana, w symulacji poziomowanej, jest realizowana w modelu w oparciu o parametry w tabeli „maszyny-poziomowanie” (rysunek 5.4). Tabela ta określa czas pomiędzy generowaniem zlecenia produkcji poziomowanej dla wyrobów produkowanych na maszynie o określonej nazwie. Czas ten jest zgodny ze wskaźnikiem EPEI. Wielkość zlecenia produkcji poziomowanej dla danego wyrobu jest określona przez wartość w wierszu „liczba_sztuk_w_zleceniu_produkcyj_poziomowanej” tabeli „parametry”.

parametry		maszyny-poziomowanie	
maszyna01		10.00	
maszyna02		89.00	
maszyna03		206.00	
maszyna04		210.00	
maszyna05		90.00	
maszyna06		227.00	
maszyna07		210.00	
maszyna08		87.00	
maszyna09		17.00	
maszyna10		280.00	
maszyna11		267.00	
maszyna12		17.00	
maszyna13		0.00	

Rysunek 5.4 Widok tabeli „maszyny-poziomowanie” z przykładowymi wartościami czasu pomiędzy generowaniem zlecenia produkcji poziomowanej dla produkowanych wyrobów, opracowanie własne

Zamówienia klientów są reprezentowane w postaci tabeli "zamowienia" – pojedynczy wiersz w tej tabeli reprezentuje jedno zamówienie (rysunek 5.5).

ArrivalTime	ItemName	ItemType	Quantity	liczba_sztuk
Arrival1	0.00 w2028782	1.00	1.00	800.00
Arrival2	0.00 w2040095	1.00	1.00	31.00
Arrival3	0.00 w2048023	1.00	1.00	2604.00
Arrival4	0.00 w2004302	1.00	1.00	333.00
Arrival5	0.00 w2004300	1.00	1.00	333.00
Arrival6	0.00 w2004296	1.00	1.00	72.00
Arrival7	0.00 w2040858	1.00	1.00	4.00
Arrival8	0.00 w2046553	1.00	1.00	92.00
Arrival9	0.00 w2039891	1.00	1.00	259.00
Arrival10	0.00 w2034136	1.00	1.00	2.00
Arrival11	0.00 w2048153	1.00	1.00	24.00
Arrival12	0.00 w2043174	1.00	1.00	42.00
Arrival13	0.00 w2027483	1.00	1.00	5067.00

Rysunek 5.5 Widok tabeli obiektu "zamowienia" wraz z przykładowymi wartościami (Number of Arrivals - liczba zamówień, ArrivalTime - moment złożenia zamówienia, ItemName - nazwa wyrobu, liczba_sztuk - wielkość zamówienia), opracowanie własne

Wyniki działania modelu reprezentowane są za pomocą tabel wyjściowych i wykresów, aktualizowanych w trakcie trwania symulacji. Najważniejszą z nich jest tabela „realizacja_zamowien”, przedstawiająca aktualny stan zamówień zrealizowanych na czas. Dla zamówień już zrealizowanych pozwala ona określić czas realizacji danego zamówienia. Czas realizacji zamówienia obliczany jest jako różnica pomiędzy czasem złożenia zamówienia a czasem zakończenia realizacji zamówienia. W przypadku zamówień niezrealizowanych tabela określa liczbę sztuk wyrobu niezbędną do zakończenia realizacji danego zamówienia.

Realizacja zamówień odbywa się w modelu w wyniku generowania, a następnie realizacji zleceń produkcyjnych. W momencie wpłynięcia zamówienia określone jest miejsce składowania, z którego będzie realizowane zamówienie i dalsze działanie modelu jest warunkowane wartością tego parametru. Zlecenia produkcji poziomowanej generowane są okresowo w sposób niezależny od zamówień.

Pozyskanie danych wejściowych i przeprowadzenie MPP

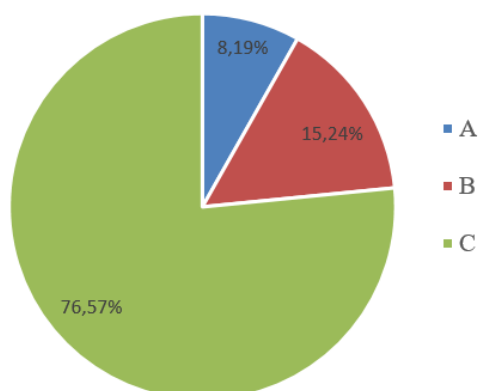
Prace rozpoczęto od pozyskania danych dotyczących między innymi:

- wyrobów produkowanych na wydziale 1,
- zapotrzebowania na wyroby za okres 6 miesięcy,
- maszyn, na których produkowane są poszczególne wyroby,
- czasów produkcji: jednostkowego czasu wytwarzania, czasu przebrojenia,
- efektywnego czasu wykorzystania maszyn.

Powyższe dane zostały pozyskane od planisty produkcji oraz kierownika wydziału. Większość danych pochodziła z systemu informatycznego i została zweryfikowana podczas rzeczywistej produkcji.

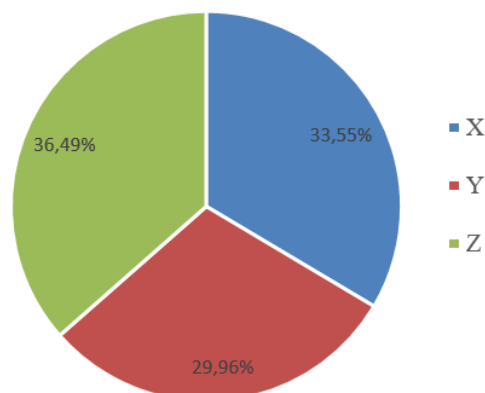
Na wydziale produkowanych jest łącznie około 790 różnych wyrobów. Na podstawie zebranych uprzednio danych wykonano analizę ABC/XYZ. Analizę rozpoczęto od wyznaczenia średniego tygodniowego zapotrzebowania na wyroby. Jednostkę tygodnia przyjęto, ponieważ na taki okres jest ustalany plan produkcji. Następnie uszeregowano wyroby malejąco pod względem wartości zapotrzebowania tygodniowego oraz obliczono skumulowaną wartość zapotrzebowania w odniesieniu do sumy wszystkich produkowanych wyrobów, a także wyznaczono zapotrzebowanie narastająco w procentach.

Do grupy A zaliczają się wyroby generujące 80% zapotrzebowania, wyroby z grupy B stanowią 15% zapotrzebowania, a z grupy C – 5%. Wykres 5.6 przedstawia procentowy udział wyrobów w poszczególnych grupach.



Rysunek 5.6 Procentowy udział wyrobów w grupach A, B, C, opracowanie własne

Analizę XYZ przeprowadzono zgodnie z założeniami metodyki, wyznaczając współczynnik zmienności V . Wykres 5.7 przedstawia procentowy udział wyrobów w grupach X, Y, Z.



Rysunek 5.7 Procentowy udział wyrobów w grupach X, Y, Z, opracowanie własne

Kolejnym krokiem było połączenie wyników obu analiz, co pozwoliło na wyznaczenie grupy wyrobów, na którą zapotrzebowanie jest największe i najczęstsze. Wyniki analizy dla poszczególnych grup przedstawia tabela 5.1.

Tabela 5.1 Liczba pozycji asortymentowych w poszczególnych grupach, opracowanie własne

Grupa	Liczba pozycji asortymentowych [szt.]
AX	64
AY	0
AZ	0
BX	93
BY	26
BZ	0
CX	105
CY	208
CZ	285

Łącznie 191 wyrobów, z 760 znalazło się w grupach AX, BX i BY i to one zostały wskazane do przeprowadzenia dalszej części analizy.

W MPP, kolejnym etapem jest wskazanie podobieństwa technologicznego wyrobów. Ze względu na to, że proces produkcji każdego wyrobu odbywa się w ramach jednej maszyny, w poniższej tabeli pokazano liczbę pozycji asortymentowych produkowanych na każdej maszynie (tabela 5.2).

Tabela 5.2 Liczba pozycji asortymentowych z grupy priorytetowej produkowana na poszczególnych maszynach, opracowanie własne

Numer maszyny	Liczba pozycji asortymentowych [szt.]	Numer maszyny	Liczba pozycji asortymentowych [szt.]
1	6	7	7
2	24	8	6
3	28	9	9
4	35	10	7
5	18	11	20
6	17	12	6

Kolejnym etapem było wyznaczenie czas uzupełnienia wyrobów w magazynie, posługując się wskaźnikiem EPEI. Wskaźnik ten informuje o tym, jak często możliwe jest wytworzenie każdego wyrobu. Przyjęto, że liczba wyrobów do wyprodukowania jest równa średniemu tygodniowemu zapotrzebowaniu.

W celu wyznaczenia wartości MPL_x utworzono pomocnicze tabele obrazujące obliczanie możliwej liczby przebrojeń w okresie dnia przy trzech zmianach produkcyjnych. Wskazano rzeczywistą średnią efektywność maszyn na poziomie 60-70% (w zależności od maszyny) oraz obliczono średni czas przebrojenia dla poszczególnych maszyn:

- maszyna 1 – 1 godzina,
- maszyna 2, 3, 4, 12 – 1 godzina 30minut,
- maszyna 5, 6, 7, 11 – 2 godziny,
- maszyna 8, 9, 10 – 2 godziny 30 minut.

W tabeli 5.3 przedstawiono przykładowe obliczenia dla maszyny 12.

Tabela 5.3 Obliczenia MLP dla maszyny 12, opracowanie własne

Wyroby	1	2	3	4	5	6	SUMA
Średnie zapotrzebowanie \bar{x}_i [szt/tydzień]	384	198	159	133	75	55	1004
Czas t_j [s]	70	70	70	70	70	70	420
Czas realizacji zapotrzebowania [s]	26880	13860	11130	9310	5250	3850	70280
Dostępny czas pracy [s/tydzień]	-						432000
Średnia efektywność maszyny [%]	-						70%
Czas efektywny [s/tydzień]	-						302400
Dostępny czas na przebrojenia [s]	-						232120
Średni czas przebrojenia p [s]	-						5400
Możliwa liczba przebrojeń MLP	-						43

Dla maszyny 12 wskaźnik EPEI przyjmie wartość: $EPEI = 6/43 = 0,14$. Oznacza to, że co 0,14 zakładanego okresu (w tym przypadku zakładanym okresem jest tydzień roboczy, czyli trzy zmiany ośmiogodzinne, 5 dni) mogą zostać wyprodukowane wszystkie wyroby.

W przypadku maszyn 3, 4, 8 oraz 11, podczas obliczania możliwej liczby przebrojeń zauważono, że dostępny czas na przebrojenia jest wartością ujemną. Ta sytuacja ma miejsce wtedy, kiedy czas efektywny, w którym należy wyprodukować

wyroby jest krótszy od czasu realizacji zapotrzebowania. W tym przypadku zwiększono dostępny czas pracy z jednego tygodnia roboczego do dwóch tygodni roboczych. Następnie obliczoną wartość wskaźnika EPEI pomnożono razy dwa. Obliczony wskaźnik EPEI ma bezpośredni wpływ na wartość zapasu w magazynie, w związku z tym zapasy będą miały odpowiednio większą wartość. W przypadku maszyn 6, 7 oraz 10 wskaźnik EPEI jest wartością powyżej 1, a więc potrzeba więcej niż jednego tygodnia, aby wyprodukować zakładane wyroby. W tym przypadku również wartość zapasu rotacyjnego będzie miała odpowiednio wyższą wartość.

Dla pozostałych maszyn wskaźniki EPEI zostały obliczone w ten sam sposób. Wyniki przedstawia tabela 5.4.

Tabela 5.4 Wskaźnik EPEI dla poszczególnych maszyn, opracowanie własne

Maszyna	EPEI	Maszyna	EPEI
1	0,08	7	1,75
2	0,74	8	0,72
3	1,71	9	0,14
4	1,75	10	2,33
5	0,75	11	2,22
6	1,89	12	0,14

Kolejnym etapem było wyznaczanie wielkości zapasów wyrobów gotowych. Przyjęto wartość współczynnika zmienności oraz bezpieczeństwa na poziomie 20%.

W tabeli 5.5 przedstawiono wartości zapasu rotacyjnego, buforowego i bezpieczeństwa dla wyrobów produkowanych na maszynie 12 i rekomendowanych do produkcji poziomowanej. Dla wyrobów, produkowanych na pozostałych maszynach, przeprowadzono takie same obliczenia.

Tabela 5.5 Zapas rotacyjny, buforowy i bezpieczeństwa dla wyrobów produkowanych na maszynie 12, opracowanie własne

Numer wyrobu	Zapasy rotujący [szt.]	Zapasy buforowy [szt.]	Zapasy bezpieczeństwa [szt.]	Zapasy całkowite [szt.]
1	54	11	13	78
2	28	6	7	41
3	23	5	6	34
4	19	4	5	28
5	11	3	3	17
6	8	2	2	12

W ostatnim punkcie przygotowano harmonogramy produkcji poziomowanej. Wariant 1 i 2 zakładał produkcję wyrobów w:

- w pięciu partiach dla maszyn 1, 9 i 12,
- jednej partii dla pozostałych maszyn.

zgodnie z obliczonym wcześniej wskaźnikiem EPEI.

Wariant 1 zakładał produkcję według reguły najpierw najdłuższy czas operacyjny, a wariant 2 najpierw najkrótszy czas operacyjny. Po wykonaniu obliczeń, w przypadku każdej maszyny wariant 1 dawał najlepszy wynik pod kątem wskaźnika C_{max} . Wyniki symulacji produkcji poziomowanej zostaną porównane z wynikami symulacji produkcji rzeczywistej. Wariant bazowy, jest harmonogramem rzeczywiście stosowanym w przedsiębiorstwie produkcyjnym i zakładał produkcję wszystkich wyrobów w jednej partii, według reguły najpierw najdłuższy czas operacyjny.

Wyniki symulacji dla wydziału 1

Wyniki symulacji pokazujące liczbę zamówień zrealizowanych na czas oraz niezrealizowanych w przypadku symulacji bazowej i poziomowanej przedstawia tabela 5.6.

Tabela 5.6 Liczba zamówień zrealizowanych, zrealizowanych na czas oraz niezrealizowanych, opracowanie własne

Zamówienia	Symulacja bazowa		Symulacja poziomowana	
	Liczba	Procent	Liczba	Procent
zrealizowane na czas	800	20,87	987	25,74
niezrealizowane na czas	3034	79,13	2847	74,26
Suma zamówień	3834	100	3834	100

Wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji bazowej wynosi 20,87%, natomiast dla produkcji poziomowanej 25,74%.

Wyniki pokazujące średnią liczbę wyrobów w magazynie oraz liczbę sztuk w zamówieniach zrealizowanych, z których obliczony został wskaźnik rotacji zapasów przedstawia tabela 5.7.

Tabela 5.7 Średnia liczba wyrobów w magazynie oraz liczba sztuk w zamówieniach zrealizowanych, opracowanie własne

	Symulacja bazowa	Symulacja poziomowana
średnia liczba wyrobów w magazynie $f_{mag,śr}$ [szt.]	92,81	99,68
liczba sztuk w zamówieniach zrealizowanych l_r [szt.]	148223	179982
czas trwania analizy t [tydzień]	20	20

Wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji bazowej wynosi 0,013 tygodnia (1,56 godziny), a dla produkcji poziomowanej wynosi 0,011 tygodnia (1,32 godziny).

Podsumowując, dla wydziału 1, produkcja poziomowana dała lepsze wyniki pod kątem wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas, który w jej przypadku był o 5 punktów procentowych wyższy niż w przypadku produkcji rzeczywistej. Biorąc pod uwagę wskaźnik rotacji zapasów to również dla produkcji poziomowanej był on na nieznacznie lepszym poziomie aniżeli dla bazowej.

5.4. Poziomowanie produkcji na wydziale 2

Wyniki symulacji dla wydziału 2

Wyniki symulacji dla wydziału 2, pokazujące liczbę zamówień zrealizowanych na czas oraz niezrealizowanych w przypadku symulacji bazowej i poziomowanej przedstawia tabela 5.8.

Tabela 5.8 Liczba zamówień zrealizowanych, zrealizowanych na czas oraz niezrealizowanych, opracowanie własne

Zamówienia	Symulacja bazowa		Symulacja poziomowana	
	Liczba	Procent	Liczba	Procent
zrealizowane na czas	1	1,2	64	76,16
niezrealizowane na czas	83	98,8	20	23,84
Suma zamówień	84	100	84	100

Wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas na czas dla produkcji bazowej wynosi 1,2%, natomiast dla produkcji poziomowanej wynosi 76,19%.

Wyniki pokazujące średnią liczbę wyrobów w magazynie oraz liczbę sztuk w zamówieniach zrealizowanych, które są brane pod uwagę przy obliczeniu wskaźnika rotacji zapasów przedstawia tabela 5.9.

Tabela 5.9 Średnia liczba wyrobów w magazynie oraz liczba sztuk w zamówieniach zrealizowanych, opracowanie własne

	Produkcja bazowa	Produkcja poziomowana
średnia liczba wyrobów w magazynie $f_{mag,śr}$	7,25	7,24
liczba sztuk w zamówieniach zrealizowanych I_r	65	49020
czas trwania analizy t [tydzień]	251	251

Wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji bazowej wynosi 28 tygodni (1120 godzin), a dla produkcji poziomowanej wynosi 0,03 tygodnia (1,2 godziny).

Podsumowując, dla wydziału 2, produkcja poziomowana dała lepsze wyniki pod kątem wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas, który w jej przypadku był o 75 punktów procentowych wyższy niż w przypadku produkcji rzeczywistej. Biorąc pod uwagę wskaźnik rotacji zapasów to jest on znacząco lepszy dla produkcji poziomowanej aniżeli dla bazowej.

5.5. Porównanie otrzymanych wyników

Przeprowadzono symulację komputerową realizacji produkcji w programie FlexSim dla wydziału 1 oraz wydziału 2. Dla każdego z wydziałów przeprowadzono dwie symulacje:

- symulacja bazowa była symulacją rzeczywistego procesu produkcyjnego, gdzie założono realizację rzeczywistych planów produkcyjnych z wybranego okresu czasu.

- symulacja poziomowana dotyczyła realizacji produkcji w przypadku zastosowania MPP. Wykonano obliczenia zgodnie z metodyką poziomowania produkcji, przyjęto harmonogram produkcji, a następnie zasymulowano jej przebieg.

W obu przypadkach zamówienia realizowane przez wydziały były rzeczywistymi zamówieniami z wybranych okresów czasu. Wyniki symulacji przeanalizowano pod kątem wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas oraz wskaźnika rotacji zapasów. Wartości wskaźników pokazuje tabela 5.10.

Tabela 5.10 Wartości wskaźników dla symulacji produkcji bazowej i poziomowanej, opracowanie własne

		Produkcja bazowa	Produkcja poziomowana
Wydział 1	Wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas	20,87%	25,74%
	Wskaźnik rotacji zapasów	1,56 godziny	1,32 godziny
Wydział 2	Wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas	1,2%	76,19%
	Wskaźnik rotacji zapasów	1120 godziny	1,2 godziny

Jak wskazują wyniki, wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla obu wydziałów był wyższy dla produkcji poziomowanej. Oznacza to, że więcej zamówień zrealizowano na czas dla produkcji poziomowanej aniżeli dla produkcji bazowej. Wskaźnik rotacji zapasów dla obu wydziałów ma wartość niższą dla produkcji poziomowanej. Oznacza to, że rotacja zapasów wzrosła przy zastosowaniu produkcji poziomowanej.

6. Ocena ekspertów

W celu ustalenia, czy opracowana metodyka poziomowania produkcji jest „wykonalna” i czy uzyskiwane wyniki są zbieżne, poddano ją ocenie ekspertów. Poproszono 3 osoby o realizację wszystkich etapów metodyki dla zestawu wskazanych danych, a następnie porównano ze sobą otrzymane wyniki. Przeprowadzono także ankietę na temat trudności w wykonaniu poszczególnych etapów metodyki, szczegółowości instrukcji oraz ogólnej opinii na temat metodyki.

Badania przeprowadzono według następującego schematu

- wybór 3 osób do wykonania oceny,
- przygotowanie danych do przeprowadzenia metodyki, korzystając z generatorów oraz założeń przedstawionych w punkcie 4 niniejszej pracy,
- przygotowanie wyników wzorcowych,
- dostarczenie danych do symulacji, instrukcji metodyki, formularza wykonania etapów metodyki oraz pytań ankietowych do wybranych osób,
- analiza otrzymanych wyników, porównanie wyników z wynikami wzorcowymi.

6.1. Wybór osób biorących udział w ocenie

W badaniu udział wzięli:

- główny planista w przedsiębiorstwie zajmującym się drukiem wielkoformatowym. Drukarnia specjalizuje się w druku wielkoformatowym na różnego rodzaju podłożach, np. na flagach, banerach, siatkach czy foliach. Firma obsługuje zlecenia dla klientów z całej Europy,
- kierownik produkcji w spółdzielni mleczarskiej. Mleczarnia znana jest z produkcji twarogów, mleka, śmietany, czy masła, za które otrzymała wiele nagród. Firma obsługuje zlecenia głównie dla klientów krajowych, ale także dla klientów z Europy, Azji i Afryki,
- pracownik naukowo-dydaktyczny Politechniki Poznańskiej. Reprezentuje obszar naukowy związany z zarządzaniem i organizacją produkcji. Ma na swoim koncie wiele publikacji naukowych z zakresu planowania i sterowania produkcji.

Wymienione osoby mają wiedzę na temat planowania produkcji. Wszyscy wykonywali działania samodzielnie na podstawie dostarczonych danych oraz instrukcji wykonywania poszczególnych etapów metodyki.

6.2. Dane wejściowe

Zostały wygenerowane następujące dane wejściowe:

1. liczba pozycji asortymentowych f : 7 (nazwano je wyrobami A-G), średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe wielkości l i częstości c zamówień historycznych, tabela 6.1,

Tabela 6.1 Średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe wielkości l i częstości c zamówień historycznych dla wyrobów A-G, opracowanie własne

Lp.	Wyrób	Średnia wielkość zamówień \bar{x}_l [szt/tydzień]	Średnia częstość zamówień \bar{x}_c [zamówień/tydzień]	Odchylenie standardowe częstości zamówień σ_c
1	A	100	5	1,5
2	B	100	5	2
3	C	10	5	2
4	D	60	5	2
5	E	50	2	3
6	F	10	2	1
7	G	60	5	1

- liczba stanowisk roboczych K_x^0 : 3 (K_1^0 „stanowisko 1”, K_2^0 „stanowisko 2”, K_3^0 „stanowisko 3”),
- proces technologiczny, z przypisaniem operacji technologicznych do stanowisk (tabela 6.2),

Tabela 6.2 Proces technologiczny wyrobów A-G, opracowanie własne

Wyrób/Stnowisko	1	2	3
A	1	0	1
B	0	1	1
C	1	1	0
D	1	0	0
E	1	1	1
F	0	1	1
G	0	1	1

- czasy operacji technologicznych t_j (tabela 6.3)

Tabela 6.3 Czasy operacji technologicznych t_j , opracowanie własne

Wyrób/Stnowisko	1	2	3
A	0,12		0,04
B		0,12	0,08
C	0,12	0,04	
D	0,12		
E	0,01	0,08	0,01
F		0,1	0,06
G		0,12	0,08

Założono również, że:

- jednostka czasu jest równa 40 godzinom roboczym (tygodniowi roboczemu),
- dostępny czas pracy równy 37,5 godziny,
- średnia efektywność maszyn jest na poziomie 80%,
- współczynnik bezpieczeństwa jest na poziomie 20%,
- czas przezbrojenia wynosi 0,4 godziny dla wszystkich stanowisk,

- czas na produkcję zleceń pilnych wyrobów przy obliczeniu możliwej liczby przebrojeń MLP wynosi 4 godziny.

6.3. Instrukcje

Przygotowano instrukcje wykonywania poszczególnych etapów metodyki oraz formularz w programie Excel, która umożliwi sprawne wykonanie jej etapów. Instrukcja została podzielona na 6 części zgodnie z sześcioma krokami metodyki. W każdej instrukcji znajduje się wyjaśnienie poszczególnych zagadnień oraz przykład jak należy krok wykonać. Fragmenty instrukcji kroku 1 metodyki poziomowania produkcji znajdują się na rysunku 6.1, natomiast pełne instrukcje znajdują się w załączniku 3.

PRACA DOKTORSKA „Metodyka poziomowania produkcji w kontekście rotacji zapasów oraz dostępności wyrobów gotowych”

Z I P

INSTRUKCJA WYKONYWANIA ETAPU 1 METODYKI PODZIAŁ WYROBÓW NA GRUPY

1. Informacje wstępne

Pierwszy etap metodyki dotyczy podziału wyrobów na grupy w zależności od sprzedawanych ilości tych wyrobów oraz częstotliwości ich sprzedaży. W tym celu zastosowana została analiza ABC/XYZ. Analizę należy rozpocząć od pozyskania danych dotyczących:

- indeksów produkowanych detali,
- struktur wyrobów gotowych (jeśli sprzedawane do klienta wyroby są wyrobami złożonymi);
- ilości zamawianych wyrobów przez klientów z okresu minimum 1 roku,
- częstotliwości zamówień klientów.

W przypadku produkcji i sprzedaży wyrobów prostych, punkt związany z określeniem struktury wyrobu nie ma zastosowania. Dla tej sytuacji należy jedynie pozyskać indeksy produkowanych detali oraz częstotliwości ich sprzedaży.

Jednakże w przypadku sprzedaży wyrobów złożonych, dla których przedsiębiorstwo również produkuje wyroby proste, wchodzące w skład wyrobu złożonego, należy wziąć pod uwagę listę materiałową (BOM) wyrobu złożonego. W rzeczywistości produkcyjnej można spotkać się z następującymi sytuacjami:

- produkcja standardowych wyrobów złożonych, na które składają się standardowe wyroby proste – w takim przypadku, ze względu na powtarzalność produkcji, poziomowanie może być zastosowane zarówno w przypadku wyrobów złożonych jak i wyrobów prostych.

2.3. Średnia liczba zamówień na wyroby w ujęciu miesięcznym

Kolejnym krokiem analizy jest wykonanie analizy XYZ. W pierwszej gotowej dane dotyczące częstotliwości zamówień klientów w czasie 1 roku lub więcej w ujęciu miesięcznym. Na potrzeby przykładu przyjęto następujące dane dotyczące średniej liczby zamówień klientów na 10 wyrobów (A-J) z okresu 1 roku w ujęciu miesięcznym (tab. 3).

Wyroby	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	45	40	35	30	25	20	15	10	5	5	5	5
B	55	47	39	30	24	19	13	7	4	2	2	2
C	55	44	35	24	16	11	7	4	2	2	2	2
D	23	20	16	13	10	8	6	4	3	2	2	2
E	22	4	15	8	5	10	8	8	6	10	17	10
F	3	4	4	5	5	4	2	4	6	3	4	3
G	22	27	22	18	13	9	10	10	15	14	12	13
H	45	35	30	24	18	14	10	8	5	4	3	3
I	35	40	35	30	24	18	14	10	8	5	4	3
J	41	30	24	18	14	10	8	5	4	3	2	2

2.4. Średnia dzienna liczba zamówień na poszczególne wyroby

Oblicz średnią dzienną liczbę zamówień klientów oraz odchylenie standardowe od wartości średniej. W dalszej kolejności oblicz się współczynnik zmienności V oraz przyporządkuj wyrob do kategorii X, Y lub Z. Współczynnik zmienności jest uważany za kryterium podziału w analizie XYZ i przyjmuje wzór:

$$V = \frac{S}{\bar{X}}$$

gdzie:
 S – odchylenie standardowe;
 X – wartość średnia cechy
 Przy klasyfikacji do grup XYZ, przyjmij wartości z poniższej tabeli (tab. 4).

Kategoria	Współczynnik zmienności
X	0 - 0,5
Y	0,51 - 0,9
Z	> 0,91

Rysunek 6.1 Fragment instrukcji kroku 1 metodyki poziomowania produkcji, opracowanie własne

W formularzu przygotowano table, do których możliwe jest wpisanie danych w poszczególnych etapach metodyki oraz zawarto podstawowe formuły ułatwiające podstawowe obliczenia. Wpisane zostały również założone wcześniej dane, jak na przykład dostępny czas pracy, czy średni czas przebrojenia. Fragment formularza zaprezentowany jest na rysunku 6.2.

1. Podział na grupy				ABC					XYZ						
Lp.	Wyroby	Wielkość zamówień (tydz)	Częstotliwość zamówień średnia (x/tydz)	Lp.	Wyroby	Wielkość zamówień (tydz)	Skumulowana	%	ABC	Lp.	Wyroby	Częstotliwość zamówień średnia (x/tydz)	Odchylenie częstotliwości zamówień	V=D/X	XYZ
SUMA				0											

Rysunek 6.2 Fragment formularza w programie Excel, opracowanie własne

Przygotowano również ankietę dotyczącą opinii o poszczególnych etapach metodyki i metodyce ogólnie. Kwestionariusz ankiety składa się z 14 pytań zamkniętych oraz 7 pytań otwartych. W tabeli 6.4 przedstawiono kwestionariusz ankiety.

Tabela 6.4 Ankieta wypełniana przez ekspertów, opracowanie własne

Lp.	Pytanie	Odpowiedzi		
		TAK	NIE	TRUDNO POWIEDZIEĆ
Etap 1 - Podział produkowanych wyrobów na grupy priorytetowe				
1.	Czy instrukcja dotycząca etapu 1 metodyki jest napisana w sposób czytelny i zrozumiały?			
2.	Czy przeprowadzenie 1 etapu metodyki sprawiło trudność?			
3.	Własne przemyślenia dotyczące 1 etapu metodyki			
Etap 2 - Podział wyrobów z grupy priorytetowej na rodziny				
1.	Czy instrukcja dotycząca etapu 2 metodyki jest napisana w sposób czytelny i zrozumiały?			
2.	Czy przeprowadzenie 2 etapu metodyki sprawiło trudność?			
3.	Własne przemyślenia dotyczące 2 etapu metodyki			
Etap 3 - Wyznaczenie czasów uzupełnienia zapasów wyrobów w magazynie				
1.	Czy instrukcja dotycząca etapu 3 metodyki jest napisana w sposób czytelny i zrozumiały?			
2.	Czy przeprowadzenie 3 etapu metodyki sprawiło trudność?			
3.	Własne przemyślenia dotyczące 3 etapu metodyki			
Etap 4 - Określenie wielkości zapasów w magazynie wyrobów gotowych				
1.	Czy instrukcja dotycząca etapu 4 metodyki jest napisana w sposób czytelny i zrozumiały?			
2.	Czy przeprowadzenie 4 etapu metodyki sprawiło trudność?			
3.	Własne przemyślenia dotyczące 4 etapu metodyki			
Etap 5 - Opracowanie wariantów harmonogramów produkcji				
1.	Czy instrukcja dotycząca etapu 5 metodyki jest napisana w sposób czytelny i zrozumiały?			
2.	Czy przeprowadzenie 5 etapu metodyki sprawiło trudność?			
3.	Własne przemyślenia dotyczące 5 etapu metodyki			
Etap 6 - Wybór harmonogramu produkcji				
1.	Czy instrukcja dotycząca etapu 6 metodyki jest napisana w sposób czytelny i zrozumiały?			
2.	Czy przeprowadzenie 6 etapu metodyki sprawiło trudność?			
3.	Własne przemyślenia dotyczące 6 etapu metodyki			
Metodyka poziomowania produkcji				
1.	Czy prezentowana metodyka jest czytelna i możliwa do zastosowania w praktyce produkcyjnej?			
2.	Czy prezentowana metodyka zawiera znane i stosowane w praktyce metody i narzędzia zarządzania produkcją?			
3.	Własne przemyślenia dotyczące całej metodyki			

6.4. Wykonanie etapów metodyki poziomowania produkcji

Poniżej przedstawiono efekty zastosowania metodyki uzyskane przez ankietowanych.

Krok 1 metodyki, wszystkie ankietowane osoby wykonały w dokładnie taki sam sposób, a uzyskane wyniki nie różniły się od siebie. Rysunek 6.3 przedstawia uzyskane wyniki.

1. Podział na grupy				ABC					XYZ							
Lp.	Wyroby	Wielkość zamówień (tydz)	Częstość zamówień średnia (x/tydz)	Odczylenie częstości zamówień	Lp.	Wyroby	Wielkość zamówień (tydz)	Skumulowana	%	ABC	Lp.	Wyroby	Częstość zamówień średnia (x/tydz)	Odczylenie częstości zamówień	V=D/X	XYZ
1	A	100	5	1,5	1	A	100	100	26%	A	1	A	5	1,5	0,3	X
2	B	100	5	2	2	B	100	200	51%	A	2	B	5	2	0,4	X
3	C	10	5	2	3	D	60	260	67%	A	3	C	5	2	0,4	X
4	D	60	5	2	4	G	60	320	82%	B	4	D	5	2	0,4	X
5	E	50	2	3	5	E	50	370	95%	B	5	E	2	3	1,5	Z
6	F	10	2	1	6	C	10	380	97%	C	6	F	2	1	0,5	X
7	G	60	5	1	7	F	10	390	100%	C	7	G	5	1	0,2	X
SUMA		390														

	X	Y	Z
A	A, B, D		
B	G		
C	F, C		

Rysunek 6.3 Analiza ABC/XYZ, opracowanie własne

Krok 2 metodyki polegający na określeniu rodzin wyrobów również wszystkie osoby wykonały w sposób prawidłowy, a uzyskane wyniki nie różnią się od siebie. Wskazano, że są 3 rodziny wyrobów: rodzina A, rodzina B i G, oraz rodzina D (rysunek 6.4).

2. Podział wybranych wyrobów na rodziny			
Stanowisko/ Wyrób	1	2	3
A	X		X
B		X	X
D	X		
G		X	X

Rysunek 6.4 Podział wyrobów na rodziny, opracowanie własne

Krok 3 metodyki dotyczył wyznaczenia częstości powtórzeń wyrobów, a więc obliczenia wskaźnika EPEI. Również i w tym przypadku uczestnicy wykonali obliczenia wskaźnika dokładnie w ten sam sposób i uzyskali zbieżne wyniki (rysunek 6.5). Jeden z respondentów zwrócił jednak uwagę na to, że wpisane wcześniej dane, jak dostępny czas pracy, czy średnia efektywność oraz utworzone formuły ułatwiły wykonanie zadania.

Kolejny krok metodyki, czyli wyznaczenie wielkości zapasu również nie przysporzył uczestnikom problemów z obliczeniami, a otrzymane przez nich wyniki pokrywały się (rysunek 6.6). W tym punkcie jednak uczestnicy zwrócili uwagę na niejasność w zrozumieniu współczynnika zmienności. Wskazuje to na konieczność zmiany instrukcji i doszczegółowienia informacji w tym zagadnieniu.

I. Wyznaczenie częstotliwości powtórzeń produkcji wyrobów

Wyznaczenie MLP dla stanowiska 1				
Wyroby	A	D		SUMA
Średnie zapotrzebowanie tygodnie	100	60		160
Czas tj [h]	0,12	0,12		0,2400
Czas realizacji zapotrzebowania [h]	12,0	7,2		19,2
Dostępny czas pracy [h/tydzień]				37,5
Średnia efektywność maszyn [%]				80%
Czas efektywny [h/dzień]				30
Czas na inne wyroby				4
Dostępny czas na przebrojenia				6,80
Średni czas przebrojenia [h]				0,4
MLP - Możliwa liczba przebrojeń				17,000

Wyznaczenie MLP dla stanowiska 2				
Wyroby	B	G		SUMA
Średnie zapotrzebowanie tygodnie	100	60		160
Czas tj [h]	0,12	0,12		0,2400
Czas realizacji zapotrzebowania [h]	12,0	7,2		19,2
Dostępny czas pracy [h/tydzień]				37,5
Średnia efektywność maszyn [%]				80%
Czas efektywny [h/dzień]				30
Czas na inne wyroby				4
Dostępny czas na przebrojenia				6,80
Średni czas przebrojenia [h]				0,4
MLP - Możliwa liczba przebrojeń				17,000

Wyznaczenie MLP dla stanowiska 3				
Wyroby	A	B	G	SUMA
Średnie zapotrzebowanie dziennie	100	100	60	260
Czas tj [h]	0,04	0,08	0,08	0,2000
Czas realizacji zapotrzebowania	4,0	8,0	4,8	16,8
Dostępny czas pracy [h/tydzień]				37,5
Średnia efektywność maszyn [%]				80%
Czas efektywny [h/dzień]				30
Czas na inne wyroby				4
Dostępny czas na przebrojenia				9,30
Średni czas przebrojenia [h]				0,4
MLP - Możliwa liczba przebrojeń				23,000

EPEI dla stanowiska 1 = 0,12
 EPEI dla stanowiska 2 = 0,12
 EPEI dla stanowiska 3 = 0,13
 Zatem EPEI dla całego procesu wytwórczego jest równe 0,13

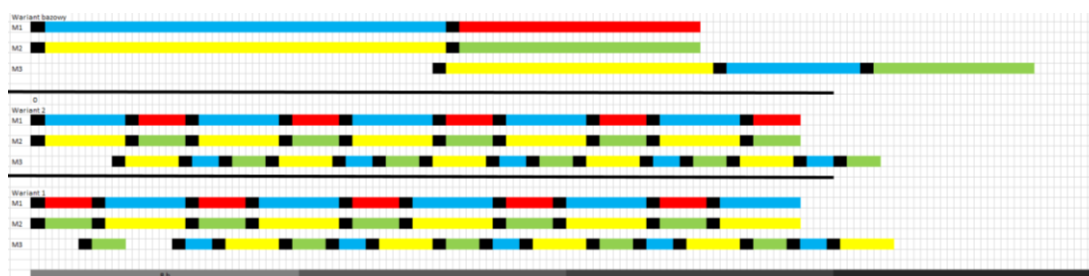
Rysunek 6.5 Wyznaczenie wartości wskaźnika EPEI, opracowanie własne

4. Wyznaczenie wielkości zapasów

Zapasy rotacyjny				Zapasy buforowy				Zapasy bezpieczeństwa				Zapasy suma					
Wyroby	Średnia sprzedaż dzienna	Czasu uzupełnienia [dni]	Zapasy rotacyjny	Wyroby	Współczynnik zmienności	Zapasy rotacyjny	Zapasy buforowy	Wyroby	Współczynnik bezpieczeństwa	Zapasy rotacyjny	Zapasy buforowy	Zapasy bezpieczeństwa	Wyroby	Zapasy rotacyjny	Zapasy buforowy	Zapasy bezpieczeństwa	suma
A	100	0,13	13	A	0,3	13	4	A	20%	13	4	4	A	13	4	4	21
B	100	0,13	13	C	0,4	13	6	C	20%	13	6	4	C	13	6	4	23
D	60	0,13	8	D	0,4	8	4	D	20%	8	4	3	D	8	4	3	15
G	60	0,13	8	E	0,2	8	2	E	20%	8	2	2	E	8	2	2	12
			0														
			0														

Rysunek 6.6 Wyznaczenie wielkości zapasów, opracowanie własne

Ostatnie dwa punkty metodyki to wykonanie harmonogramów produkcji oraz wybór wariantu harmonogramu. W pierwszym kroku uczestnicy wyznaczyli wielkość partii. Wszyscy skorzystali z obliczeń wskaźnika NMLP i podzielili wszystkie produkowane wyroby na 5 partii. Na rysunku 6.7 przedstawiono wykonany harmonogram, Podziałka harmonogramu wynosiła 0,2 godziny i była z góry określona w formularzu w programie Excel.



Rysunek 6.7 Harmonogramy dla produkcji w 5 partiach, opracowanie własne

Wybrany harmonogram w przedstawionym wyżej przypadku, według oceniających, był wariant 1 zakładający produkcję według reguły priorytetu najpierw najdłuższe operacje. Co pokrywa się z założeniem, że wybranym wariantem powinien być ten, który na najniższą wartość wskaźnika C_{max} .

6.5. Podsumowanie otrzymanych wyników

Podsumowując, wszystkie oceniające osoby otrzymały dokładnie takie same wyniki we wszystkich krokach metodyki. Jednakże w dwóch krokach uczestnicy mieli dodatkowe uwagi, które zawarli w ankiecie:

- w kroku 4 metodyki – wyznaczenie wielkości zapasów, uczestnicy poprosili o dodatkowe wyjaśnienia dotyczące współczynnika zmienności;
- w kroku 5 metodyki – utworzenie wariantów harmonogramu produkcji, uczestnicy pytali o możliwy podział na partie i wpływ ich wyboru na harmonogram produkcji.

Obie te opinie mogły być związane z niewłaściwymi sformułowaniami umieszczonymi w instrukcji lub brakiem szczegółowych informacji w tych zagadnieniach.

Wykonane obliczenia nie różniły się od siebie oraz od wyników wzorcowych, co dowodzi, iż metodyka jest powtarzalna i zrozumiała, a także, że otrzymywane wyniki nie powinny się od siebie różnić, niezależnie od tego, kto będzie przeprowadzał etapy metodyki. Wszystkie osoby również zgodnie stwierdziły w ankiecie, że:

- dostarczone instrukcje jasno określały kroki postępowania (w ankiecie, na pytanie 1 dotyczące etapów MPP, wszyscy eksperci odpowiedzieli twierdząco),
- etapy metodyki były proste do przeprowadzenia (w ankiecie, na pytanie 2 dotyczące etapów MPP, wszyscy eksperci odpowiedzieli przecząco, co oznaczam że przeprowadzenie etapów metodyki nie sprawiło trudności),
- metodyka jest czytelna i możliwa do zastosowania w praktyce (w ankiecie, na pytanie 1 dotyczące MPP, wszyscy eksperci odpowiedzieli twierdząco),
- metodyka zawiera znane i stosowane w praktyce narzędzia i metody zarządzania produkcją (w ankiecie, na pytanie 2 dotyczące etapów MPP, wszyscy eksperci odpowiedzieli twierdząco).

7. Podsumowanie i wnioski

Wnioski z analizy literatury

Studia literaturowe wykazały, że odczuwalny jest brak jasnej i spójnej definicji poziomowania produkcji, a także jednoznacznie określonego celu poziomowania. Pozwoliły także zauważyć, że stosowane są dwa podejścia do wdrażania poziomowania produkcji: podejście analityczne oraz intuicyjne. W obu podejściach wskazać można kilka różnych sposobów implementacji. Niemniej jednak wszystkie opisane w literaturze sposoby nie znalazły szerszego, realnego zastosowania w rzeczywistych przedsiębiorstwach produkcyjnych z powodu, albo zbyt lakonicznego opisu metodyki, albo zbyt zaawansowanych obliczeń matematycznych.

Powyższe wnioski stały się przesłanką do podjęcia pracy nad jednoznacznym zdefiniowaniem pojęcia poziomowanej produkcji oraz opracowania nowej metodyki poziomowania produkcji.

W pracy została przedstawiona autorska definicja poziomowania produkcji, która w sposób uporządkowany tłumaczy zasady poziomowania produkcji oraz jej cele. Została także opracowana metodyka poziomowania produkcji, która reprezentuje podejście praktyczne. W tym podejściu, autorski sposób poziomowania produkcji jest przede wszystkim możliwy do realizacji, ustrukturyzowany i szczegółowy, czyli taki, który będzie można zastosować w warunkach produkcyjnych. Jest również na tyle prosty, aby przedsiębiorstwo mogło go zrealizować, wykorzystując posiadaną wiedzę i korzystając z dostępnych, znanych metod i narzędzi do analizy i doskonalenia procesów. Metodyka zawiera 6 etapów postępowania. Każdy etap został szczegółowo opisany, oraz zilustrowany odpowiednim przykładem.

Metodyka została eksperymentalnie zweryfikowana, za pomocą eksperymentu symulacyjnego. Przeprowadzono eksperyment dla 100 symulacji. Miało to na celu porównanie: wskaźnika rotacji zapasów i zamówień zrealizowanych na czas, w przypadku zastosowania produkcji poziomowanej oraz bazowej. Produkcja poziomowana uzyskała znacząco lepsze wyniki pod kątem założonych wskaźników.

Przeprowadzono również porównanie produkcji poziomowanej oraz planowanej klasycznie na dwóch wydziałach przedsiębiorstwa produkcyjnego. W obu przypadkach wskaźnik zamówień zrealizowanych na czas dla produkcji poziomowanej był wyższy aniżeli dla produkcji bazowej, a wskaźnik rotacji zapasów dla produkcji poziomowanej był niższy aniżeli dla bazowej.

Metodyka została również oceniona przez 3 osoby związane zawodowo z planowaniem produkcji – planistę, kierownika produkcji oraz pracownika naukowo-dydaktycznego. Wszystkie osoby uzyskały identyczne wyniki a także zgodnie stwierdziły, że metodyka nie sprawiła trudności przy wykonywaniu poszczególnych jej etapów, a dostarczone instrukcje i przygotowany formularz jasno określały kroki postępowania.

Wnioski dotyczące osiągnięcia celów pracy

Cel pracy został osiągnięty. Opracowano praktyczną metodykę poziomowania produkcji w warunkach zmiennego zapotrzebowania na wyroby. Praktyczność poziomowania produkcji dotyczy zastosowania znanych i powszechnie stosowanych metod i narzędzi zarządzania produkcją, dzięki czemu możliwe będzie zastosowanie metodyki w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

Przedstawione wyniki badań, weryfikujących działanie metodyki poziomowania produkcji stwierdza się słuszność stawianej tezy pracy. Metodyka poziomowania produkcji, bazująca na znanych i stosowanych metodach i narzędziach zarządzania produkcją, umożliwia zwiększenie rotacji wyrobów gotowych w magazynie przy równoczesnym zwiększeniu dostępności wyrobów gotowych dla klienta.

W szczególności zastosowanie MPP:

- umożliwia osiągnięcie statystycznie istotnie lepszych wyników odnośnie do rotacji zapasów dla wyrobów niż produkcja bazowa, zapewniając tym samym wyroby do zamówień zrealizowanych na czas klientów,
- umożliwia osiągnięcie statystycznie istotnie lepszych wyników odnośnie dostępności wyrobów gotowych niż produkcja bazowa, zasada ta nie działa, w momencie, w którym spływ całej partii w produkcji bazowej jest szybszy niż spływ w produkcji poziomowanej,
- zapewnia stabilność harmonogramu produkcji przy zmiennym zapotrzebowaniu, przy założeniu, że zapotrzebowanie waha się w granicach odchylenia standardowego od jego wartości średniej,
- daje możliwość przeprowadzenia standaryzacji procesów, dzięki zapewnieniu stabilnego spływu wyrobów,
- może być z powodzeniem zastosowana w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

Kierunki dalszych prac

W dalszych badaniach przewidywane jest sprawdzenie działania metodyki poziomowania produkcji w odniesieniu do innych kryteriów, m.in. obciążenia maszyn, czy kosztów magazynowania.

Celowe jest również prowadzenie dalszych badań nad rozwojem metodyki, szczególnie w zakresie jej automatyzacji oraz możliwej implementacji w systemach informatycznych.

Bibliografia

- Adan, I., & Van der Wal, J. (1998). Combining make to order and make to stock. *OR Spektrum*, 20(2), pp. 73-81. doi:10.1007/BF01539854
- Akanmu, M., Nordin, N., & Gunasilan, U. (2022). Lean Manufacturing Practices and Integration of IR 4.0 Technologies for Sustainability in the Healthcare Manufacturing Industry. *International Journal Of Service Management And Sustainability*, 7(1), pp. 21-48. doi:10.24191/ijsms.v7i1.17777
- Aktunc, E., Basaran, M., Ari, G., Irican, & M., G. S. (2019). Inventory Control Through ABC/XYZ Analysis. In F. Calisir, E. Cevikcan, & H. Camgoz Akdag, *Industrial Engineering in the Big Data Era. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering* (pp. 174-187). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-030-03317-0_15
- Andel, T. (1999). Accentuate heijunka, eliminate junk, supply chain flow. *Material Handling Engineering*, 54(8), p. 77.
- Araujo, L. (2008). *Method for application of Production Leveling in repetitive manufacturing systems with batch production*. Santa Catarina: Federal University of Santa Catarina, Department of Mechanical Engineering.
- Araujo, L., & Queiroz, A. (2010). Production Leveling (Heijunka) Implementation in a Batch Production System: A Case Study. In B. Vallespir, & T. Alix, *Advances in Production Management Systems. New Challenges, New Approaches. APMS 2009. IFIP Advances in Information and Communication Technology* (Vol. 338, pp. 105-112). Heidelberg: Springer Berlin. doi:10.1007/978-3-642-16358-6_14
- Arima, S., Zhang, Y., Akiyama, Y., & Ishizaki, Y. (2017). Dynamic scheduling of product-mix production systems of MTS and MTO. *2017 Joint International Symposium on e-Manufacturing and Design Collaboration (eMDC) & Semiconductor Manufacturing (ISSM)*, (pp. 1-4). Hsinchu. doi:10.23919/ISSM.2017.8089090
- Arreola-Risa, A., & DeCroix, G. (1998). Make-to-order versus make-to-stock in a production-inventory system with general production times. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 30(8), pp. 705-713. doi:10.1080/07408179808966516
- Axsater, S., & Jonsson, H. (1984). Aggregation and disaggregation in hierarchical production planning. *European Journal of Operational Research*, 17(3), pp. 338-350. doi:10.1016/0377-2217(84)90129-2
- Azevedoa, J., Sá, J., Ferreira, L., Santos, G., Cruz, F., Jimenez, G., & Silva, F. (2019). Improvement of Production Line in the Automotive Industry Through Lean Philosophy. *Procedia Manufacturing*, 41, pp. 1023-1030. doi:10.1016/j.promfg.2019.10.029
- Babalska, D. (2013). *Efektywne planowanie procesu wytwórczego - Heijunka i Bęben-Bufor-Lina*. Sulejówek: Wydawnictwo Wiedza i Praktyka.
- Baraniecka, A. (2011). Sales and Operations Planning (S&OP) jako przejaw podejścia procesowego w zarządzaniu łańcuchem dostaw. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 169, pp. 15-25.
- Baumol, W. (1951). *Economic Dynamics*. London: Macmillan.

- Beckman, M. (1961). Production smoothing and inventory control. *Operations Research*, 9(4), pp. 437-599. doi:10.1287/opre.9.4.456
- Beemsterboer, B., Land, M., & Teunter, R. (2016). Hybrid MTO-MTS production planning: An explorative study. *European Journal of Operational Research*, 248(2), pp. 453-461. doi:10.1016/j.ejor.2015.07.037
- Bemelmans, R. (1986). *The Capacity-Aspect of Inventories*. Heidelberg: Springer.
- Blanchard, O. (1983). The production and inventory behavior of the American automobile industry. *Journal of Political Economy*, 91(3), pp. 364-400. doi:10.1086/261154
- Blinder, A. (1986). Can the production smoothing model of inventory behavior be saved? *The Quarterly Journal of Economics*, 101(3), pp. 431-454. doi:10.2307/1885691
- Blinder, A., & Maccini, L. (1991). The resurgence of inventory research: What have we learned? *Journal of Economic Surveys*, 5(4), pp. 293-328. doi:10.1111/j.1467-6419.1991.tb00138.x
- Błażewicz, J., Domschke, W., & Pesch, E. (1996). The job shop scheduling problem: Conventional and new solution techniques. *European Journal of Operational Research*, 93(1), pp. 1-33. doi:10.1016/0377-2217(95)00362-2
- Błażewicz, J., Ecker, K., Pesch, E., Schmidt, G., & Węglarz, J. (2001). *Scheduling in computer and manufacturing processes*. Heidelberg: Springer Berlin. doi:10.1007/978-3-662-04363-9
- Bohnen, F., Maschek, T., & Deuse, J. (2011). Leveling of low volume and high mix production based on a Group Technology approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(1), pp. 247-251. doi:10.1016/j.cirpj.2011.06.003
- Bortolini, M., Calabrese, F., & Galizia, F. R. (2023). A two-step methodology for product platform design and assessment in high-variety manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:10.1007/s00170-023-11347-8
- Brzeziński, M. (2002). *Organizacja i sterowanie produkcją*. Warszawa: Agencja wydawnicza PLACET.
- Buchalski, Z. (2004). Heurystyczny algorytm szeregowania zadań w systemach produkcyjnych z maszynami równoległymi w warunkach ograniczeń zasobowych. In R. Knosala, *Komputerowo zintegrowane zarządzanie* (Vol. 1). Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Buhl, M., Bohnen, F., Deuse, J., & Schneider, R. (2009). Effiziente Kleinserienfertigung durch Produktionsnivellierung. *Productivity Management*, 14, pp. 19-22.
- Buliński, J., Waszkiewicz, C., & Buraczewski, P. (2013). Utilization of ABC/XYZ analysis in stock planning in the enterprise. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Agriculture*, 61, pp. 89-96.
- Burnett, K. (2002). *Relacje z kluczowymi klientami: analiza i zarządzanie*. Kraków: Oficyna Ekonomiczna.
- Cachon, G., Randall, T., & Schmidt, G. (2007). In search of the bullwhip effect. *Manufacturing & Service Operations Management*, 9(4), pp. 457-479. doi:10.1287/msom.1060.0149
- Cantora, D., & Katok, E. (2012). Production smoothing in a serial supply chain: A laboratory investigation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(4), pp. 781-794. doi:10.1016/j.tre.2012.01.005

- Caridi, M., & Cigolini, R. (2001). Buffering against lumpy demand in MRP environments: a theoretical approach and a case study. *Proceedings of the Fourth SMESME International Conference*. Aalborg.
- Carr, S., & Duenyas, I. (2000). Optimal admission control and sequencing in a make-to-stock make-to-order production system. *Operations research*, 48(5), pp. 709-720. doi:10.1287/opre.48.5.709.12401
- Chabowski, P., & Rewers, P. (2015). Wpływ przebrojeń na elastyczność produkcji. *Logistyka*, 4(3), pp. 8736-8743.
- Chase, R. (1993). Differing perceptions. *The Total Quality Management Magazine*, 5(2), pp. 19-21. doi:10.1108/EUM0000000003064
- Chen, C., Neppalli, R., & Aljaber, N. (1996). Genetic algorithms applied to the continuous flow shop problem. *Computers and Industrial Engineering*, 30(4), pp. 919-929. doi:10.1016/0360-8352(96)00042-3
- Chlebus, E. (2000). *Techniki komputerowe CAx w inżynierii produkcji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Ciechańska, O. (2018). Model wytwarzania na dostępność jako nowe podejście do planowania produkcji. In K. Ryszard, *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji* (Vol. 1, pp. 410-419). Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.
- Coffman, E. (1980). *Teoria szeregowania zadań*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Coleman, J., & Vaghefi, M. (1994). Heijunka: A Key to the Toyota Production System. *Production and Inventory Management Journal*, 35(4), pp. 31-35.
- Czerska, J. (2009). *Doskonalenie strumienia wartości*. Warszawa: Difin.
- Daniel, V., & Guide Jr., R. (2000). Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of Operations Management*, 18(4), pp. 467-483. doi:10.1016/S0272-6963(00)00034-6
- Danilczuk, W., Gola, A., & Grzmar, P. (2022). Job Scheduling Algorithm for a Hybrid MTO-MTS Production Process. *IFAC-PapersOnLine*, 55(2), pp. 451-456. doi:10.1016/j.ifacol.2022.04.235
- Das, B., Richard, J., Shah, N., & Macchietto, S. (2000). An investigation on integration of aggregate production planning, master production scheduling and short-term production scheduling of batch process operations through a common data model. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7), pp. 1625-1631. doi:10.1016/S0098-1354(00)80014-9
- Das, S., & Patnaik, A. (2015). Production planning in the apparel industry. In R. Nayak, & R. Padhye, *In Woodhead Publishing Series in Textiles* (pp. 81-108). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Dennis, P. (2007). *Lean Production Simplified*. New York: Productivity Press.
- Digiesi, S., Facchini, F., & Silvestri, S. (2022). Green strategies to reduce the environmental impact of jam production. *Transportation Research Procedia*, 67, pp. 72-82. doi:10.1016/j.trpro.2022.12.037

- Dimelis, S., & Ghali, M. (1994). Classical and variance bounds tests of the production smoothing hypothesis. *International Journal of Production Economics*, 35(1-3), pp. 15-22. doi:10.1016/0925-5273(94)90060-4
- Dolgui, A., Ivanov, D., Sethi, S., & Sokolov, B. (2019). Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications. *International Journal of Production Research*, 57(2), pp. 411-432. doi:10.1080/00207543.2018.1442948
- Domański, R., & Hadaś, Ł. (2008). Technological and organizational similarity coefficient (α) as a basis for value streams in lean production. *LogForum*, 4(2/4). Retrieved from https://www.logforum.net/vol4/issue2/no4/4_2_4_2008.html
- DSR Solution. (2016). Retrieved 03 01, 2023, from produkcja.expert/planowanie-produkcji/378-badania-na-temat-planowania-produkcji
- Dudek, R., Panwalkar, S., & Smith, M. (1992). The lessons of flowshop scheduling research. *Operations Research*, 40, pp. 7-13. doi:10.1287/opre.40.1.7
- Dylewski, R., & Jardzioch, A. (2014). Scheduling production orders, taking into account delays and waste. *Management and Production Engineering Review*, 3, pp. 3-8. doi:10.2478/mper-2014-0021
- Elmaleh, J., & Eilon, S. (1974). A new approach to production smoothing. *International Journal of Production Research*, 12(6), pp. 673-681. doi:10.1080/00207547408919584
- ElMaraghy, H., & Deif, A. (2014). Dynamic modelling of impact of lean policies on production levelling feasibility. *CIRP Annals*, 63(1), pp. 389-392. doi:10.1016/j.cirp.2014.03.108
- Fair, R. (1989). The production smoothing model is alive and well. *Journal of Monetary Economics*, 24(3), pp. 353-370. doi:10.1016/0304-3932(89)90026-3
- Fattahi, P., & Fallahi, A. (2010). Dynamic scheduling in flexible job shop systems by considering simultaneously efficiency and stability. *Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2), pp. 114-123. doi:10.1016/j.cirpj.2009.10.001
- Federgruen, A., & Katalan, Z. (1999). Impact of adding a make-to-order item to a make-to-stock production system. *Management Science*, 45(7), pp. 980-994. doi:10.1287/mnsc.45.7.980
- Fink, A., & Voß, S. (2003). Solving the continuous flow-shop scheduling problem by metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, 151(2), pp. 400-414. doi:10.1016/S0377-2217(02)00834-2
- FlexSim Software Products. (2023). Retrieved from <https://flexsim.pl/flexsim/>
- French, P. (1982). Sequencing and scheduling: an introduction to the mathematics of the job shop. *Networks*, 13(2), pp. 310-311. doi:10.1002/net.3230130218
- Fujimoto, T. (1999). *The Evolution of a Manufacturing System at Toyota*. New York: Oxford University Press.
- Gabbay, H. (1975). *A Hierarchical Approach to Production Planning*. Operation Research Center, MIT.
- Gahm, C., Uzunoglu, A., Wahl, S., Ganschinietz, C., & Tuma, A. (2022). Applying machine learning for the anticipation of complex nesting solutions in hierarchical production

- planning. *European Journal of Operational Research*, 296(3), pp. 819-836. doi:10.1016/j.ejor.2021.04.006
- Gebus, S., Martin, O., Soulas, A., & Juuso, E. (2004). Production optimization on PCB assembly lines using discrete-event simulation. *Control Engineering Laboratory. Report A.*, 24.
- Gelders, L., & Van Wassenhove, L. (1981). Production planning: a review. *European Journal of Operational Research*, 7(2), pp. 101-110.
- Gersak, J. (2013). 4 - Planning and organisation of clothing production. In J. Geršak, *Design of Clothing Manufacturing Processes* (pp. 87-104). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Geurtsen, M., Didden, J., Adan, J., Atan, Z., & Adan, I. (2023). Production, maintenance and resource scheduling: A review. *European Journal of Operational Research*, 305(2), pp. 501-529. doi:10.1016/j.ejor.2022.03.045
- Ghali, M. (2003). Production-planning horizon, production smoothing, and convexity of the cost functions. *International Journal of Production Economics*, 81-82, pp. 67-74. doi:10.1016/S0925-5273(02)00279-7
- Gorman, M., & Brannon, J. (2000). Seasonality and the production-smoothing model. *International Journal of Production Economics*, 65(2), pp. 173-178. doi:10.1016/S0925-5273(99)00049-3
- Graves, S. (1981). A Review of Production Scheduling. *Operations Research*, 29(4), pp. 646-675 .
- Greniewski, M. (1999). *Wprowadzenie do MRP II+JIT*. Wrocław: Vogel Publishing.
- Grondys, K. (2009). Abc Analysis In Spare Parts Warehouse. *Advanced Logistic systems*, 3(1), pp. 147-156.
- Gupta, J. (1976). Optimal flowshop schedules with no intermediate storage space. *Naval Research Logistics Quarterly*, 23(2), pp. 235-243. doi:10.1002/NAV.3800230206
- Gutierrez, C., & Garcia-Magarino, I. (2011). Modular design of hybrid genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem. *Knowledge-Based Systems*, 24(1), pp. 102-112. doi:10.1016/j.knosys.2010.07.010
- Guzman, E., Andres, B., & Poler, R. (2022). Models and algorithms for production planning, scheduling and sequencing problems: A holistic framework and a systematic review. *Journal of Industrial Information Integration*, 27. doi:10.1016/j.jii.2021.100287
- Hall, R. (1983). *Zero Inventories*. Illinois: Dow Jones-Irwin.
- Handanhal, R., & Misra, R. (2014). ABC Analysis for Inventory Management: Bridging the Gap between Research and Classroom. *American Journal of Business Education*, 7(3), pp. 257-264. doi:10.19030/ajbe.v7i3.8635
- Hänggi, R., Fimpel, A., & Siegenthaler, R. (2022). Methods for Implementing the 9 Principles. In R. Hänggi, A. Fimpel, & R. Siegenthaler, *LEAN Production – Easy and Comprehensive* (pp. 89-166). Heidelberg: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-662-64527-7_4
- Hassoon, S. (2007). A Contribution in Materials Requirement Planning Techniques. *AL-MANSOUR JOURNAL*, 10, pp. 64-84.
- Herrmann, J. (2006). A History of Production Scheduling. In H. J.W., *Handbook of Production Scheduling. International Series in Operations Research & Management Science* (Vol. 89). Boston: Springer.

- Hopp, W., & Spearman, M. (1996). *Factory Physics, first ed.* Chicago: Dow Jones-Irwin.
- Huang, H., Pei, W., Wu, H., & May, M. (2013). A research on problems of mixed-line production and the re-scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(3), pp. 64-72. doi:10.1016/j.rcim.2012.04.014
- Hüttmeir, A., Treville, S., Ackere, A., Monnier, L., & Prenninger, J. (2009). Trading off between heijunka and just-in-sequence. *International Journal of Production Economics*, 118(2), pp. 501-507. doi:10.1016/j.ijpe.2008.12.014
- Jardzioch, A., & Skobiej, B. (2013). Nieklasyczne podejście ewolucyjne do problemu szeregowania. *Logistyka*, pp. 281-287.
- Jardzioch, A., & Skobiej, B. (2018). Job Scheduling Problem in a Flow Shop System with Simulated Hardening Algorithm. In C. L. Hamrol, *Advances in Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 101–109). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-68619-6_10
- Jardzioch, A., Kalinowski, K., & Kłos, S. (2023). *Organizacja i planowanie produkcji*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Kaczorowska, Z., Staniec, I., & Szczygieł, N. (2019). Klasyfikacja Abc/Xyz w zarządzaniu gospodarką materiałową w przedsiębiorstwie produkcyjnym. *Zeszyty naukowe Politechniki Łódzkiej, Organizacja I Zarządzanie*, 73(1228), pp. 43-54. doi:10.34658/oiz.2019.73.43-54
- Kalczynski, P., & Kamburowski, J. (2007). On the NEH heuristic for minimizing the makespan in permutation flow shops. *Omega*, 35(1), pp. 53-60. doi:10.1016/j.omega.2005.03.003
- Kamhuber, F., Sobottka, T., Heinzl, B., Henjes, J., & Sihn, W. (2020). An efficient hybrid multi-criteria optimization approach for rolling production smoothing of a European food manufacturer. *Computers & Industrial Engineering*, 147, p. 106620. doi:10.1016/j.cie.2020.106620
- Kędzia, G. (2022). *Dostawca w procesie rozwoju produktu*. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Kiran, D. (2019a). Chapter 22 - Routing, scheduling, and loading, Production Planning and Control. *A Comprehensive Approach*, pp. 317-330.
- Kiran, D. (2019b). Chapter 24 - Sequencing and line balancing, Production Planning and Control. *A Comprehensive Approach*, pp. 345-356.
- Kis, T. (2003). Job-shop scheduling with processing alternatives. *European Journal of Operational Research*, 151(2), pp. 307-332. doi:10.1016/S0377-2217(02)00828-7
- Kisielnicki, J. (2005). *Zarządzanie organizacją*. Warszawa: Wyższa Szkoła Handlu i Prawa w Warszawie.
- Klonowski, Z. J. (2004). *Systemy informatyczne zarządzania przedsiębiorstwem*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Knosala, R. (2002). *Zastosowania metod sztucznej inteligencji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Koide, K., & Iwata, T. (2007). Kaizen Through Heijunka Production (Leveled Production). *SAE Transactions*, 116(1), pp. 1024-1031. doi:10.4271/2007-01-3886

- Korytkowski, P., Grimaud, F., & Dolgiu, A. (2014). Exponential smoothing for multi-product lot-sizing with heijunka and varying demand. *Management and Production Engineering Review*, 5(2), pp. 20-26. doi:10.2478/mper-2014-0013
- Korytkowski, P., Wisniewski, T., & Rymaszewski, S. (2013). Multivariate simulation analysis of production leveling (heijunka) - a case study. *IFAC Proceedings Volumes*, 46/9, pp. 1554-1559. doi:10.3182/20130619-3-RU-3018.00285
- Kovács, G. (2012). Productivity Improvement By Lean Manufacturing Philosophy. *Advanced Logistic Systems*, 6(1), pp. 9-16.
- Krane, S., & Braun, S. (1991). Production smoothing: Evidence from physical product data. *Journal of Political Economy*, 99(3), pp. 558-581. doi:10.1086/261767
- Kraszewska, M. (2008). Wielopoziomowy system planowania produkcji na przykładzie wybranego przedsiębiorstwa. *Automatyka*, 12(2), pp. 295-304.
- Krenczyk, D., Skolud, B., & Herok, A. (2017). A Heuristic and Simulation Hybrid Approach for Mixed and Multi Model Assembly Line Balancing. In M. Burduk, *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance – ISPEM 2017. ISPEM 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing* (637 ed., pp. 99-108). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-64465-3_10
- Krzyżaniak, S. (2008). *Podstawy zarządzania zapasami w przykładach*. Poznań: Biblioteka Logistyczna.
- Krzyżaniak, S., & Cyplik, P. (2007). *Zapasy i magazynowanie : podręcznik do kształcenia w zawodzie technik logistyk. T. 1, Zapasy*. Poznań: Biblioteka Logistyka.
- Kumar, K., & Aouam, T. (2019). Extending the strategic safety stock placement model to consider tactical production smoothing. *European Journal of Operational Research*, 279(2), pp. 429-448. doi:10.1016/j.ejor.2019.06.009
- Kumar, Y., Sahu, V., Sahu, D., Khaparde, K., Dhiwar, J., Dewangan, K., & Dewangan, G. (2017). XYZ Analysis for Inventory Management – Case Study of Steel Plant. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 5, pp. 46-52. doi:10.22214/IJRASET.2017.2007
- Kusiak, A., & Cho, M. (1992). Similarity coefficient algorithms for solving the group technology problem. *International Journal of Production Research*, 30(11), pp. 2633-2646. doi:10.1080/00207549208948181
- Lean Action Plan. (2021). Retrieved 03 01, 2023, from <https://leanactionplan.pl/jak-efektywnie-planowac-produkcje-raport/>
- Lee, H., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). The bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review*, 38(3), pp. 93-102.
- Lee, H., Park, N., Jeongc, H., & Park, J. (2009). Grid enabled MRP process improvement under distributed database environment. *Journal of Systems and Software*, 82(7), pp. 1087-1097. doi:10.1016/j.jss.2009.01.041
- Li, J., Pan, Q., & Liang, Y. (2010). An effective hybrid tabu search algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problems. *Computers&Industrial Engineering*, 59(4), pp. 647-662. doi:10.1016/j.cie.2010.07.014

- Li, L. (1992). The role of inventory in delivery-time competition. *Management Science*, 38(2), pp. 182-197.
- Liker, J. (2004). *The Toyota Way*. New York: McGraw-Hill.
- Liker, J., & Meier, D. (2011). *Droga Toyoty Fieldbook, Praktyczny przewodnik wdrażania 4P Toyoty*. Warszawa: MT Biznes.
- Louis, S., & Xu, Z. (1996). Genetic Algorithms for Open Shop Scheduling and Re-scheduling. *Proceedings of the 11th ISCA Int. Conference on Computers and their Applications*, 28, pp. 99-102.
- Lysons, K. (2004). *Zakupy zaopatrzeniowe (Procurement Purchasing)*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Ławrynowicz, A. (2006). *Zarządzanie produkcją w ogniwie sieci dostaw z zastosowaniem system eksperckiego i algorytmu genetycznego* (Vol. 119). Bydgoszcz: Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej.
- M., Z., & Ziółkowski, J. (2012). System planowania potrzeb materiałowych (MRP) w przedsiębiorstwie produkcyjnym. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 61(3), pp. 354-364.
- Mahdi Nasiri, M., & Kianfa, F. (2011). A GA/TS algorithm for the stage shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 61(1), pp. 161-170. doi:10.1016/j.cie.2011.03.006
- Malindzakova, M., Garaj, P., Trpčevská, J., & Malindzak, D. (2022). Setting MRP Parameters and Optimizing the Production Planning Process. *Processes* 2022, 10(4), p. 690. doi:10.3390/pr10040690
- Matzka, J., Di Mascolo, M., & Furmans, K. (2012). Buffer sizing of a Heijunka Kanban system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(1), pp. 49-60. doi:10.1007/s10845-009-0317-3
- Mayr, A., Weigelt, M., Kühn, A., Grimm, S., Erll, A., Potzel, M., & Franke, J. (2018). Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 72, pp. 622-628. doi:doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.292
- Mazurczak, J. (2002). *Projektowanie struktur systemów produkcyjnych*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- Mckay, K. (2003). Historical survey of manufacturing control practices from a production research perspective. *International Journal of Production Research*, 41(3), pp. 411-426.
- Micciancio, D., & Panagiotis, V. (2013). A Deterministic Single Exponential Time Algorithm for Most Lattice Problems Based on Voronoi Cell Computations. *Journal on Computing*, 42(3), pp. 351-358. doi:10.1137/100811970
- Miltenburg, J., & Sinnamon, G. (1989). Scheduling mixed-model multi-level just-in-time production systems. *International Journal of Production Research*, 27(9), pp. 1487-1509. doi:doi.org/10.1080/00207548908942636
- Miltenburg, J., & Sinnamon, G. (1992). Algorithms for scheduling multi-level just-in-time production systems. 24(2), pp. 121-130. doi:10.1080/07408179208964209
- Miltenburg, J., & Sinnamon, G. (1995). Revisiting the mixed-model multi-level just-in-time scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 33(7), pp. 2049-2052. doi:10.1080/00207549508904798

- Miron, J., & Zeldes, S. (1988). Seasonality, cost shocks, and the production smoothing model of inventories. *Econometrica*, 56(4), pp. 877-905. doi:10.2307/1912703
- Modigliani, F., & Hohn, F. (1955). Production planning over time and the nature of the expectation and planning horizon. *Econometrica, Journal of the Econometric Society*, 23(1), pp. 46-66. doi:10.2307/1905580
- Mohanty, R., & Singh, R. (1992). A Hierarchical Production Planning Approach for a Steel Manufacturing System. *International Journal of Operations and Production Management*, 12(5), pp. 69-78. doi:10.1108/01443579210011426
- Monden, Y. (1983). *Toyota Production System*. New York: Springer New York. doi:10.1007/978-1-4615-9714-8
- Monden, Y. (1993). *Toyota Management System*. Portland: Productivity Press.
- Moslehi, G., & M., M. (2011). A Pareto approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization and local search. *International Journal of Production Economics*, 129(1), pp. 14-22. doi:10.1016/j.ijpe.2010.08.004
- Muhamad, A., & Deris, S. (2013). An artificial immune system for solving production scheduling problems: a review. *Artificial Intelligence Review*, 39, pp. 97-108. doi:10.1007/s10462-011-9259-1
- Mula, J., Poler, R., García-Sabater, J., & Lario, F. (2006). Models for production planning under uncertainty: A review. *International Journal of Production Economics*, 103(1), pp. 271-285. doi:10.1016/j.ijpe.2005.09.001
- Murthy, D., & Ma, L. (1991). MRP with uncertainty: a review and some extensions. *International Journal of Production Economics*, 25(1-3), pp. 51-64. doi:10.1016/0925-5273(91)90130-L
- Naciri, L., Mouhib, Z., Gallab, M., Nali, M., Abbou, R., & Kebe, A. (2022). Lean and industry 4.0: A leading harmony. *Procedia Computer Science*, pp. 394-406. doi:10.1016/j.procs.2022.01.238
- Nahhas, A., Lang, S., Bosse, S., & Turowski, K. (2018). Toward Adaptive Manufacturing: Scheduling Problems in the Context of Industry 4.0. *2018 Sixth International Conference on Enterprise Systems (ES)*, (pp. 108-115). Limassol.
- Nguyen, V. (1998). A multiclass hybrid production center in heavy traffic. *Operations research*, 46(3), pp. 13-25. doi:10.1287/opre.46.3.S13
- Okuda, K. (2001). Hierarchical structure in manufacturing systems: a literature survey. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 3(3), pp. 210-224. doi:10.1504/IJMTM.2001.001406
- Orlicky, J. (1976). *Materials requirement planning*. New York: McGraw-Hill.
- Pająk, E. (2003). *Zarządzanie produkcją. Produkt. Technologia. Organizacja*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Naukowe.
- Pająk, E., Klimkiewicz, M., & Kosieradzka, A. (2014). *Zarządzanie produkcją i usługami*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Papadimitriou, C. (2012). *Złożoność obliczeniowa*. Gliwice: Helion.

- Pawlak, M. (1999). *Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Penc-Pietrzak, I. (2010). *Planowanie strategiczne w nowoczesnej firmie*. Kraków: Wydawnictwo JAK.
- Pienkosz, K., & Toczyłowski, E. (1993). On aggregation of items in single-stage production systems with limited inventory levels. *Operations Research*, 41(2), pp. 363-369. doi:10.1287/opre.41.2.419
- Pinedo, M. (2012). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. 4th ed. New York: Springer.
- Plossl, G. (1980). MRP Yesterday, Today and Tomorrow. *Production and Inventory Management*, 21(3), pp. 1-9.
- Powell, D., Alfnes, E., & Semini, E. (2010). The Application of Lean Production Control Methods within a Process-Type Industry: The Case of Hydro Automotive Structures. In B. Vallespir, & T. Alix, *Advances in Production Management Systems. New Challenges, New Approaches. APMS 2009. IFIP Advances in Information and Communication Technology* (Vol. 338, pp. 243-250). Heidelberg: Springer, Berlin. doi:10.1007/978-3-642-16358-6_31
- Průša, P., & Schacherl, L. (2007). *The Leveling, Scientific Papers Of The University Of Pardubice*. Pardubice: The Jan Perner Transport Faculty.
- PSI Polska. (2016). Retrieved 03 01, 2023, from <https://www.psi.pl/pl/blog/psi-polska-blog/post/efektywnosc-produkcji-mamy-w-planie-infografika/>
- Puigjaner, L., Graells, M., & Reklaitis, G. (2002). Chapter 5.4 - Computer tools for Discrete/Hybrid Production Systems. *Computer Aided Chemical Engineering*(11), pp. 433-452.
- Puto, A. (2022). *Dylematy i wyzwania w zarządzaniu współczesnym przedsiębiorstwem*. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej .
- Qian, B., Wang, L., Hu, R., Wang, W., Huang, D., & Wang, X. (2008). A hybrid differential evolution method for permutation flow-shop scheduling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38, pp. 757-777. doi:10.1007/s00170-007-1115-8
- Qin, H., Han, Y., Zhang, B., Meng, L., Liu, Y., Pan, Q., & Gong, D. (2022). An improved iterated greedy algorithm for the energy-efficient blocking hybrid flow shop scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 69, p. 100992. doi:10.1016/j.swevo.2021.100992
- Rajagopalan, S. (2002). Make-to-order or make-to-stock: Model and application. *Management Science*, 48(2), pp. 241-256. doi:10.1287/mnsc.48.2.241.255
- Rajendran, C., & Chaudhuri, D. (1990). Heuristic algorithms for continuous flow-shop problem. *Naval Research Logistics*, 37(5), pp. 695-705. doi:10.1002/1520-6750(199010)37:5
- Ramey, V. (1991). Nonconvex costs and the behavior of inventories. *Journal of Political Economy*, 99(2), pp. 306-333. doi:10.1086/261752
- Rewers, P., & Diakun, J. (2021). A heijunka study for the production of standard parts included in a customized finished product. *PLoS ONE*, 16(2), pp. 1-13. doi:10.1371/journal.pone.0260515
- Rewers, P., Czaja, M., Janczura, K., & Diakun, J. (2021). Determination of the Production Frequency and Batch Size for the Manufacturing Process. In *Advanced Manufacturing*

- Processes II . InterPartner 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 72-82). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-030-68014-5_8
- Rewers, P., Hamrol, A., Żywicki, K., Kulus, W., & Bożek, M. (2017). Production Leveling as an Effective Method for Production Flow Control - Experience of Polish Enterprises. *Procedia Engineering*, 182, pp. 619-626. doi:doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.167
- Rewers, P., Osiński, F., & Żywicki, K. (2019). Classification of Products in Production Levelling. In S. V. Machado, *Innovation, Engineering and Entrepreneurship* (pp. 411-417). Cham: Springer. doi:10.1007/978-3-319-91334-6_56
- Riane, F., Artiba, A., & Iassinovski, S. (2001). An integrated production planning and scheduling system for hybrid fowshop organizations. *International Journal of Production Economics*, 74, pp. 33-48. doi:10.1016/S0925-5273(01)00105-0
- Roscoe, E., & Freark, D. (1971). *Organization for Production: an introduction to industrial management*. Illinois: Richard D. Irwin, Inc., Homewood.
- Rother, M. (2010). *Toyota Kata*. New York: McGraw-Hill.
- Šaderová, J., & Marasová, D. (2015). Relocation Of Goods In The Warehouse Based On Abc/Xyz Analysis. *Transport & Logistics*, 15(34-36), pp. 1-9.
- Sawik, T. (1992). *Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Schonberger, R. (1982). *Japanese Manufacturing Techniques: Nine Hidden Lessons in Simplicity*. New York: Free Press.
- Schönsleben, P. (2023). The MRP II / ERP Concept: Business Processes and Methods. In P. Schönsleben, *Handbook Integral Logistics Management*. Berlin: Springer. doi:10.1007/978-3-662-65625-9_5
- Schürle, P. (2009). Produktionsnivellierung. In P. Dickmann, *Schlanker Materialfluss* (pp. 248-254). Heidelberg: Springer Berlin. doi:10.1007/978-3-540-79515-5
- Senger, Z. (1997). *Sterowanie przepływem produkcji*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- Sepioło, J., Olszowy, J., & Kucwaj, A. (2022). Koncepcje zarządzania współczesnym przedsiębiorstwem – teoria i praktyka. In J. O. Joanna Sepioło, *Współczesne wyzwania w naukach ekonomicznych, finansach i zarządzaniu* (pp. 31-42). Łódź: Wydawnictwo ArchaeGraph.
- Singh, S., & Kumar, K. (2021). A study of lean construction and visual management tools through cluster analysis. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1), pp. 1153-1162. doi:10.1016/j.asej.2020.04.019
- Skołod, B. (2000). *Planowanie wieloasortymentowej produkcji rytmicznej* (Vol. 1449). Gliwice: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej.
- Skołod, B. (2006). *Zarządzanie operacyjne. Produkcja w małych i średnich przedsiębiorstwach*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Skołod, B., Szopa, A., & Kalinowski, K. (2022). Prioritizing and Scheduling of Production Orders. *Management and Production Engineering Review*, 1, pp. 62-75. doi:10.24425/mper.2022.140877

- Slack, N., Chambers, S., & Johnston, R. (2007). *Operations Management, 5th ed.* London: Prentice Hall.
- Smalley, A. (2004). *Creating Level Pull.* São Paulo: Lean Enterprise Institute.
- Smalley, A. (2011). *System kanban dla produkcji. Poziomowany system ssący.* Wrocław: Lean Enterprise Institute.
- Sobaszek, Ł. (2013). Problemy harmonogramowania w systemach produkcyjnych. *Kompleks Technologiczny, 1(7)*, pp. 175-178.
- Soman, C., Van Donk, D., & Gaalman, G. (2004). Combined make-to-order and make-to-stock in a food production system. *International Journal of Production Economics, 90(2)*, pp. 223-235.
- Soman, C., Van Donk, D., & Gaalman, G. (2006). Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand. *International Journal of Production Economics, 104(2)*, pp. 441-453. doi:10.1016/j.ijpe.2004.08.002
- Soman, C., Van Donk, D., & Gaalman, G. (2007). Capacitated planning and scheduling for combined make-to-order and make-to-stock production in the food industry: An illustrative case study. *International Journal of Production Economics, 108(1-2)*, pp. 191-199. doi:10.1016/j.ijpe.2006.12.042
- Staniec, I., & Stajuda, A. (2012). Metody klasyfikacji wykorzystywane w procesie zaopatrzenia. *Przedsiębiorczość i Zarządzanie, 13*, pp. 93-112.
- Strusevich, V. (2022). Complexity and approximation of open shop scheduling to minimize the makespan: A review of models and approaches. *Computer & Operations Research, 144*, p. 105732. doi:10.1016/j.cor.2022.105732
- Synáková, L. (2017). Production Smoothing and Cost Performance in a Production-inventory System. *Journal of Competitiveness, 9(1)*, pp. 117-133. doi:10.7441/joc.2017.01.08
- Syska, A. (2006). *Production Management: Important Methods and Concepts for today's Production.* Wiesbaden : Gabler Verlag.
- Szymański, P. (2007). *Zarządzanie majątkiem obrotowym w procesie kreowania wartości przedsiębiorstwa.* Łódź: Wydawnictwo Petros.
- Tang, H., & Wong, T. (2005). Reactive multi-agent system for assembly cell control. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 21(2)*, pp. 87-98. doi:10.1016/j.rcim.2004.04.001
- Teece, D., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal, 18(7)*, pp. 509-533. doi:10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7
- Thomalla, C. (2001). Job-shop scheduling with alternative process plans. *International Journal of Production Economics, 74(1-3)*, pp. 125-134. doi:10.1016/S0925-5273(01)00119-0
- Tikasz, L., McCulloch, R., Pentiah, S., & Baxter, R. (2012). Simulation Tools to Complement Cast House Design and Daily Operation. *Light Metals*, pp. 993-997. doi:10.1007/978-3-319-48179-1_173
- Vallada, E., & Ruiz, R. (2010). Genetic algorithms with path relinking for the minimum tardiness permutation flowshop problem. *Omega, 38(1-2)*, pp. 57-67. doi:10.1016/j.omega.2009.04.002

- Van Deman, J., & Baker, K. (1974). Minimizing mean flowtime in the flow shop with no intermediate queues. *AIIE Transactions*, 6, pp. 28-34. doi:10.1080/05695557408974929
- Van der Veen, J., & Van Dal, R. (1991). Solvable cases of the no-wait flow-shop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 42, pp. 971-980. doi:10.1057/jors.1991.187
- Van Landeghem, H., & Johannes, C. (2022). Extending Value Stream Mapping for Lean Production Planning and Control. *Management and Production Engineering Review*, 13(3), pp. 75-82. doi:10.24425/mper.2022.142384
- Van Staden, M., & Du Plessis, W. (2012). Being the lean dream. *CIE42 Proceedings*. Cape Town.
- Venkataraman, R., & Smith, S. (1996). Disaggregation to a rolling horizon master production schedule with minimum batch-size production restrictions. *International Journal of Production Research*, 34(6), pp. 1517-1537. doi:10.1080/00207549608904982
- Venkateswaran, J., Son, Y., & Jones, A. (2004). Hierarchical production planning using a hybrid system dynamic-discrete event simulation architecture. *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, (pp. 1094-1102). Washington. doi:10.1109/WSC.2004.1371434
- Wan Lung, N. (2007). A simple classifier for multiple criteria ABC analysis. *European Journal of Operational Research*, 177(1), pp. 344-353. doi:10.1016/j.ejor.2005.11.018
- Warule, V., Chopade, S., & Ulmek, N. (2019). Review on Lean Manufacturing techniques. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, pp. 1-7.
- Waters, D. (2001). *Zarządzanie operacyjne. Towary i usługi*. Warszawa: Wydawnictwo PWN.
- Wight, O. (1984). *Production and Inventory Management in the Computer Age*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, Inc.
- Williams, T. (1984). Special products and uncertainty in production/inventory systems. *European Journal of Operations Research*(15), pp. 46-54.
- Wilson, J. (2000a). History of manufacturing management. In P. M. Swamidass, *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Wilson, J. (2000b). Scientific management. In P. M. Swamidass, *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Womack, J., Jones, D., & Roos, D. (1990). *The Machine that Changed the World*. New York: Harper Collins Publishers.
- Wróblewski, K. (1993). *Podstawy sterowania przepływem produkcji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Wróblewski, K. (1993). *Podstawy sterowania przepływem produkcji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Wróblewski, K., Krawczyński, R., Kosieradzka, A., & Kasprzyk, S. (1984). *Reguły priorytetu w sterowaniu przepływem produkcji*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Wyřbek, H. (2011). MRP II w procesie zarządzania przedsiębiorstwem. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach Seria: Administracja i Zarządzanie*, 89, pp. 64-76.

- Xiaobo, Z., Zhou, Z., & Asres, A. (1996). A note on Toyota's goal of sequencing mixed models on an assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 36(1), pp. 57-65. doi:10.1016/S0360-8352(98)00113-2
- Xiong, H., Shi, S., Ren, D., & Hu, J. (2022). A survey of job shop scheduling problem: The types and models. *Computers & Operations Research*, 142, p. 105731. doi:10.1016/j.cor.2022.105731.
- Yano, C., & Rachamadugu, R. (1991). Sequencing to minimize overload in assembly lines with product options. *Management Science*, 37(5), pp. 501-623. doi:10.1287/mnsc.37.5.572
- Yao, L., & Zhu, W. (2010). Visual simulation framework of iron and steel production scheduling based on Flexsim. *2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA)* (pp. 54-58). Changsha: IEEE. doi:10.1109/BICTA.2010.5645359
- Yeniseya, M., & Yagmahan, B. (2014). Multi-objective permutation flow shop scheduling problem: Literature review, classification and current trends. *Omega*, 45, pp. 119-135. doi:10.1016/j.omega.2013.07.004
- Zandin, K. (2001). *Maynard's Industrial Engineering Handbook, 5th ed.* New York: McGraw-Hill.
- Zeballos, L., Novas, J., & G.P., H. (2011). A CP formulation for scheduling multiproduct multistage batch plants. *Computers & Chemical Engineering*, 35(12), pp. 2973-2989. doi:10.1016/j.compchemeng.2011.01.043
- Zenkova, Z., Musoni, W., & Tarima, S. (2020). Accounting for deficit in ABC-XYZ analysis. *2020 5th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)* (pp. 1-6). Rabat: Morocco. doi:10.1109/GOL49479.2020.9314731
- Zięba, M., & Ziółkowski, J. (2012). System planowania potrzeb materiałowych (MRP) w przedsiębiorstwie produkcyjnym. *Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej*, 2, pp. 354-364.
- Ziółkowski, J., & Łada, J. (2014). Analiza ABC i XYZ w gospodarowaniu zapasami. *Przedsiębiorczość i Zarządzanie*, 15(5/1), pp. 85-94.
- Zwolińska, B. (2017). Shaping OEE and EPEI indicators in medium size rolling mill plant. *26th International Conference on Metallurgy and Materials – Metal 2017* (pp. 2356-2361). Brno: Tanger.
- Zwolińska, B., & Zaręba, A. (2018). Shaping Flexibility in Complex Manufacturing Systems. *Logistics and Transport*, 39, pp. 65-72. doi:10.26411/83-1734-2015-3-39-6-18
- Żebrowski, W., Pawłowski, M., & Piątkowski, Z. (2006). Nowoczesne Systemy Zarządzania Produkcją, Część I. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 16(1), pp. 73-76.
- Żyłka, W., Szumski, M., & Szczerba, P. (2017). Planowanie, definiowanie i realizacja produkcji. *Obróbka metalu*(3), pp. 46-51.

Spis rysunków

Rysunek 1.1 Hierarchia i zakres planów produkcji, źródło: (Pająk, Klimkiewicz, & Kosieradzka, 2014)	13
Rysunek 1.2 Planowanie w metodzie MRP II, źródło: (Riane, Artiba i Iassinovski, 2001)	16
Rysunek 1.3 Przykład harmonogramu szeregowo-równoległego, opr. wł. na podstawie (Pająk, 2003)	19
Rysunek 1.4 Oznaczenie zastosowane w harmonogramie, opracowanie własne.....	20
Rysunek 1.5 Przykład harmonogramu równoległego, opr. wł. na podstawie (Pająk, 2003)	20
Rysunek 1.6 Przykład harmonogramu szeregowego, opr. wł. na podstawie (Pająk, 2003).....	21
Rysunek 1.7 Przykład macierzy podobieństwa technologicznego wyrobów, opr. wł.	32
Rysunek 2.1 Schemat realizacji eksperymentu symulacyjnego, opracowanie własne	41
Rysunek 2.2 Widok symulacji w programie FlexSim, źródło: (FlexSim Software Products, 2023). 42	
Rysunek 3.1 Idea poziomowania produkcji, opracowanie własne	44
Rysunek 3.2 Czynniki wpływające na poziomowanie produkcji, opracowanie własne	49
Rysunek 3.3 Mierniki poziomowania produkcji, opracowanie własne	50
Rysunek 3.4 Ogólny schemat metodyki poziomowania produkcji (MPP), opracowanie własne	51
Rysunek 3.5 Algorytm podziału wyrobów na grupy (pierwszy etap metodyki), opracowanie własne	54
Rysunek 3.6 Algorytm określania rodzin wyrobów (drugi etap metodyki), opracowanie własne....	57
Rysunek 3.7 Algorytm obliczenia wskaźnika EPEI (trzeci etap metodyki), opracowanie własne....	59
Rysunek 3.8 Algorytm obliczeń zapasu całkowitego (etap czwarty metodyki), opracowanie własne	63
Rysunek 3.9 Ogólny algorytm wykonania wariantów harmonogramu produkcji (piąty etap metodyki), opracowanie własne	64
Rysunek 3.10 Algorytm wyboru wielkości partii, opracowanie własne	66
Rysunek 3.11 Harmonogram wariantu 1, opracowanie własne	67
Rysunek 3.12 Harmonogram wariantu 2, opracowanie własne	67
Rysunek 3.13 Wskaźnik C_{max} dla wariantu 1, opracowanie własne	68
Rysunek 4.1 Warianty harmonogramu produkcji: bazowy, wariant 1 i wariant 2, opracowanie własne.....	74
Rysunek 4.2 Wykres wartości średniego wskaźnika rotacji zapasów dla 100 symulacji, opracowanie własne.....	79
Rysunek 4.3 Wykres wartości średniego wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas dla 100 symulacji, opracowanie własne.....	80
Rysunek 4.4 Przykład harmonogramów, gdzie produkcja bazowa osiągnęła lepszy wynik wskaźnika zamówień zrealizowanych, opracowanie własne	81
Rysunek 4.5 Wykres boxplot typu: Q1-Me-Q3 (kwartyl I-mediana-kwartyl III) dla wskaźnika rotacji zapasów, opracowanie własne	81
Rysunek 4.6 Wykres wartości pojedynczych dla wskaźnika rotacji zapasów, opracowanie własne	81
Rysunek 4.7 Wykres boxplot typu: Q1-Me-Q3 (kwartyl I-mediana-kwartyl III) dla wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas, opracowanie własne	82
Rysunek 4.8 Wykres wartości pojedynczych dla wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas, opracowanie własne.....	82
Rysunek 5.1 Schemat działań wykonanych w ramach symulacji komputerowej, opracowanie własne	86
Rysunek 5.2 Widok ogólny modelu symulacyjnego dla wydziału 2, opracowanie własne.....	87

<i>Rysunek 5.3 Widok fragmentu tabeli „parametry”: a) parametry ogólne i ich przykładowe wartości, b) parametry szczegółowe (dla poszczególnych wyrobów o nazwach określonych w nagłówkach kolumn) i ich przykładowe wartości, opracowanie własne.....</i>	<i>87</i>
<i>Rysunek 5.4 Widok tabeli „maszyny-poziomowanie” z przykładowymi wartościami czasu pomiędzy generowaniem zlecenia produkcji poziomowanej dla produkowanych wyrobów, opracowanie własne.....</i>	<i>88</i>
<i>Rysunek 5.5 Widok tabeli obiektu "zamowienia" wraz z przykładowymi wartościami (Number of Arrivals - liczba zamówień, ArrivalTime - moment złożenia zamówienia, ItemName - nazwa wyrobu, liczba_sztuk - wielkość zamówienia), opracowanie własne.....</i>	<i>88</i>
<i>Rysunek 5.6 Procentowy udział wyrobów w grupach A, B, C, opracowanie własne.....</i>	<i>89</i>
<i>Rysunek 5.7 Procentowy udział wyrobów w grupach X, Y, Z, opracowanie własne</i>	<i>90</i>
<i>Rysunek 6.1 Fragment instrukcji kroku 1 metodyki poziomowania produkcji, opracowanie własne</i>	<i>98</i>
<i>Rysunek 6.2 Fragment formularza w programie Excel, opracowanie własne.....</i>	<i>98</i>
<i>Rysunek 6.3 Analiza ABC/XYZ, opracowanie własne</i>	<i>100</i>
<i>Rysunek 6.4 Podział wyrobów na rodziny, opracowanie własne.....</i>	<i>100</i>
<i>Rysunek 6.5 Wyznaczenie wartości wskaźnika EPEI, opracowanie własne</i>	<i>101</i>
<i>Rysunek 6.6 Wyznaczenie wielkości zapasów, opracowanie własne</i>	<i>101</i>
<i>Rysunek 6.7 Harmonogramy dla produkcji w 5 partiach, opracowanie własne.....</i>	<i>101</i>

Spis tabel

Tabela 1.1 Wybrane definicja poziomowania produkcji.....	25
Tabela 1.2 Wartości współczynnika zmienności dla klasyfikacji XYZ, źródło: (Staniec & Stajuda, 2012)	31
Tabela 1.3 Podział grup asortymentowych, źródło: (Krzyżaniak, 2008)	31
Tabela 3.1 Liczba sztuk w zamówieniach klientów na wyroby A-J w 12 kolejnych miesiącach, opracowanie własne.....	55
Tabela 3.2 Przypisanie wyrobów A-J do grup ABC, opracowanie własne.....	55
Tabela 3.3 Liczba zamówień klientów c wyrobów A-J w 12 kolejnych miesiącach, opracowanie własne.....	56
Tabela 3.4 Przypisanie wyrobów A-J do grup XYZ, opracowanie własne	56
Tabela 3.5 Przypisanie wyrobów A-J według analizy ABC/XYZ, opracowanie własne	57
Tabela 3.6 Macierz podobieństwa technologicznego wyrobów z grupy priorytetowej, opracowanie własne.....	58
Tabela 3.7 Dane produkcyjne przyjęte dla przykładu, opracowanie własne	60
Tabela 3.8 Wartość wskaźnika EPEI dla stanowiska 2, opracowanie własne.....	61
Tabela 3.9 Wartość wskaźnika EPEI dla stanowiska 3, opracowanie własne.....	61
Tabela 3.10 Dane produkcyjne, opracowanie własne	62
Tabela 3.11 Procesy technologiczne wyrobów wraz z liczbą sztuk do wyprodukowania, opracowanie własne.....	67
Tabela 4.1 Średnia i odchylenie standardowe wielkości l i częstości c zamówień historycznych dla wyrobów A-J, opracowanie własne.....	70
Tabela 4.2 Proces technologiczny wyrobów A-J, opracowanie własne.....	71
Tabela 4.3 Czasy jednostkowe operacji technologicznych t_j [h] na poszczególnych stanowiskach, opracowanie własne.....	71
Tabela 4.4 Wyniki analizy ABC, opracowanie własne.....	72
Tabela 4.5 Wyniki analizy XYZ, opracowanie własne	72
Tabela 4.6 Możliwa liczba przebrojeń MLP dla stanowiska 1, opracowanie własne.....	73
Tabela 4.7 Możliwa liczba przebrojeń MLP dla stanowiska 2, opracowanie własne.....	73
Tabela 4.8 Możliwa liczba przebrojeń MLP dla stanowiska 3, opracowanie własne.....	73
Tabela 4.9 Obliczenia zapasu rotacyjnego, buforowego, bezpieczeństwa oraz całkowitego, opracowanie własne.....	74
Tabela 4.10 Wielkości zamówień l wyrobów na 20 okresów, opracowanie własne	75
Tabela 4.11 Symulacja w przypadku produkcji poziomowanej wyrobu D, opracowanie własne....	76
Tabela 4.16 Symulacja przy harmonogramie bazowym wyrobu D, opracowanie własne.....	76
Tabela 4.13 Symulacja w przypadku produkcji poziomowanej wyrobu G, opracowanie własne....	78
Tabela 4.14 Symulacja przy harmonogramie bazowym wyrobu G, opracowanie własne.....	78
Tabela 4.15 Średnie wskaźniki rotacji zapasów oraz zamówień zrealizowanych, opracowanie własne.....	79
Tabela 4.16 Zestawienie wyników symulacji, opracowanie własne.....	80
Tabela 4.17 Wyniki testu statystycznego dla wskaźnika rotacji zapasu, opracowanie własne	83
Tabela 4.18 Wyniki testu statystycznego dla wskaźnika zamówień zrealizowanych na czas, opracowanie własne.....	83
Tabela 5.1 Liczba pozycji asortymentowych w poszczególnych grupach, opracowanie własne	90
Tabela 5.2 Liczba pozycji asortymentowych z grupy priorytetowej produkowana na poszczególnych maszynach, opracowanie własne.....	91

<i>Tabela 5.3 Obliczenia MLP dla maszyny 12, opracowanie własne</i>	91
<i>Tabela 5.4 Wskaźnik EPEI dla poszczególnych maszyn, opracowanie własne</i>	92
<i>Tabela 5.5 Zapas rotacyjny, buforowy i bezpieczeństwa dla wyrobów produkowanych na maszynie 12, opracowanie własne</i>	92
<i>Tabela 5.6 Liczba zamówień zrealizowanych, zrealizowanych na czas oraz niezrealizowanych, opracowanie własne</i>	93
<i>Tabela 5.7 Średnia liczba wyrobów w magazynie oraz liczba sztuk w zamówieniach zrealizowanych, opracowanie własne</i>	93
<i>Tabela 5.8 Liczba zamówień zrealizowanych, zrealizowanych na czas oraz niezrealizowanych, opracowanie własne</i>	94
<i>Tabela 5.9 Średnia liczba wyrobów w magazynie oraz liczba sztuk w zamówieniach zrealizowanych, opracowanie własne</i>	94
<i>Tabela 5.10 Wartości wskaźników dla symulacji produkcji bazowej i poziomowanej, opracowanie własne</i>	95
<i>Tabela 6.1 Średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe wielkości l i częstości c zamówień historycznych dla wyrobów A-G, opracowanie własne</i>	97
<i>Tabela 6.2 Proces technologiczny wyrobów A-G, opracowanie własne</i>	97
<i>Tabela 6.3 Czasy operacji technologicznych t_j, opracowanie własne</i>	97
<i>Tabela 6.4 Ankieta wypełniana przez ekspertów, opracowanie własne</i>	99