



Politechnika Wroclawska

## ROZPRAWA DOKTORSKA

### METODYKA HARMONOGRAMOWANIA PRODUKCJI W ASPEKCIE OPTYMALIZACJI WYKORZYSTANIA ZASOBÓW LUDZKICH Z WYKORZYSTANIEM METAHEURYSTYK

mgr inż. Kamil Musiał

Promotorzy:

dr hab. inż. Anna Burduk, prof. uczelni  
dr hab. inż. Jarosław Pempera, prof. uczelni

Słowa kluczowe: harmonogramowanie produkcji, proces wytwórczy, zasoby produkcyjne, metaheurystyka, optymalizacja produkcji

WROCLAW 2023



*Niniejsza praca nie powstałaby bez wsparcia wielu osób,  
w tym współpracowników z Politechniki Wrocławskiej  
oraz pracowników przedsiębiorstwa Brose Sitech,  
którym serdecznie dziękuję.*

*Szczególne podziękowania składam promotor pracy,  
Pani Profesor Annie Burduk,  
za nieocenione wsparcie na przestrzeni lat  
oraz Panu Profesorowi Jarosławowi Pempierce,  
za zaangażowanie oraz wiele cennych uwag.*

*Podziękowania również dla Asi – za kanapki,  
dla Dagmary - za memy,  
No i nie mógłbym zapomnieć o Kredzi ;)   
dzięki za wszystko*

# Spis treści

Streszczenie	iii
Abstract	iv
Wstęp i zakres pracy	1
<b>1 Charakterystyka harmonogramowania produkcji</b>	<b>9</b>
1.1 Planowanie produkcji i rodzaje sterowania systemem produkcyjnym . . . . .	10
1.1.1 Systemy pchające . . . . .	12
1.1.2 Systemy ssące . . . . .	12
1.1.3 Systemy wyciskające . . . . .	14
1.2 Harmonogramowanie produkcji . . . . .	15
1.3 Problemy występujące przy budowie harmonogramów . . . . .	19
1.4 Kryteria jakości przy budowie harmonogramów . . . . .	23
<b>2 Charakterystyka wybranych metod inteligentnych</b>	<b>26</b>
2.1 Przegląd wybranych metod inteligentnych . . . . .	28
2.1.1 Metody dokładne . . . . .	31
2.1.2 Metody przybliżone . . . . .	34
2.2 Programowanie równoległe . . . . .	44
2.3 Porównanie opisanych algorytmów . . . . .	44
<b>3 Cel, teza i przyjęte zadania badawcze</b>	<b>49</b>
<b>4 Metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich</b>	<b>55</b>
<b>5 Algorytm optymalizacyjny Neuro-Tabu Search</b>	<b>64</b>
5.1 Opis matematyczny problemu optymalizacyjnego . . . . .	65
5.2 Algorytm Neuro-Tabu Search (NTS) . . . . .	67

---

5.2.1	Ruchy oraz sąsiedztwo . . . . .	69
5.2.2	Mechanizm Tabu z siecią neuronową . . . . .	70
5.3	Testy komputerowe algorytmu . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Charakterystyka systemu produkcyjnego, dla którego zostanie przeprowadzona weryfikacja metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich</b>	<b>77</b>
6.1	Ogólna charakterystyka przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o.	78
6.2	Charakterystyka głównych procesów produkcyjnych w Zakładzie Brose Sitech sp. z o.o. w Polkowicach . . . . .	79
6.3	Charakterystyka procesu produkcji grupy wyrobów DOPEL	83
6.4	Sposób planowania pracy i harmonogramowania produkcji w procesie produkcji wyrobu DOPEL . . . . .	93
<b>7</b>	<b>Weryfikacja metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich</b>	<b>98</b>
<b>8</b>	<b>Opis aplikacji wspierającej generowanie harmonogramów</b>	<b>120</b>
8.1	Dane wejściowe . . . . .	120
8.2	Wyniki obliczeń . . . . .	123
<b>9</b>	<b>Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych prac</b>	<b>127</b>
9.1	Przedmiot badań . . . . .	127
9.2	Wyniki badań . . . . .	128
9.3	Kierunki dalszych badań . . . . .	130

## Streszczenie

Rozprawa doktorska podejmuje tematykę optymalizacji harmonogramowania produkcji z wykorzystaniem metod inteligentnych. Za kryteria optymalizacyjne przyjęto liczbę pracowników produkcyjnych o określonych kompetencjach potrzebną do realizacji założonego harmonogramu produkcji w czasie krótszym lub równym w porównaniu do harmonogramu zbudowanego metodami tradycyjnymi.

Praca zawiera przegląd literatury z zakresu harmonogramowania i sterowania produkcją oraz przegląd metod inteligentnych, możliwości ich zastosowania w inżynierii produkcji oraz ich porównanie z uwagi na kryteria wybrane pod kątem realizacji celu pracy.

Na potrzeby realizacji celu pracy opracowano algorytm Neuro-Tabu Search (NTS) oraz aplikację pozwalającą na jego wykonanie i generowanie różnych wersji harmonogramów produkcji dla zadanych warunków i ograniczeń. Budowa algorytmu Neuro-Tabu Search łączy w sobie algorytm Tabu Search, będący jedną z najefektywniejszych metod konstruowania algorytmów heurystycznych dla problemów szeregowania oraz samouczącą się prostą sieć neuronową pozwalającą dodatkowo usprawnić mechanizm zabronień algorytmu Tabu Search.

Ponadto w pracy zaproponowano 6-cio etapową metodykę harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. Opracowana metodyka wykorzystuje opracowany algorytm Neuro-Tabu Search. Każdy z etapów metodyki został opisany i zawiera wytyczne umożliwiające wdrożenie metodyki w przedsiębiorstwach produkcyjnych z branży automotive.

Opracowana metodyka została zweryfikowana na danych pochodzących z przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o., zakład w Polkowicach.

## **Abstract**

The doctoral dissertation deals with the optimization of production scheduling with the use of intelligent methods. The optimization criteria are the number of production employees with specific competences needed to implement the assumed production schedule in a time shorter or equal to the schedule built with traditional methods.

The thesis contains a review of the literature in the field of production scheduling and control as well as an overview of intelligent methods, their possible application in production engineering and their comparison due to the criteria selected in terms of achieving the aim of the thesis.

For the purpose of achieving the aim of the thesis, the Neuro-Tabu Search (NTS) algorithm and an application allowing for its execution and generation of various versions of production schedules for given conditions and constraints were developed. The construction of the Neuro-Tabu Search algorithm combines the Tabu Search algorithm, which is one of the most effective methods of constructing heuristic algorithms for scheduling problems and a self-learning neural network that further improves the prohibition mechanism of the Tabu Search algorithm.

In addition, the thesis proposes a 6-step methodology of production scheduling in terms of optimizing the use of human resources. The developed methodology uses the Neuro-Tabu Search algorithm. Each stage of the methodology has been described and contains guidelines enabling the implementation of the methodology in manufacturing companies from the automotive industry. The developed methodology was verified on the basis of data from Brose Sitech Sp. z o.o., company in Polkowice.

## Wstęp i zakres pracy

Obecnie przedsiębiorstwa produkcyjne działają w warunkach bardzo dużej konkurencji zarówno na rynkach zewnętrznych, ale również w sieciach przedsiębiorstw i w łańcuchach logistycznych. Klienci wymagają wysokiej jakości wyrobów, krótkiego czasu dostarczenia na rynek często nowych lub ulepszonych produktów po niskiej cenie. Te czynniki powodują, że od zarządzających systemami produkcyjnymi oczekuje się podejmowania szybkich i trafnych decyzji zapewniających z jednej strony spełnienie tych wymagań, a z drugiej strony efektywne funkcjonowanie przedsiębiorstwa i szybką realizację zleceń produkcyjnych.

Każda, nawet drobna zmiana organizacyjna wewnątrz firmy jak i w jej otoczeniu może przełożyć się na poprawę bądź spadek efektywności danego przedsiębiorstwa, a co za tym idzie na wynik finansowy. Obecnie firmy produkcyjne, chcące być konkurencyjne bardzo poważnie powinny traktować problem zarządzania zasobami ludzkimi oraz odpowiedniego budowania harmonogramów produkcji [148, 169]. Są to obszary, na które firma ma bezpośredni wpływ oraz stosunkowo dużą swobodę działania, a co za tym idzie niektóre zmiany mogą zostać wprowadzone natychmiastowo.

Zarządzanie zasobami ludzkimi w organizacji jest jednym z trudniejszych zadań, z jakimi zmagają się osoby na stanowiskach kierowniczych [169]. Powiązane jest to z rosnącymi kosztami pracy ludzkiej oraz ze specyfiką zasobów ludzkich, związanych z kompetencjami i umiejętnościami pracowników, ich cechami fizycznymi i psychicznymi. Przy rozdzielaniu pracy, osoby decyzyjne muszą brać pod uwagę wiele czynników: zarówno wewnętrznych jak i zewnętrznych, deterministycznych oraz losowych, skorelowanych ze sobą w mniejszym bądź większym stopniu. Przykładami czynników zewnętrznych są: zmiany w prawie pracy oraz zmiany demograficzne. Przykładami czynników wewnętrznych są: liczba pracowników będących na urlopie lub zwolnieniu lekarskich, ich preferencje, ograniczenia organizacyjne, reżim czasowy, różnorodność zadań oraz umiejętności pracowników. Czynniki wewnętrzne stanowią wyzwanie, z którym wiele organizacji ma trudności, przez co nie wykorzystuje w pełni swoich zasobów oraz nie osiąga maksymalnej wydajności [89].

Zagadnienie przydziału zasobów ludzkich do zadań jest problemem obecnym w wielu dziedzinach, takich jak: służba zdrowia, systemy produkcyjne, zagadnienia związane z rozkładem jazdy, turystyka i hotelarstwo, zarządzanie projektami, konserwacja i utrzymanie urządzeń i wielu innych opisywanych w literaturze [22, 71, 96, 102, 116, 123]. W każdej z tych dziedzin stosuje się różne metody organizacji pracy i wciąż poszukuje się nowych poprawiających efektywność i wykorzystanie zasobów. Celem tych badań



jest znalezienie sposobu najefektywniejszego wykorzystania zasobów ludzkich w firmie. Traktowanie pracowników jako kluczowego zasobu i źródła przewagi konkurencyjnej oraz zarządzanie zasobami ludzkimi zyskuje coraz większe znaczenie w gospodarkach rozwiniętych [134, 156]. Decyzje podejmowane przez ludzi mają swoje ograniczenia dotyczące wyboru najlepszego rozwiązania [99]. Złożoność problemów decyzyjnych stale rośnie i często przewyższa możliwości obliczeniowe standardowego komputera.

W literaturze można spotkać wiele prób rozwiązania problemów szeregowania zadań. Niestety, jak każde rozwiązanie, mają one swoje wady i zalety. W większości przypadków uzyskanie akceptowalnego efektu wymaga czasochłonnego „dostrajania” algorytmu do typu problemu [119]. Złożoność obliczeniowa problemu oraz rozmiar problemów praktycznych często eliminują z rozważań algorytmy dokładne (ze względu na fakt, iż rozwiązanie musi zostać podane w założonym czasie), pozostawiając możliwość zastosowania algorytmów heurystycznych oraz metaheurystycznych, umożliwiających rozwiązanie postawionych problemów w krótkim czasie i z zadowalającą dokładnością. Badania nad algorytmami heurystycznymi, dostarczającymi rozwiązania dla zagadnień, gdzie nieefektywne bądź niemożliwe jest zastosowanie rozwiązań dokładnych, stanowią bardzo szybko rozwijającą się dziedzinę nauki [22, 71, 89, 96, 99, 102, 116, 123, 134].

Obecnie wiele problemów rozwiązywanych jest przy pomocy algorytmów heurystycznych np. problemy job-shop[26, 28, 80, 133, 146], flow-shop[122, 127, 131, 136], max-flow[91], problemy pakowania[10, 70, 163], optymalizacji planowania produkcji[16, 100, 103, 108], planowania tras pojazdów[34, 35, 46, 170], szeroko rozumiane podejmowanie decyzji[93], problemy planowania łańcuchów dostaw[115] czy harmonogramowania produkcji[117, 119], które nie sprawdzają wszystkich możliwych rozwiązań, a jedynie przeszukują przestrzeń rozwiązań w sposób „inteligentny”, tzn. zgodnie z przyjętym oraz zaimplementowanym sposobem poszukiwań tak, aby w zbiorze rozwiązań znaleźć rozwiązanie możliwie najlepsze. Przykładem działania heurystyki jest np. sprawdzanie rozwiązań sąsiednich i przechodzenie do najlepszego z nich bądź stworzenie nowego rozwiązania, jako kombinacji dwóch, wcześniej znalezionych, dobrych rozwiązań. W najogólniejszym ujęciu każda metoda inteligentna, która podąża za zdefiniowaną logiką, w której podejmowane są decyzje, można zaliczyć do algorytmów. Algorytmy heurystyczne nie gwarantują wprowadzenia rozwiązania optymalnego, pozwalają za to znaleźć rozwiązanie akceptowalne - bliskie rozwiązaniu optymalnemu, za to w ściśle określonym reżimie czasowym. Te cechy algorytmów heurystycznych mają szczególne znaczenie dla przedsiębiorstw produkcyjnych, w których czas podjęcia decyzji jest często klu-

czowy z punktu widzenia efektywności systemu produkcyjnego. O ile harmonogram pracy na kolejny dzień może zostać obliczony przez noc, o tyle w przypadku losowym (np. awarii maszyny, niedyspozycji pracownika) harmonogram zastępczy musi zostać wygenerowany natychmiast.

Coraz większe zainteresowanie możliwością zastosowania metod inteligentnych w harmonogramowaniu produkcji widać, analizując liczbę artykułów naukowych na ten temat. W tabeli 1 zostały przedstawione wyniki następujących przeszukań w latach 2014 – 2020 w bazach Scopus oraz Web of Science:

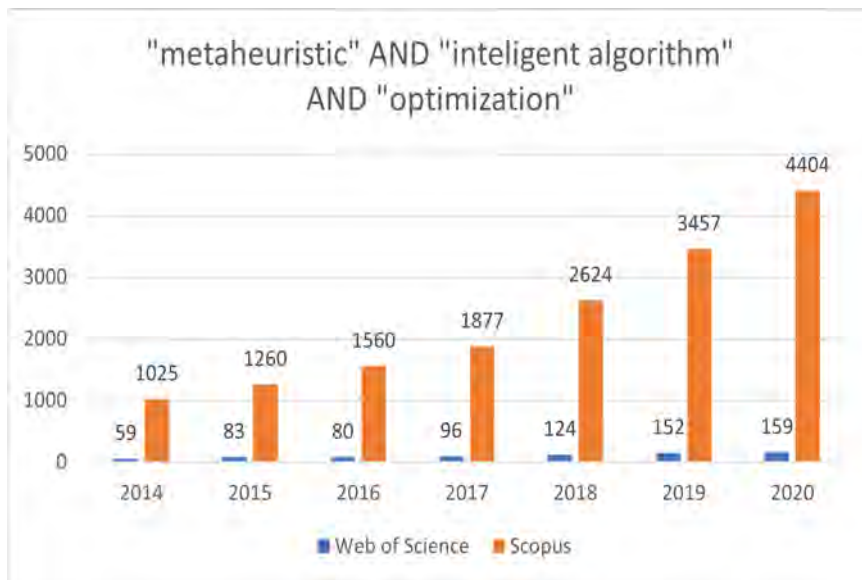
- suma wyszukiwań dla haseł "metaheuristic", "intelligent algorithm", "optimization";
- przynajmniej jedno z haseł "metaheuristic", "algorithm", "optimization";
- hasło "production scheduling";
- suma wyszukiwań haseł "production scheduling" AND przynajmniej jedno z "metaheuristic", "algorithm", "optimization".

Tabela 1: Liczba artykułów w poszczególnych kategoriach w latach 2014-2020

lata	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<b>szukana fraza</b>	<b>"metaheuristic" AND "intelligent algorithm" AND "optimization"</b>						
baza WoS	59	83	80	96	124	152	159
baza Scopus	1025	1260	1560	1877	2624	3457	4404
<b>szukana fraza</b>	<b>"metaheuristic" OR "algorithm" OR "optimization"</b>						
baza WoS	79399	85871	97356	103400	113275	126526	132403
baza Scopus	284046	296334	328678	359339	415728	481936	523500
<b>szukana fraza</b>	<b>"production scheduling"</b>						
baza WoS	1459	1524	1721	1799	1877	2080	2082
baza Scopus	7418	7825	8614	9555	11246	13859	15455
<b>szukana fraza</b>	<b>"production scheduling" AND ("metaheuristic" OR "algorithm" OR "optimization")</b>						
baza WoS	405	439	548	552	631	790	834
baza Scopus	5129	5442	6041	6788	8353	10436	11971

Analizując liczbę publikacji na temat "metaheuristic", "algorithm", "optimization" oraz "production scheduling" można zauważyć wyraźny wzrost zainteresowania tymi dziedzinami w ostatnich latach, co przedstawiają rysunki 1, 2 oraz 3. Rysunek 4 przedstawia liczbę publikacji na przestrzeni lat dla łączonego wyszukiwania "production scheduling" oraz "metaheuristic" lub "algorithm" lub "optimization". Zarówno w bazie Web od Science, jak

i Scopus widać podwojenie liczby publikacji w roku 2020 w porównaniu z rokiem 2014.

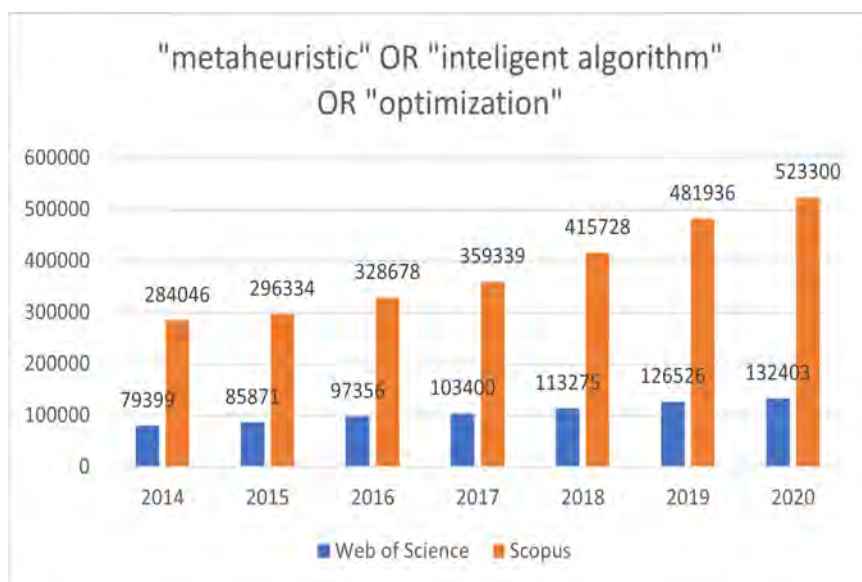


Rysunek 1: Wynik wyszukania haseł "metaheuristic" AND "algorithm" AND "optimization" w bazach Scopus oraz Web of Science w poszczególnych latach 2014 – 2020

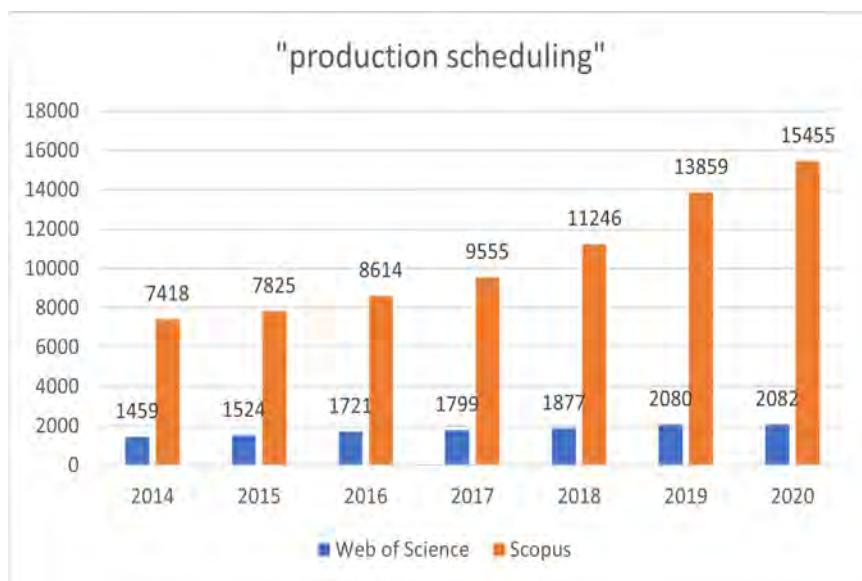
W zawiązku z powyższym za cel rozprawy doktorskiej przyjęto:

*Opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich opartej na metodach inteligentnych z uwzględnieniem takich kryteriów optymalizacyjnych jak minimalna liczba pracowników lub minimalny czas realizacji zadań produkcyjnych z uwzględnieniem kompetencji pracowników.*

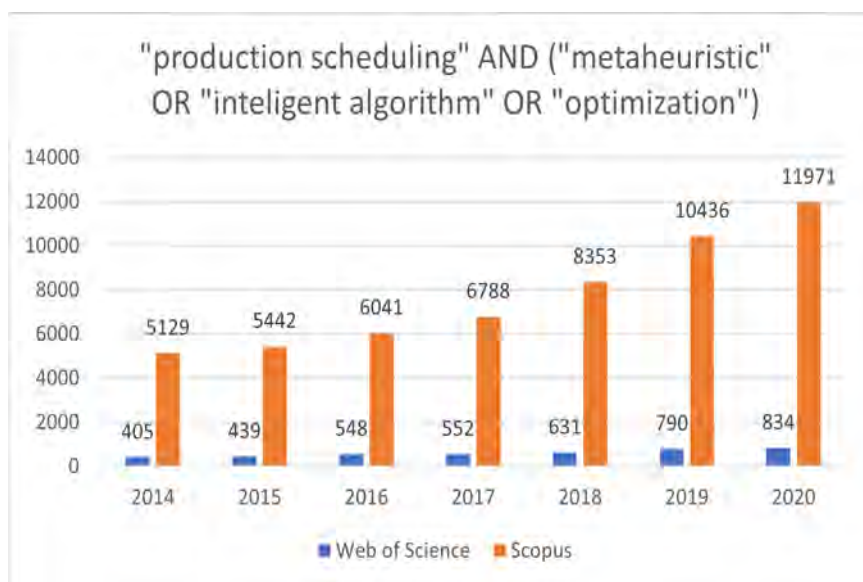
Opracowana metodyka pozwoli na szybką i efektywną budowę harmonogramów, realizację zleceń produkcyjnych oraz na optymalizację wykorzystania zasobów produkcyjnych (wskazanych jako krytyczne), co bezpośrednio przełoży się na korzyści finansowe. Na potrzeby realizacji celu pracy opracowano algorytm Neuro-Tabu Search oraz aplikację pozwalającą na jego wykonanie i generowanie różnych wersji harmonogramów produkcji dla zadanych warunków i ograniczeń.



Rysunek 2: Wynik wyszukiń hasel "metaheuristic" OR "algorithm" OR "optimization" w bazach Scopus oraz Web of Science w latach 2014 – 2020



Rysunek 3: Wynik wyszukiń hasła "production scheduling", w bazach Scopus oraz Web of Science w latach 2014 – 2020



Rysunek 4: Wynik wyszukiwań haseł "production scheduling" AND ("metaheuristic" OR "algorithm" OR "metaheuristic") w bazach Scopus oraz Web of Science w latach 2014 – 2020

Pracę podzielono na następujące rozdziały:

### **Rozdział 1. Charakterystyka harmonogramowania produkcji**

Przedstawiono charakterystykę współczesnych systemów produkcyjnych: ich definicje oraz sposoby budowania harmonogramów produkcji w ujęciu klasycznym. Scharakteryzowano planowanie produkcji i rodzaje sterowania systemem produkcyjnym. Przeprowadzono przegląd literatury przedmiotu na temat problemów występujących przy budowie harmonogramów produkcji oraz przedstawiono kryteria określające jakość harmonogramów.

### **Rozdział 2. Charakterystyka wybranych metod inteligentnych**

Wykonano przegląd literatury w zakresie metod inteligentnych oraz ich zastosowania w inżynierii produkcji. Przedstawiono klasyfikacje metod inteligentnych wykorzystywanych w zagadnieniach planowania produkcji. Poszczególne metody scharakteryzowano i przeanalizowano pod kątem obszarów ich zastosowań. Metody porównano ze względu na wybrane kryteria przyjęte na potrzeby realizacji celu pracy.

### **Rozdział 3. Cel, teza i przyjęte zadanie badawcze**

W oparciu o analizę literaturową, przedstawioną w rozdziałach pierwszym i drugim, dotyczących charakterystyki problemów harmonogramowania produkcji oraz charakterystyki wybranych metod inteligentnych zdefiniowano tezę, cel główny oraz cele szczegółowe pracy. Przedstawiono przyjęte zadania badawcze oraz założenia dla opracowywanej metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich.

### **Rozdział 4. Metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich**

Zaprezentowano autorską, 6-cio etapową metodykę harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. Każdy z etapów opisano pod kątem działań, które należy wykonać, aby możliwe było wdrożenie metodyki w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

### **Rozdział 5. Algorytm optymalizacyjny Neuro-Tabu Search**

Przedstawiono opis matematyczny problemu, który zilustrowano przykładem liczbowym. Opisano algorytm optymalizacyjny zastosowany w metodyce harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. Przedstawiono również wyniki testów komputerowych działania algorytmu.

### **Rozdział 6. Charakterystyka systemu produkcyjnego, dla którego zostanie przeprowadzona weryfikacja metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich**

Scharakteryzowano system produkcyjny przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach, dla którego została przeprowadzona weryfikacja metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. Pobrano dane opisujące cały system produkcyjny: layouty hal produkcyjnych, spis maszyn i operacji dla poszczególnych wyrobów oraz szczegółowe dane dla produktów: maszruty, bufory przystanowiskowe oraz sposób planowania i przyporządkowywania pracowników do zadań.

### **Rozdział 7. Weryfikacja metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich**

Przeprowadzono weryfikację opracowanej metodyki na danych pochodzących z przedsiębiorstwa Brose Sitech sp. z o.o. Do weryfikacji wykorzystano grupę wyrobów DOPEL należącą do projektu Volkswagen Transporter.

**Rozdział 8. Opis aplikacji wspierającej generowanie harmonogramów**

Zaprezentowano interfejs użytkownika aplikacji wykorzystującej algorytm optymalizacyjny Neuro-Tabu Search (NTS), którą opracowano w celu ułatwienia korzystania z algorytmu NTS. Zaprezentowano i omówiono poszczególne widoki aplikacji oraz przykłady ich zastosowań.

**Rozdział 9. Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych prac**

Przedstawiono podsumowanie oraz wnioski z zastosowania oraz weryfikacji metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. Odniesiono się do podstawowych tez pracy oraz określono kierunki dalszych prac.

# Rozdział 1

## Charakterystyka harmonogramowania produkcji

Współczesne systemy produkcyjne charakteryzują się zmiennością i wielowersyjnością asortymentu przy współbieżności wykonywania zadań. Z kolei klienci mają coraz większe wymagania dotyczące terminowości realizowanych zamówień i jakości wyrobów przy równoczesnym nieprzekraczalnym lub niższym koszcie wytworzenia [81, 147].

Budowa harmonogramu produkcji polega na zaplanowaniu przebiegu operacji wytwórczych w czasie, czyli przyporządkowaniu w czasie dysponowanych zasobów produkcyjnych do zadań określonych przez zlecenia produkcyjne, oczywiście przy spełnieniu przyjętych ograniczeń. Ograniczenia te mogą wynikać z rodzaju i złożoności zleceń, struktury systemu produkcyjnego, sytuacji decyzyjnej, kryteriów oceny, a ich spełnienie wyznacza dopuszczalność tworzonego rozwiązania [81].

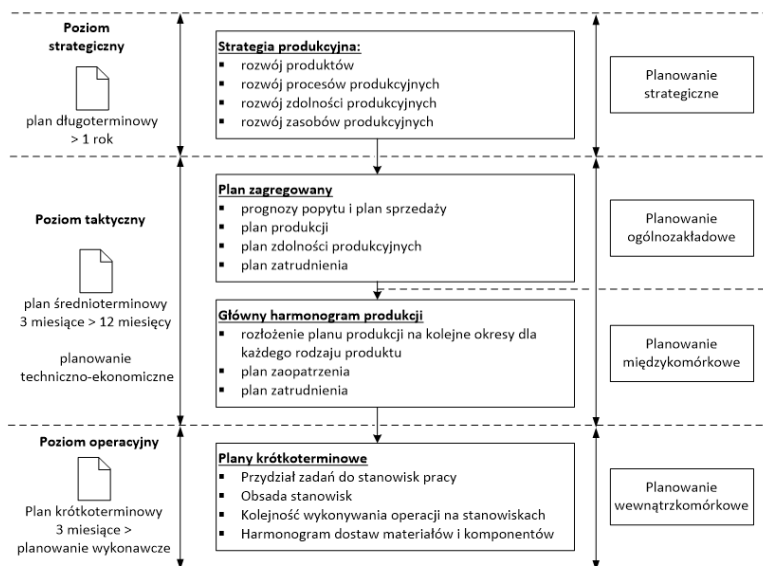
Problem harmonogramowania produkcji staje się jednym z kluczowych elementów sukcesu firmy produkcyjnej z dwóch powodów:

1. Aby efektywnie zrealizować zadanie produkcyjne, przedsiębiorstwo musi wziąć pod uwagę wiele czynników, takich jak: zmienną liczbę pracowników, różne kompetencje, predyspozycje i umiejętności pracowników, często wąskie okno czasowe dla danego procesu bądź operacji, potrzebę synchronizacji między poszczególnymi operacjami oraz etapami produkcji, ograniczony dostęp do zasobów produkcyjnych, czynniki ryzyka pojawiające się w systemie produkcyjnym itp.
2. W przedsiębiorstwie, w którym codziennie wykonywanych są setki bądź tysiące sztuk produktów, nawet niewielka zmiana w harmono-



gramie produkcji może przełożyć się na znaczący zysk w skali miesiąca czy roku. Przykładowo optymalizacja kolejności przebrożeń maszyn zmniejszająca czas pracy maszyny o 0.1 procent może przełożyć się na tysiące bądź miliony złotych oszczędności w skali roku.

Złożoność zadań harmonogramowania wymusza potrzebę budowania cząstkowych modeli optymalizacyjnych dla określonych fragmentów produkcji [106]. Utworzenie harmonogramu optymalnego w zadowalającym czasie jest na ogół niemożliwe ze względu na NP-trudny charakter tego problemu [147]. Również harmonogramowanie cykliczne należy do tej klasy problemów. Dlatego harmonogramowanie produkcji staje się zadaniem coraz to bardziej złożonym, przy rozwiązywaniu, którego używa się coraz bardziej zaawansowanych metod obliczeniowych.



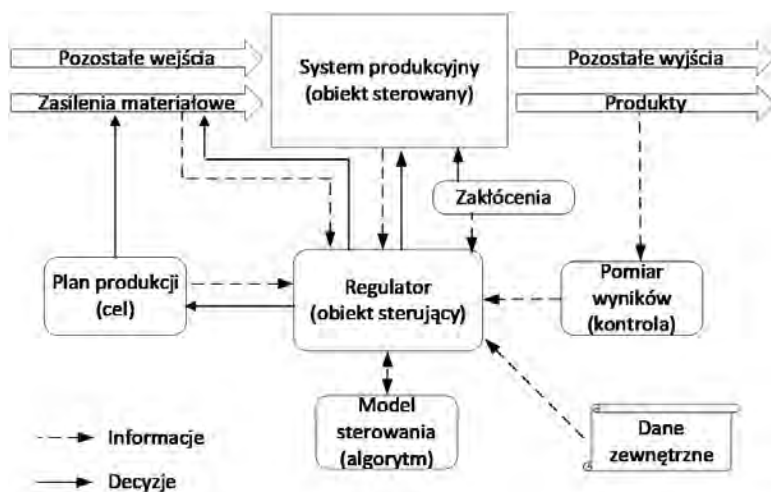
Rysunek 1.1: Schemat planowania produkcji w przedsiębiorstwie

## 1.1 Planowanie produkcji i rodzaje sterowania systemem produkcyjnym

Planowanie produkcji można podzielić na trzy poziomy: strategiczny, taktyczny i operacyjny (rysunek 1.1). Plany strategiczne opracowywane są na okres powyżej 1 roku i dotyczą takich problemów jak rynek zbytu, klienci, rozwój technologii oraz zasobów ludzkich itp. Plan obejmuje obszary

dotyczące m.in.: wymagań klientów, planowania zaopatrzenia, dystrybucji. Na tym poziomie plany produkcyjne można podzielić na plany ogólnozakładowe oraz plany międzykomórkowe. Na poziomie operacyjnym tworzone są plany krótkoterminowe, tzw. plany wewnątrzkomórkowe, dotyczące codziennej produkcji, a ich zakres to przydzielanie zadań do stanowisk, obsadzanie stanowisk, kolejność wykonywania operacji, harmonogramowanie dostaw materiałów, planowanie kontroli jakości.

Planowanie produkcji służy przedsiębiorstwom do wyznaczania celów oraz sposobów, w jaki chcą te cele zrealizować, natomiast za ich osiągnięcie odpowiedzialne jest sterowanie. Rola planowania i sterowania produkcją (PPC) (ang. Production Planning and Control) w przedsiębiorstwie produkcyjnym sprowadza się do planowania i sterowania przepływem materiałów w procesie wytwórczym. Jego celem jest m.in.: wykonanie założonego planu produkcyjnego, zapewnienie zrównoważonego obciążenia pracowników i maszyn. Sterowanie produkcją zaczyna się od zapotrzebowania na surowiec, a kończy na dostarczeniu produktu klientowi lub do magazynu. Na rysunku 1.2 została przedstawiona zależność między planowaniem, a sterowaniem produkcją.



Rysunek 1.2: Schemat układu sterowania produkcją

Tak jak planowanie produkcji odbywa się na różnych poziomach organizacyjnych (strategicznym, taktycznym i operacyjnym), tak samo sterowanie produkcji wiąże się z analogicznymi decyzjami podejmowanymi na różnych szczeblach organizacji i w różnym horyzoncie czasowym. W obszarze zarządzania produkcją szczególnie ważne są plany zagregowane, plany produkcji oraz plany operacyjne zapisywane często w postaci harmonogramów

produkcji. Opracowanie tych planów jest szczególnie istotne w warunkach zmiennego i nieprzewidywalnego otoczenia, z którego pochodzą liczne czynniki zakłócające przebieg procesu.

Sterowanie produkcją nie odbywa się według przypadkowych reguł tylko jest oparte na metodach i algorytmach sterowania. Wybór metody sterowania zależy od wielu czynników zewnętrznych i wewnętrznych, do których zalicza się między innymi wielkość popytu, rodzaj produkcji, zdolność produkcyjna i rodzaj zasobów produkcyjnych. W zależności od tych czynników przedsiębiorstwa stosują zazwyczaj trzy typy sterowania procesem produkcyjnym: pchający (ang. push), ssący (ang. pull) i wyciskający (ang. squeeze). Podstawowym elementem rozróżniającym te trzy typy sterowania jest struktura i proces przepływu informacji w procesie wytwórczym, co ma bezpośredni wpływ na przepływ materiałów [33].

### 1.1.1 Systemy pchające

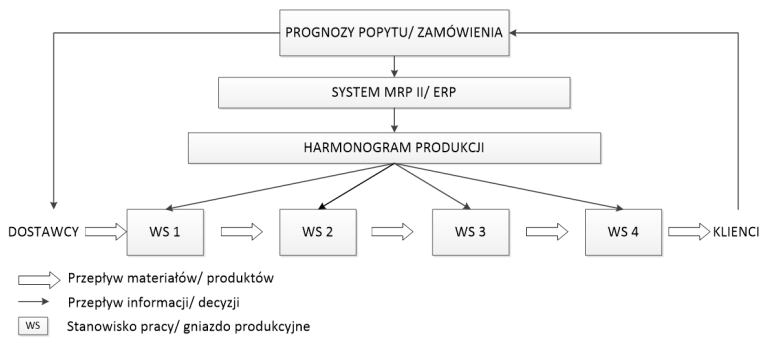
Ten typ sterowania występuje w większości przedsiębiorstw produkcyjnych. Jest charakterystyczny dla systemów MRP (ang. Manufacturing Resources Planning) lub obecnie ERP (ang. Enterprise Resources Planning). Głównym elementem sterującym systemem wytwórczym jest prognoza popytu na wyroby lub wielkości zamówień. Na podstawie prognoz sporządzany jest harmonogram produkcji, uwzględniający takie elementy jak zdolności produkcyjne i logistyczne oraz potrzeby materiałowe wynikające ze struktury planowanych do wytworzenia produktów. Cechą charakterystyczną dla systemów pchających, oprócz harmonogramów produkcji, jest produkcja w seriach i partiach oraz utrzymywanie zapasów bezpieczeństwa [33].

Wielkość i rodzaj produkcji planowana jest z wyprzedzeniem, poprzez budowę harmonogramu produkcji. W ich budowie uwzględnia się większość informacji zawartych w poszczególnych modułach systemu MRP II/ ERP. Następnie produkcja „przepychana” jest przez poszczególne operacje procesu produkcyjnego, aż do magazynu wyrobów gotowych, a następnie do klienta. Rysunek 1.3 przedstawia schemat funkcjonowania systemu pchającego.

Systemy pchające, mimo iż stanowią większość w systemach produkcyjnych, charakteryzują się dużą wrażliwością na zakłócenia wynikające głównie ze zmian popytu i zmian terminów realizacji zamówień [33].

### 1.1.2 Systemy ssące

Ten typ systemu wywodzi się z koncepcji szczupłej produkcji (ang. Lean Production) opracowanej przez firmę Toyota. Do sprawnego funkcyjnawa-

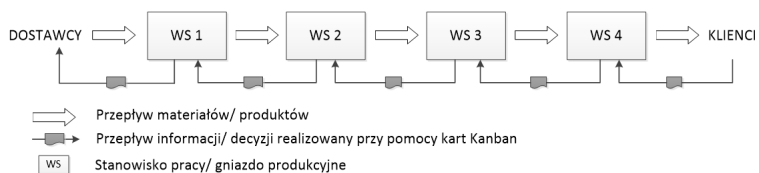


Rysunek 1.3: Schemat funkcjonowania systemu pchającego [33]

nia ssącego systemu sterowania produkcją potrzebne są trzy dobrze funkcjonujące komponenty [42, 129]:

1. sieć dobrze zorganizowanych, pewnych dostawców części i komponentów do produkcji,
2. sterowanie przepływem materiałów w procesie wytwórczym według koncepcji Kanban,
3. efektywne metody kontroli jakości.

Schematycznie sposób funkcjonowania systemu ssącego, sterowanego przy pomocy kart Kanban, przedstawia rysunek 1.4.

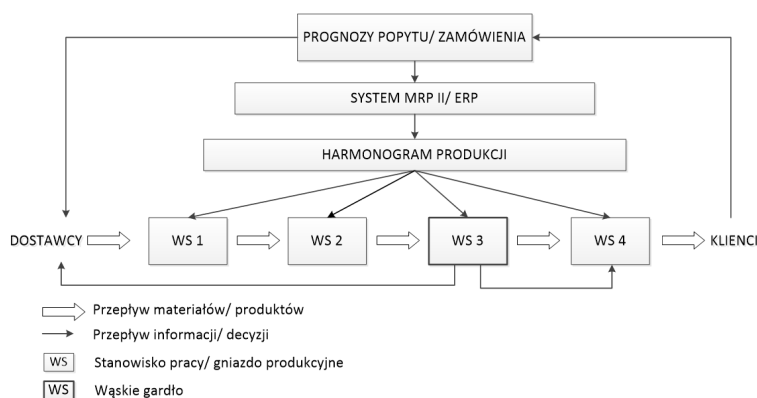


Rysunek 1.4: Schemat funkcjonowania systemu ssącego [32]

Ssący typ sterowania stosowany jest głównie w przemyśle motoryzacyjnym oraz elektronicznym. Z uwagi na możliwość szybkiego i elastycznego reagowania na zmiany popytu oraz na niski poziom zapasów systemy te zyskują coraz większą popularność w przemyśle, a techniki Lean Production przenoszone są na inne dziedziny niż produkcja. Przykładem są techniki Lean Office lub próby adaptacji i implementacji technik Lean w górnictwie (ang. Lean Mining) [33].

### 1.1.3 Systemy wyciskające

Systemy te wywodzą się z teorii ograniczeń (ang. Theory of Constraints) znanej w środowisku zarządzania produkcją jako zsynchronizowane wytwarzanie [15, 147]. Sterowanie w systemie OPT (ang. Optimized Production Technology) koncentruje się na sterowaniu wąskim gardłem, które jest elementem synchronizującym tempo produkcji. Inaczej mówiąc wydajność wąskiego gardła wyznacza tempo pracy stanowisk produkcyjnych przed i za wąskim gardłem [103, 147]. Sposób funkcjonowania systemu wyciskającego przedstawia schematycznie rysunek 1.5.



Rysunek 1.5: Schemat funkcjonowania systemu wyciskającego [32]

Możliwości produkcyjne wąskiego gardła, będącego zasobem krytycznym, decydują zarówno o wielkości partii produkcyjnej jak i o częstotliwości dostaw materiałów. W celu zabezpieczenia ciągłości produkcji często stosuje się różne wielkości partii produkcyjnej i transportowej w systemie produkcyjnym oraz bufor z zapasami elementów przed stanowiskiem będącym wąskim gardłem [15].

Dzięki wyborowi odpowiedniej metody sterowania produkcją możliwe jest odpowiednie zaplanowanie potrzeb materiałowych i komponentów dostarczanych przez poddostawców na potrzeby realizacji zleceń produkcyjnych. Jest to szczególnie ważne w przypadku wyrobów złożonych z kilkuset i więcej części, produkowanych w małych partiach. Odpowiednie planowanie i sterowanie może obniżyć koszty magazynowania, a przez to koszty produkcji. Inną funkcją sterowania jest bieżące reagowanie na zakłócenia pojawiające się w systemie produkcyjnym. W tym przypadku funkcja ta łączy się z funkcją monitorowania (kontroli) podstawowych parametrów procesu produkcyjnego i polega na korygowaniu w porównaniu z planem produkcji [33].

## 1.2 Harmonogramowanie produkcji

Pod pojęciem „harmonogramowania produkcji” (szeregowania zadań produkcyjnych) rozumie się sporządzenie planu produkcji wyrobów z określeniem kolejności wykonywanych zadań produkcyjnych i operacji na określonych stanowiskach pracy tak, aby uzyskać najlepsze wykorzystanie zasobów produkcyjnych względem określonego kryterium celu. Zdefiniowanie kryterium celu zależy zazwyczaj od specyfiki danego przedsiębiorstwa i jego produktów oraz od przyjętej polityki. W harmonogramie produkcji określone zostają również wielkość partii produkcyjnych oraz uwzględniane są wszystkie występujące ograniczenia. Harmonogram przedstawiany jest najczęściej w postaci ”wykresu lub opisu poszczególnych operacji (zadań) uwzględniający jednostki czasu, w których te operacje (zadania) będą wykonywane” [130].

Mówiąc ogólnie, harmonogram produkcji to instrukcja działania systemu produkcyjnego lub inaczej lista operacji do wykonania wraz z określonymi czasami. Harmonogram może być rozumiany również, jako zbiór decyzji, według których przebiegać będzie proces produkcyjny [167]. Należy go traktować, jako uszczegółowienie planu produkcji poprzez przypisanie operacji elementarnych zasobom systemu produkcyjnego oraz ułożenie ich w czasie. Głównymi celami budowy harmonogramu produkcji są:

1. dotrzymanie terminu realizacji przyjętego zlecenia produkcyjnego,
2. skrócenie czasu pomiędzy rozpoczęciem produkcji, a dostarczeniu klientowi wyrobów,
3. efektywne wykorzystanie posiadanych zasobów produkcyjnych (maszyn, urządzeń, stanowisk pracy, ludzi, środków transportu i innych).

Pomiędzy głównymi celami harmonogramowania mogą występować również konflikty. Przykładem może być sytuacja, gdy duża liczba zasobów produkcyjnych (np. pracowników) zmniejsza czas realizacji zadania, ale zasoby te nie są w pełni i efektywnie wykorzystywane. Konflikt będzie występował także w sytuacji odwrotnej, gdy ograniczenie ilości zasobów produkcyjnych powodować będzie efektywniejsze ich wykorzystanie, natomiast czas realizacji zlecenia produkcyjnego ulegnie wydłużeniu [132].

Harmonogram produkcji budowany jest dla linii produkcyjnych i montażowych. Jeśli w linii produkcyjnej wykonywany jest jeden rodzaj produktu, problem harmonogramowania w praktyce nie występuje, gdyż przepływ jest zdeterminowany przez zaprojektowany proces. Problem harmonogramowania występuje wówczas, gdy procesy konkurują o dostęp do wspólnych, ograniczonych zasobów. Produkty są przydzielane w partiach, a każda zmiana produktu jest związana z koniecznością przezbrajania urządzeń.

W zależności od rodzaju produktu i technologii, operacja przezbrajania może być albo dosyć łatwa do przeprowadzenia i trwająca krótko (wówczas jest tania), albo trudna i trwająca długi okres czasu (wówczas staje się kosztowna).

Aby opracować plan produkcji i wyznaczyć harmonogram produkcji potrzebne są następujące dane [53]:

1. struktura produktu najczęściej w postaci BOM'u (ang. Bill of Material), czyli zestawienia podzespołów, części i elementów składających się na wyrób z określeniem ich ilości i relacji potrzebnych do wykonania jednej sztuki wyrobu gotowego,
2. specyfikacja etapów procesu wytwórczego wraz z opisem operacji technologicznych i czasów ich trwania ( $t$ ) oraz czasów przygotowawczo-zakończeniowych ( $tpz$ ),
3. wielkości wynikających z programu produkcji, tj. wielkości partii produkcyjnych, transportowych itd.,
4. wykaz dostępnych zasobów produkcyjnych (tj. maszyn, ludzi i środków transportowych), wraz z ich wydajnością w danym okresie czasu oraz kompetencjami w przypadku pracowników,
5. fundusz czasu pracy maszyn i ludzi,
6. czas wykonania  $n$ -elementowej partii wyrobu, wyliczany najczęściej według wzoru:

$$T_j = tpz_j + n_j t_j \quad (1.1)$$

Obliczenie czasu ( $T_j$ ) pozwala zweryfikować, czy zdolność produkcyjna systemu wytwórczego jest wystarczająca, aby zrealizować zlecenie produkcyjne.

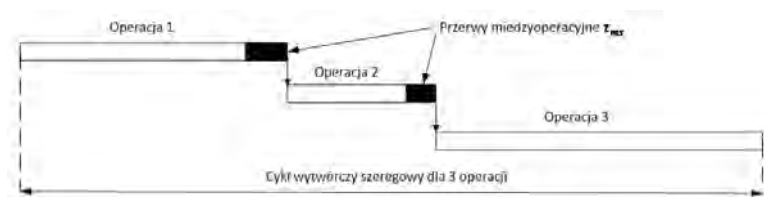
Literatura najczęściej wyróżnia dwa typy harmonogramów, tj. harmonogramy w przód i w tył [53, 130, 132]. Harmonogramy w przód wyznaczane są na podstawie daty przyjęcia zlecenia produkcyjnego i wyznaczenia daty zakończenia produkcji. Natomiast w harmonogramach w tył znana (narzucona) jest data zakończenia produkcji, natomiast wyznacza się najpóźniejszą datę rozpoczęcia produkcji lub możliwie najpóźniejszą datę rozpoczęcia produkcji.

Harmonogramy produkcyjne przedstawiane są najczęściej w postaci graficznej, przy pomocy tzw. wykresów Gantta, w układzie współrzędnych  $(x, y)$ . Na osi  $x$  wykresu umieszcza się czas, natomiast na osi  $y$  maszyny bądź stanowiska realizujące poszczególne operacje. Czas trwania operacji

wytwórczych przedstawia się przy pomocy poziomego paska, w którym lewa kraweź oznacza termin rozpoczęcia operacji, natomiast prawa termin jej zakończenia[167].

Całą produkcję, od momentu wejścia wyrobu poprzez przejście przez wszystkie operacje (czynności, zabiegi) aż do wyjścia, obejmuje cykl produkcyjny w skład którego, oprócz okresów roboczych wchodzi również czas przerw [53, 147]. Długość cyklu produkcyjnego jest jednym z najważniejszych parametrów produkcyjno-organizacyjnych, gdyż jego długość uzależniona jest m.in. od wielkości partii produkcyjnych i transportowych. Cykl produkcyjny jest okresem niezbędnym do zrealizowania określonego zadania produkcyjnego w zadanych warunkach techniczno-ekonomicznych i przy normalnym toku produkcji, a także przy określonym poziomie organizacji procesu produkcyjnego. Zazwyczaj za początek cyklu przyjmuje się moment pobrania materiałów z magazynu do produkcji, natomiast końcem cyklu jest zdanie wyrobów gotowych do magazynu. Realizacja procesów produkcyjnych może być realizowana w trzech rodzajach cykli: szeregowym, równoległym i szeregowo-równoległym [53, 132, 130].

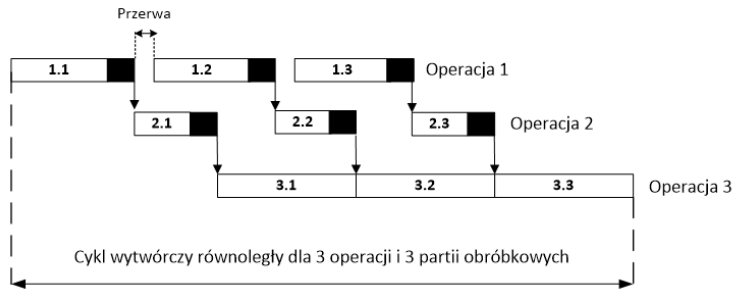
W cyklu szeregowym każda następna operacja rozpoczyna się po zakończeniu poprzedniej. Okres technologiczny cyklu produkcyjnego partii detali stanowi sumę czasu trwania wszystkich operacji technologicznych, co schematycznie przedstawia rysunek 1.6. Ten typ cyklu charakteryzuje się najdłuższym okresem realizacji zadań produkcyjnych przy jednak najmniejszej liczbie operacji transportowych. Najczęściej stosowany jest w produkcji jednostkowej i małoseryjnej.



Rysunek 1.6: Schemat cyklu szeregowego dla 3 operacji [32]

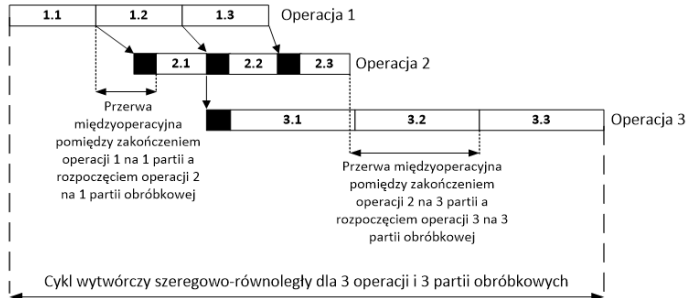
W przebiegu równoległym obrabiane detale przechodzą na następną operację natychmiast po zakończeniu operacji poprzedniej, w związku z tym jedna partia jest w równoległej obróbce w różnych operacjach, często na kilku stanowiskach roboczych (rysunek 1.7). Cykl ten jest charakterystyczny dla produkcji wielkoseryjnej i masowej. Charakteryzuje się najlepszym stopniem wykorzystania stanowisk produkcyjnych, najkrótszym okresem realizacji zadań produkcyjnych, jednak największą liczbą potrzebnych operacji transportowych.





Rysunek 1.7: Schemat cyklu równoległego [32]

Dla przebiegu szeregowo-równoległego cyklu charakterystyczne jest, że kolejna operacja rozpoczyna się przed zakończeniem operacji poprzedzającej. Początek każdej operacji ustala się pod kątem zapewnienia możliwie największej ciągłości obróbki na poszczególnych stanowiskach (rysunek 1.8). Ten rodzaj cyklu produkcyjnego jest najpowszechniej używany w praktyce. Jednak jego zastosowanie wymaga podziału partii produkcyjnej na partie transportowe.



Rysunek 1.8: Schemat przebiegu cyklu szeregowo-równoległego [32]

We współczesnej, złożonej i wysoce konkurencyjnej rzeczywistości funkcjonowania przedsiębiorstw produkcyjnych, do efektywnego funkcjonowania nie wystarcza dobór odpowiedniej metody harmonogramowania oraz odpowiedniego sposobu realizacji cyklu produkcyjnego. Presja ze strony klientów na obniżanie kosztów produkcji przy jednoczesnej dużej elastyczności procesu produkcyjnego, prowadzi do zmniejszania wielkości partii produkcyjnych, skracania cykli produkcyjnych oraz obniżania poziomu zapasów w całym systemie. Chcąc to wszystko uzyskać przy równoczesnym, efektywnym wykorzystaniu zasobów produkcyjnych do budowy harmonogramów produkcji coraz częściej wykorzystują oprócz narzędzi informatycznych również

metody inteligentne. Narzędzia te mają pozwolić na dobór odpowiedniego sposobu kolejowania zadań, efektywną produkcję oraz na optymalne wykorzystanie zasobów produkcyjnych [130, 147, 151, 177].

### 1.3 Problemy występujące przy budowie harmonogramów

Analizując publikacje naukowe, dotyczące harmonogramowania produkcji, można podzielić problemy związane z optymalnym rozłożeniem operacji produkcyjnych w czasie z uwagi na:

1. Budowę systemu wytwórczego i specyfikę zleceń produkcyjnych.

Literatura przedmiotu wyróżnia 3 środowiska wytwórcze [29, 132, 150]:

- (a) systemy przepływowe (ang. flow-shop),
- (b) systemy gniazdowe (ang. job-shop),
- (c) systemy otwarte (ang. open-shop).

Problemy dotyczące szeregowania zadań w typowych gniazdach produkcyjnych nazywane są problemami klasy job-shop lub ogólnymi problemami harmonogramowania (ang. general job-shop). Następuje tutaj ułożenie zadań produkcyjnych z uwagi na ograniczenia technologiczne związane z charakterystyką rozpatrywanego systemu produkcyjnego. Rozwiązaniem jest znalezienie dopuszczalnego rozwiązania o najmniejszej wartości kryterium celu, którym najczęściej jest czas realizacji zadania produkcyjnego [31, 133, 152]. Z początkiem XXI wieku, wraz z rozwojem coraz bardziej skomplikowanych procesów produkcyjnych oraz pracami nad Industry 4.0 klasa problemów job-shop zyskała na popularności [37, 40, 55, 62, 79, 105]. Analizując publikacje naukowe na temat problemów gniazdowych można wyróżnić 7 klasyfikacji [173]:

- (a) Źródła zapotrzebowania produkcji:
  - problemy z otwartą pętlą,
  - problemy z zamkniętą pętlą.
- (b) Liczba obrabiarek:
  - problemy jednomaszynowe,
  - problemy wielomaszynowe.

- (c) Wskaźnik wydajności:
  - problemy bazujące na kosztach,
  - problemy bazujące na innych wskaźnikach.
- (d) Charakterystyka środowiska produkcyjnego:
  - środowisko deterministyczne,
  - środowisko stochastyczne.
- (e) Charakterystyka przetwarzania operacji:
  - dynamiczna,
  - statyczna.
- (f) Liczba zakładów produkcyjnych / wytwórni / fabryk:
  - problemy w obrębie jednego zakładu,
  - problemy wielozakładowe.
- (g) Ograniczenia zasobów:
  - jeden rodzaj zasobów,
  - dwa rodzaje zasobów,
  - wiele rodzajów zasobów.

W 2004 roku powstała klasyfikacja przedstawiająca proces harmonogramowania, jako zestaw modułów, w zależności od szeroko rozumianego rodzaju problemu [55]. Wyróżniono w niej następujące moduły:

- modelowanie popytu,
- planowanie dni wolnych,
- planowanie zmian,
- budowa linii,
- przydział zadań i pracowników.

Ponadto w problemach harmonogramowania możliwe jest łączenie modułów, a wymagania i ograniczenia odnośnie danych modułów są specyficzne dla analizowanego zagadnienia. Klasyfikacja ta służy do omówienia kluczowych problemów związanych z planowaniem pracy personelu w różnych obszarach zastosowań [173].

## 2. Występowanie i charakter czynników ryzyka.

W badaniach i publikacjach naukowych coraz częściej odbiega się od przyjmowania deterministycznego charakteru produkcji [11, 74].

W praktyce produkcyjnej procesom wytwórczym towarzyszy pojawianie się czynników ryzyka o charakterze losowym [33]. O stochastycznym charakterze systemu produkcyjnego świadczy to, że wielkości takie jak termin gotowości, czasy wykonania operacji, czy też inne parametry systemu są zmiennymi losowymi o odpowiednich parametrach [152]. Rozwiązywanie problemów tego typu polega na odpowiednim poznaniu zmienności wielkości charakterystycznych dla danego systemu produkcyjnego, tak aby można było określić ich odpowiednie wartości [20].

### 3. Charakter dynamiki procesów produkcyjnych.

Cechą charakterystyczną wszystkich procesów produkcyjnych jest towarzysząca im dynamika i zmienność. W związku z tym mogą pojawić się zdarzenia, prace, procesy, czynności, których realizacja jest konieczna, a których pojawienia się nie zakładano w chwili budowy harmonogramu [11]. Ponieważ uwzględnienie tych elementów w zaplanowanym już i przyjętym harmonogramie jest często trudne i powodujące zakłócenia w procesie produkcji, dąży się do opracowania metod, pozwalających na przewidzenie przyszłych zdarzeń lub dodatkowych procesów i prac [81, 92, 133, 152]. Działanie takie pozwoli na zwiększenie stabilności opracowanego harmonogramu.

### 4. Ograniczenia systemów gniazdowych.

Wiele opisanych w literaturze rozwiązań dla systemów klasy job-shop bazuje na różnego rodzaju założeniach upraszczających, które mogą utrudnić bądź uniemożliwić skuteczne harmonogramowanie produkcji w rzeczywistych produkcyjnych. Wyszczególniono następujące założenia [58, 132, 149]:

- operacje jednego zadania nie mogą być wykonywane równolegle,
- na danej maszynie nie można wykonywać dwóch operacji równolegle,
- każda praca ma  $m$  operacji po jednej na każdą maszynę,
- każda praca musi być wykonana do końca,
- czasy wykonania operacji są niezależne od harmonogramu,
- dopuszczalne jest oczekiwanie zadania na zwolnienie maszyny,
- jest tylko jedna maszyna każdego typu,
- mogą wystąpić okresy, w których maszyny są nieobciążone,
- maszyna nie może wykonywać więcej niż jedną operację w danym momencie,

- maszyny nigdy się nie psują i są dostępne w ciągu całego czasu realizacji produkcji,
- ograniczenia technologiczne są z góry znane i niezmiennie,
- nie występuje czynnik losowości,
- niedopuszczalne jest wariantowe zapisanie technologii.

Przedstawione założenia bardzo często okazują się być ograniczeniami, a zagadnienie harmonogramowania produkcji w systemie job-shop często jest analizowane jedynie teoretycznie, bez praktycznego podejścia do problemu [149].

#### 5. Powiązanie z systemem rzeczywistym.

Jest to jeden z najważniejszych podziałów, gdyż w literaturze można znaleźć zarówno prace o charakterze aplikacyjnym (dotyczące rozwiązania rzeczywistych problemów szeregowania zadań w rzeczywistym przedsiębiorstwie), jak i prace o charakterze czysto teoretycznym dotyczące problemów uogólnionych i często z licznymi ograniczeniami. Prac z tej drugiej grupy jest znacznie więcej. Dzieje się tak, ponieważ problemy harmonogramowania traktowane są przez badaczy często jako tzw. problemy testowe, czyli problemy stanowiące podstawę odniesienia podczas oceny uzyskanych wyników badań nad daną metodą czy algorytmem. Innym problemem jest fakt, że przedsiębiorstwa szukają szybkiego i praktycznego rozwiązania swoich problemów, co często nie stanowi dobrego materiału publikacyjnego w punktowanych czasopismach naukowych [20, 152]. Dobór metody szeregowania zadań w rzeczywistym systemie jest złożonym zagadnieniem, a najszerzej stosowaną metodą harmonogramowania jest wykorzystanie reguł priorytetów [3, 44, 81, 82, 149].

Pomimo, że w literaturze związanej z planowaniem produkcji i budową harmonogramów rozpatruje się problemy występujące w systemach rzeczywistych, jak i te występujące teoretycznie, można wymienić kilka cech wspólnych dla problemów dotyczących budowy i optymalizacji harmonogramów [149]:

1. operacje procesu technologicznego są wykonywane kolejno, zgodnie z przebiegiem procesu wytwórczego, nie równocześnie,
2. na stanowisku roboczym w danej chwili obrabiany jest jeden rodzaj wyrobu,

3. liczba operacji technologicznych jest różna i większa od liczby stanowisk roboczych; w rzeczywistych systemach produkcyjnych stanowiska robocze mają charakter wielofunkcyjny i można wykonywać na nich wiele operacji technologicznych,
4. stanowiska robocze mogą oczekiwać beczynnie na obróbkę kolejnych wyrobów lub mogą nie być wykorzystywane w danym procesie wytwórczym (tzw. stanowiska nadmiarowe),
5. wytwarzane elementy mogą oczekiwać na zwolnienie stanowiska roboczego w buforach międzyoperacyjnych (na tzw. polach odkładczych lub w buforach przystanowiskowych).

Należy podkreślić, że istnieje duża różnica pomiędzy badaniami nad harmonogramami produkcyjnymi w teorii i praktyce. Badania teoretyczne służą, jako pole testów dla różnych metod i algorytmów obliczeniowych i często z uwagi na liczne uproszczenia nie mają zastosowania w praktyce. Zazwyczaj służą do badań nad skalowalnością stosowanych metod rozwiązywania, gdyż można je porównać z innymi problemami o podobnej złożoności. Badania praktyczne uwzględniają natomiast więcej ograniczeń wynikających z fizycznych własności systemów produkcyjnych i ich specyfiki. Najczęściej są to problemy o charakterze unikalnym, mającym zastosowanie jedynie w badanym systemie produkcyjnym. Każdy system produkcyjny charakteryzuje się własną specyfiką i ograniczeniami powodującymi, że opracowane algorytmy czy modele, nie będą dla niego odpowiednie.

## 1.4 Kryteria jakości przy budowie harmonogramów

Budowa harmonogramu produkcji powinna rozwiązać 3 podstawowe problemy dotyczące realizacji produkcji: problem alokacji zasobów do realizacji zadań produkcyjnych, problem szeregowania zadań pod względem technologicznym i organizacyjnym oraz problem wyznaczenia potrzebnych terminów realizacji zadań. Problemy te powinny być rozwiązywane kompleksowo, uwzględniać związki i relacje występujące w procesie produkcyjnym, a także jego specyfikę i uwarunkowania.

Podstawowym elementem oceny jakości harmonogramu produkcji jest dobór odpowiedniego kryterium celu lub inaczej funkcji celu, będącej matematycznym zapisem kryterium optymalizacyjnego. Dobre kryterium oceny powinno być zgodne z celem przedsiębiorstwa, jego specyfiką i charakterystyką oraz powinno umożliwiać analizę porównawczą otrzymanych rezultatów [151]. Najczęściej w literaturze analizowane jest kryterium mini-

malizacji długości cyklu produkcyjnego, ponieważ długość cyklu świadczy z jednej strony o poziomie organizacyjnym w przedsiębiorstwie, a z drugiej jest dobrym odniesieniem podczas porównywania rezultatów działania algorytmów [81, 83, 110, 132, 152]. Jednak z punktu widzenia praktycznego dla przedsiębiorstw produkcyjnych najważniejsze mogą być inne kryteria. Literatura definiuje wiele kryteriów oceny harmonogramów produkcji, które można zgrupować w trzech podstawowych kategoriach [81, 132]:

1. Czasu wykonania zlecenia produkcyjnego. Do tej kategorii należeć będą wszystkie kryteria bazujące na terminach zakończenia. Przykładami kryterium celu mogą tutaj być: minimalizacja całkowitego czasu realizacji zlecenia produkcyjnego, minimalizacja średniego czasu produkcji dla wszystkich wyrobów w planie produkcji, utrzymanie stabilności planów produkcji, wyeliminowanie wąskich gardeł w procesie produkcji, utrzymanie założonego poziomu obsługi klientów.
2. Kosztu realizacji zlecenia produkcyjnego, do których należą kryteria odnoszące się do wielkości zapasów produkcyjnych, stopnia wykorzystania i obciążenia zasobów produkcyjnych oraz wynikających pośrednio z wielkości będących składową programu produkcji. Przykładowe kryteria funkcji celu to: najniższy całkowity koszt produkcji, minimalny koszt magazynowania zapasów, najwyższa efektywność wykorzystania zasobów produkcji i logistyki, równomierne obciążenie zasobów produkcyjnych i logistycznych.
3. Odporności harmonogramu na zakłócenia, co pozwala zachować stabilność systemu produkcyjnego. Kryterium to określa stopień niwelowania zakłóceń pojawiających się w trakcie przebiegu procesu produkcyjnego. Przykładowymi wskaźnikami mogą być suma buforów czasowych przed operacjami czy czas przestoju stanowisk roboczych.

Rozwój technologii informatycznych, systemów zarządzania i metod organizacji produkcji powoduje, że wszystkie te 3 kategorie są dla współczesnych przedsiębiorstw coraz łatwiejsze do kontrolowania i sterowania. Przy wykorzystaniu najnowszych technologii przedsiębiorstwa mogą coraz efektywniej wykorzystywać posiadane zasoby materialne. Jednak coraz większy wpływ na wyniki przedsiębiorstw mają zasoby ludzkie, których koszty pracy systematycznie rosną, a dostępność na rynku pracy maleje. Tendencje te są przeciwieństwem kosztów i dostępności technologii wytwórczych. Po wszechnie wiadomo, że umiejętne wykorzystanie potencjału pracowników wpływa na wydajność pracy i efektywność gospodarowania innymi zasobami produkcyjnymi. Dotyczy to pracowników na wszystkich stanowiskach i na wszystkich szczeblach zarządzania. Dlatego w dalszej części pracy, przy

budowie metodyki harmonogramowania produkcji skoncentrowano się na optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich.



## Rozdział 2

# Charakterystyka wybranych metod inteligentnych

Termin "Industry 4.0" jest obecnie szeroko używany. Po raz pierwszy został użyty podczas targów w Hanowerze "Hannover Messe" w 2011 roku i odnosił się do [1]:

- wykorzystania automatyzacji oraz przetwarzania i wymiany danych,
- wdrażania różnorodnych, nowych technologii pozwalających na zmianę sposobów wytwarzania,
- digitalizacji produkcji, gdzie urządzenia i systemy technologiczne są ze sobą skomunikowane oraz gdzie analizowane są duże liczby danych produkcyjnych.

Pojęcie to jest również związane z działalnością organizacji, zarządzaniem produkcją oraz łańcuchem tworzenia wartości. W szczególności następuje tutaj przechodzenie z procesów liniowych oraz tradycyjnej piramidy systemów zarządzania produkcją na sieć połączeń i produkcję nieliniową. Połączenie wcześniej wymienionych innowacji z nowymi możliwościami w zakresie sztucznej inteligencji może doprowadzić do rewolucyjnej zmiany sposobów zarządzania wytwarzaniem, gdzie systemy działać będą w sposób wysoce autonomiczny, dynamicznie zmieniając swoją strukturę i funkcje w obrębie organizacji.

Niezbędne jest przy tym wykorzystanie odpowiednio dobranych metod inteligentnych, pozwalających na zmianę paradygmatu wytwarzania, dając możliwość produkcji wysoce spersonalizowanej, elastycznej i jednocześnie efektywnej kosztowo. Przemysł 4.0 stanowi również element większego trendu, którym jest transformacja cyfrowa i obejmuje również szereg innych branż [1].

W pracach naukowych, w których omawiane są zagadnienia związane z optymalizacją, czyli wyznaczeniem najlepszego rozwiązania z punktu widzenia określonego kryterium [27], wielu autorów koncentruje się na zagadnieniach związanych z algorytmami heurystycznymi oraz metaheurystycznymi. W literaturze przedmiotu zaprezentowane zostały dwie różne koncepcje do definiowania pojęć: algorytm, heurystyka oraz metaheurystyka.

Pierwsza koncepcja została przedstawiona w 2007 przez Schneider'a oraz Kirkpatrick'a w książce "Stochastic optimization" [143], gdzie algorytmy definiowane są jako podejścia (*ang. approaches*) pozwalające na rozwiązanie problemu poprzez wyznaczenie globalnego rozwiązania oraz dostarczenie matematycznego dowodu na jego optymalność. Heurystyki natomiast określane są jako podejścia, umożliwiające znalezienie rozwiązania, które może być bliskie optymalnemu, jednak bez możliwości odniesienia go do rozwiązania optymalnego z uwagi na niemożność jego jednoznacznego wskazania. W literaturze spotkać można się również z innym stwierdzeniem, że każde podejście prowadzące do optymalnego lub dobrego rozwiązania danego problemu można określić algorytmem, natomiast zestaw algorytmów heurystycznych stanowi podzbiór zbioru wszystkich algorytmów optymalizacji [27, 143, 159]. Zestawienie obydwu podejść przedstawia tabela 2.1.

Pierwsze algorytmy w tym rozumieniu powstały już w starożytnej Grecji, np. algorytm Euklidesa znajdowania największego wspólnego dzielnika. O ile heurystyka jest metodą ogólną, służącą do rozwiązywania wielu problemów, o tyle przy stosowaniu metaheurystyki używana jest heurystyka do rozwiązania konkretnego problemu, który nie może zostać rozwiązany przy pomocy wyłącznie heurystyki [27, 143]. Zgodnie z literaturą przedmiotu metaheurystyka jest jedynie bazą potrzebującą ukrytej, prostej heurystyki, która umożliwi znalezienie dobrego rozwiązania z reguły lokalnie optymalnego. Bez względu na podejście, wszyscy zajmujący się tą tematyką autorzy są zgodni, że niemal każdy problem wymaga indywidualnego podejścia, a rozwiązanie unikalne i „zawsze właściwe” nie istnieje [143, 159].

Pomimo dynamicznego rozwoju metod inteligentnych w optymalizacji, istnieją liczne problemy optymalizacyjne, niemożliwe do rozwiązania w sposób matematyczny poprzez określenie funkcji celu i znalezienie rozwiązania optymalnego [27, 120]. Również metoda przeszukiwania zupełnego, polegająca na sprawdzeniu wszystkich możliwych rozwiązań, okazuje się być zbyt czasochłonna i przez to nieefektywna przy obecnych problemach [27].

Literatura przedmiotu wyróżnia problemy klasy P - posiadające wielomianową złożoność obliczeniową (*ang. polynomial*) oraz NP - nieposiadające wielomianowej złożoności obliczeniowej (*ang. nondeterministic polyno-*

Tabela 2.1: Podejścia w definiowaniu algorytmu, heurystyki oraz metaheurystyki

	<b>Algorytm</b>	<b>Heurystyka</b>	<b>Metaheurystyka</b>
<b>Podejście 1 [143]</b>	Zwraca globalnie optymalne rozwiązanie problemu, dostarcza matematyczny dowód, że rozwiązanie jest optymalne	Zwraca pewne rozwiązanie, nie może dostarczyć dowodu na to, że rozwiązanie jest optymalne	Rama, potrzebująca ukrytej, prostej heurystyki, która umożliwi zoptymalizowanie konkretnego zastosowania dla proponowanego problemu
<b>Podejście 2 [27, 143, 159]</b>	Każde podejście prowadzące do optymalnego bądź dobrego rozwiązania	Podzbiór wszystkich algorytmów, metoda ogólna do rozwiązania wielu problemów	Używa heurystyki do rozwiązania konkretnego problemu, który nie może zostać rozwiązany przy pomocy wyłącznie heurystyki

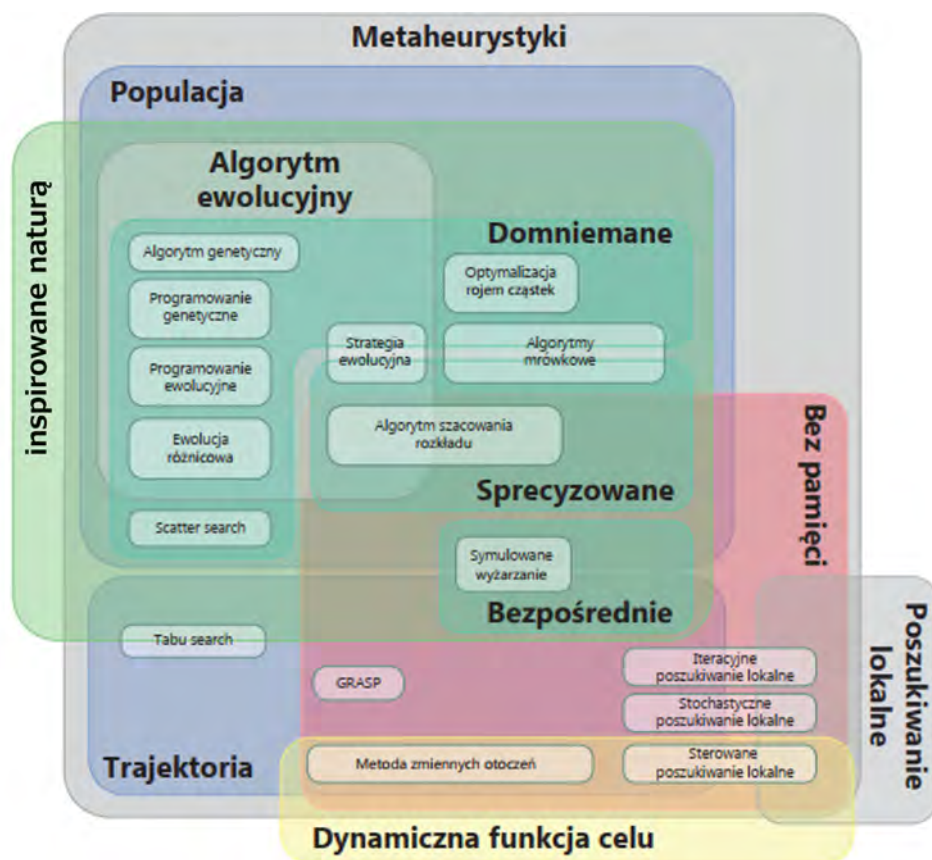
mial) [27]. W problemach klasy P znalezienie rozwiązania optymalnego ma złożoność wielomianową, natomiast problemy klasy NP charakteryzują się tym, że znalezienie rozwiązania ma złożoność ponad wielomianową. Ważną cechą zagadnień klasy NP jest to, że w praktyce wyklucza się stosowanie metod dokładnych dla problemów o rozmiarze spotykanym powszechnie w inżynierii produkcji [80, 138, 160].

W dalszej części pracy metoda inteligentna rozumiana jest jako sposób przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, mający na celu znalezienie najlepszego rozwiązania instancji problemu (niekoniecznie optymalnego) dla zadanej funkcji kryterialnej, spełniającego zadane ograniczenia w określonym czasie obliczeń [27, 143, 159]. W obszarze pojęcia metody inteligentnej zawierają się przytoczone wcześniej pojęcia algorytmu, heurystyki oraz metaheurystyki.

Metody inteligentne można sklasyfikować zgodnie z różnymi kryteriami podziału, a w literaturze przedmiotu najczęściej spotyka się porównanie kilku algorytmów w odniesieniu do rozwiązania konkretnego problemu. Beheshti oraz Shamsuddin w 2012 roku przedstawili rozbudowaną klasyfikację algorytmów inteligentnych (rysunek 2.1) pokazując, że dany algorytm może należeć do kilku grup algorytmów [17].

## 2.1 Przegląd wybranych metod inteligentnych

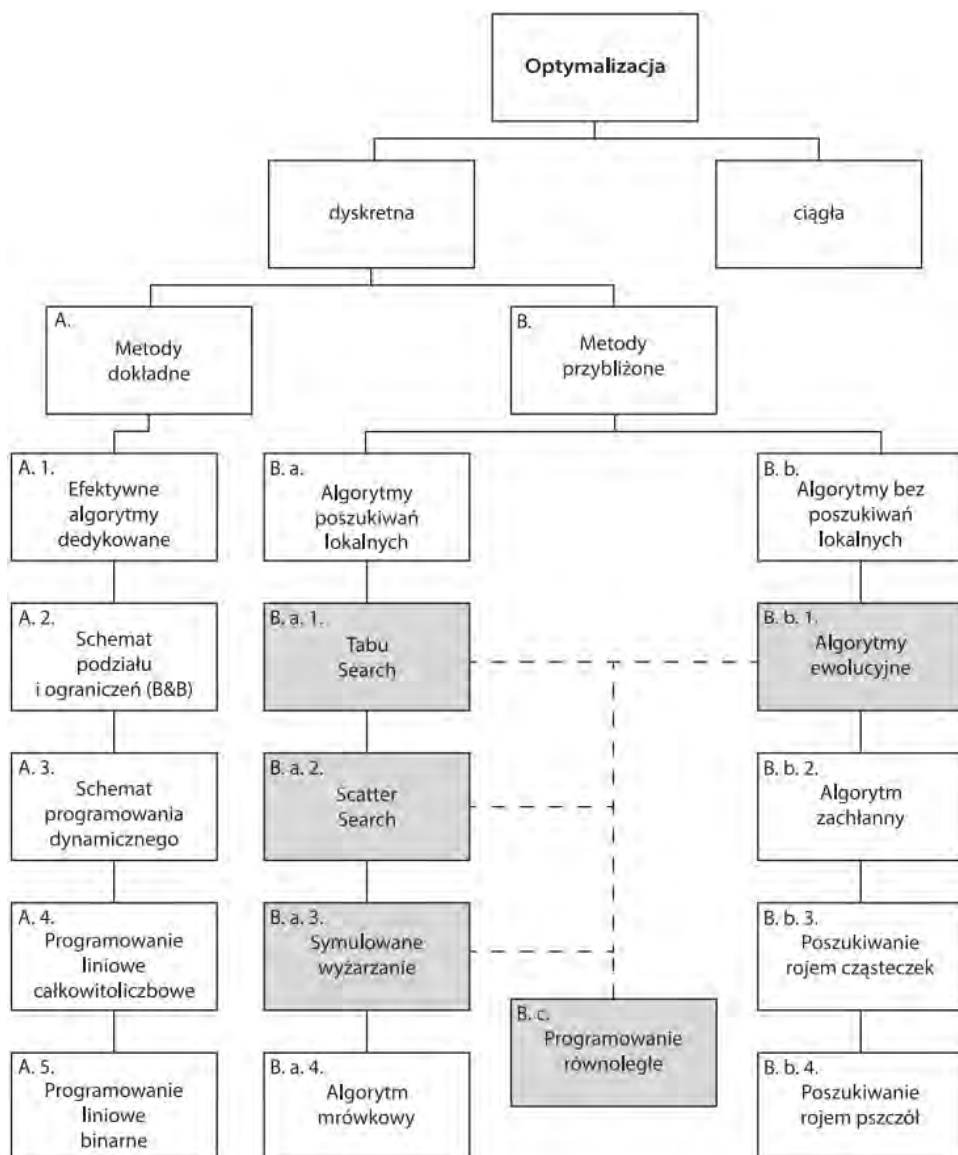
Z punktu widzenia wykorzystania metod inteligentnych w zagadnieniach harmonogramowania produkcji, można je podzielić na metody optymalizacji ciągłej, gdy parametry zmieniają się w sposób ciągły oraz metody opty-



Rysunek 2.1: Klasyfikacja metod inteligentnych według Beheshti i Shamsuddin [17]

malizacji dyskretnej, gdy mowa o wartościach dyskretnych. Zdecydowana większość problemów optymalizacyjnych oraz metod je rozwiązujących charakteryzuje się wartościami dyskretnymi, takimi jak liczba sztuk, kolejność operacji, długość drogi bądź czas (podany z zadaną dokładnością).

Na rysunku 2.2 przedstawiono proponowany podział metod inteligentnych optymalizacji dyskretnej, mających zastosowanie w problemach inżynierii produkcji. Zostały wyszczególnione aktualnie najszerszej stosowane algorytmy, zarówno dla metod dokładnych, jak i przybliżonych [27].



Rysunek 2.2: Klasyfikacja metod inteligentnych w optymalizacji produkcji [27]

Bazując na przyjętej klasyfikacji metod inteligentnych (rysunek 2.2), wybrane oraz opisane zostały najczęściej używane metody wraz z obszarami i typami problemów, w których są stosowane. Niektóre z metod zostały zilustrowane przykładami.

### 2.1.1 Metody dokładne

Metody dokładne pozwalają na jednoznaczne znalezienie optymalnego rozwiązania danego problemu. Są czasochłonne i pamięciochłonne, a rozmiar problemów, które można rozwiązać w akceptowalnym czasie jest zbyt mały, aby mogły być szeroko stosowane w rozwiązywaniu aktualnych problemów optymalizacyjnych. Koszt poszukiwania rozwiązania optymalnego jest zbyt duży w stosunku do zysku otrzymanego z wdrożenia otrzymanego rozwiązania. Istnieje jednak grupa problemów, dla których zastosowanie metod dokładnych jest uzasadnione. Są to problemy, dla których raz znalezione rozwiązanie jest wielokrotnie używane, co przekłada się na długotrwałe korzyści. Przykładem takiego problemu jest poszukiwanie minimalnego czasu cyklu dla powtarzalnego procesu produkcyjnego [27]. Zysk z ograniczenia czasu pojedynczego cyklu najczęściej jest niewielki, pomnożony jednak przez liczbę cykli wykonywanych miesięcznie, bądź rocznie, niesie za sobą wymierne oszczędności dla firmy.

### Efektywne algorytmy dedykowane

W celu rozwiązania wybranych problemów z P-klasy projektowane są algorytmy dedykowane dla danego problemu. Może istnieć kilka algorytmów dedykowanych, a za algorytm optymalny przyjmuje się ten o teoretycznie najmniejszej możliwej złożoności obliczeniowej [27]. Efektywność takiego algorytmu jest zwykle mierzona jako czas potrzebny do rozwiązania danego problemu [26]. Efektywne algorytmy dedykowane uważane są za metody "tanie obliczeniowo" [27]. Niemniej jednak, jeżeli stopień złożoności obliczeniowej wielomianu jest zbyt wysoki aby znaleźć rozwiązanie problemu w akceptowanym czasie, stosuje się algorytmy przybliżone, pozwalające na redukcję kosztu obliczeń.

Efektywne algorytmy dedykowane zaczęły powstawać wraz z rozwojem optymalizacji w latach 50tych XX w. Wykorzystywane są m. in. w zagadnieniach związanych z fizyczną komunikacją komputerową [114], jako uogólniona metoda rozkładu spektralnego do rozwiązania stochastycznego równania elementów skończonych [126] oraz w radiologii celem poprawy jakości zdjęć [5]. W inżynierii produkcji zdecydowana większość problemów opisywanych w literaturze należy do klasy NP i wymaga użycia bardziej zaawansowanych metod.

### Schemat podziału i ograniczeń Branch-and-Bound

Schemat B&B został zaproponowany przez A. H. Land oraz A. G. Doig w 1960 roku [101]. Zamiast definiowania konkretnego algorytmu, przed-

stawia on podejście do problemu optymalizacyjnego polegające na dekompozycji i „inteligentnym” przeszukiwaniu zbioru rozwiązań dopuszczalnych problemu optymalizacyjnego [27]. Pozwala ograniczyć liczbę sprawdzanych rozwiązań poprzez ominięcie tych grup, co do których wiadome jest, że żadne z nich nie będzie lepsze od najlepszego spośród obecnie znanych rozwiązań. W schemacie podziału i ograniczeń B&B dolne oszacowanie (*ang. lower bound*) wartości funkcji celu pozwala wydzielić grupy rozwiązań te, z których żadne nie będzie lepsze od aktualnie najlepszego, a branie ich pod uwagę w dalszych obliczeniach nie ma uzasadnienia.

Popularnym przykładem zastosowania B&B jest problem komiwojażera, w którym liczba rozwiązań rośnie wykładniczo w stosunku do liczby punktów (problem klasy NP). Dysponując przeciętną klasą komputerem oraz zakładając czas obliczeń nieprzekraczający jednego dnia, problem można rozwiązać poprzez sprawdzenie wszystkich możliwych rozwiązań dla zaledwie 12 punktów. Stosując schemat B&B istnieje możliwość rozwiązania problemu zawierającego nawet 80 punktów, co przekłada się na realny problem np. kuriera, który musi dostarczyć przesyłki w 80 różnych miejsc.

Istnieje wiele algorytmów opartych na tym schemacie. Może on być stosowany dla dowolnego problemu dyskretnego z liniową bądź nieliniową funkcją celu i takimi też ograniczeniami [27, 30]. Schemat B&B został zastosowany w 2016 roku do rozwiązania problemu poruszającego się sędziego (*ang. Traveling Umpire Problem – TUP*), w którym to sędziów przypisano do gier w turnieju tak, aby zminimalizować całkowity przebyty przez nich dystans, biorąc pod uwagę ograniczenia przypisania oraz sekwencje. W opisanym problemie podejście branch-and-bound, w którym to schemat podziału został połączony z wydajną techniką propagacji, jest w stanie rozwiązać instancję problemu dla 14. zespołów [158]. Dla problemu harmonogramowania hybrydowego dwu-etapowego no-wait flow-shop metoda B&B została z powodzeniem zastosowana dla 20. zleceń (*ang. jobs*) [165]. W problemie pakowania palet (*ang. Pallet-Loading Problem – PLP*) zastosowanie omawianego podejścia konstrukcji algorytmów pozwoliło na rozwiązanie nierozwiązanych dotychczas instancji problemu, w szczególności dla 3 milionów instancji problemu większość rozwiązań otrzymano w czasie poniżej sekundy [4].

Problem formowania komórek (*ang. Cell Formation Problem – CFP*) jest ważnym problemem optymalizacyjnym w produkcji polegającym na grupowaniu maszyn oraz części produkowanych w komórkach produkcyjnych (*ang. production cells*), minimalizując transport części do innych komórek oraz maksymalizując wykorzystanie (*ang. loading*) maszyn wewnątrz każdej komórki. Wykazano, że dzięki zastosowaniu algorytmu opartego na

metodzie B&B, można zredukować system posiadający 24 komórki do maksymalnie 14 komórek [161]. Podejście B&B zostało również wykorzystane dla rozwiązywania problemów cięcia i pakowania części o nieregularnych kształtach (*ang. Nesting Problems*), problemów popularnych w branżach odzieżowej, podłogowej, meblarskiej, czy budowy statków – tam, gdzie unikanie strat w materiale jest niezwykle istotne. Zaproponowany algorytm jest w stanie rozwiązać problem zawierający 16 elementów [30].

## Schemat programowania dynamicznego

Twórcą programowania dynamicznego był amerykański matematyk Richard Ernest Bellman (1957) [18]. Programowanie dynamiczne jest ogólną techniką, polegającą na przekształceniu zadania optymalizacji w wieloetapowy proces podejmowania decyzji, w którym stan w każdym z etapów zależy od decyzji wybieranej ze zbioru decyzji dopuszczalnych [18]. Innymi słowy, polega on na podziale danego problemu na podproblemy, które nie są rozłączne (jak ma to miejsce w przypadku techniki „dziel i zwyciężaj”). Zaprojektowanie algorytmu polega na znalezieniu równania rekurencyjnego, opisującego wartość funkcji celu dla danego problemu, jako funkcji optymalnych wartości funkcji celu dla problemów o mniejszych rozmiarach [13, 132]. Schemat programowania dynamicznego wykorzystywany jest do rozwiązywania różnych problemów dyskretnych, m.in. w zagadnieniu najdłuższej drogi w grafie, problemach załadunku, problemach szeregowania, problemie komiwojażera (*ang. Traveling Salesman Problem - TSP*) [27] czy też problemach zamawiania sekwencyjnego (*ang. Sequential Ordering Problem - SOP*) [141].

## Programowanie liniowe całkowitoliczbowe

Programowanie całkowitoliczbowe zostało zaproponowane w 1958 roku przez Ralph E [68]. Jest szeroko stosowane w problemach, w których wszystkie warunki oraz funkcja celu mają postać liniową oraz składowe przyjmują wartości całkowite.

Przykładami zastosowania programowania liniowego całkowitoliczbowego w inżynierii produkcji są problemy transportowe [73], zagadnienia popytu i podaży [49], problemy przechowywania zapasów [112] oraz dystrybucji i zarządzania energią [78].

## Programowanie liniowe binarne

Programowanie liniowe binarne jest podtypem programowania liniowego całkowitoliczbowego, w którym składowe nie przyjmują wartości całkowi-



tych, a binarne - 0 lub 1. Jako sposoby na rozwiązanie problemu znane są: Algorytm Balasa (w oparciu o schemat B&B) oraz metody subgradientowe [27, 47].

Programowanie liniowe binarne wykorzystywane jest m. in. w medycynie – w celu przewidywania efektu podania leku [77], czy też w inżynierii produkcji, w celu zaprojektowania linii produktów przy pomocy analizy TURF (*ang. Total Unduplicated Reach and Frequency*) [144].

### 2.1.2 Metody przybliżone

Metody przybliżone są szeroko stosowane w przypadkach, w których nie ma możliwości efektywnego zastosowania metody dokładnej, a rozwiązanie zaproponowane przez algorytm przybliżony jest na tyle bliskie optymalnemu, że jest satysfakcjonujące z punktu widzenia zadanych kryteriów. Dla danego problemu może istnieć wiele metod jego rozwiązania o różnych cechach numerycznych, takich jak złożoność obliczeniowa, dokładność przybliżenia, gwarancja zbieżności do rozwiązania optymalnego czy szybkość tej zbieżności [27].

### Algorytmy poszukiwań lokalnych

Algorytmy oparte na metodzie przeszukiwań zstępujących bazują na analizie rozwiązań (wszystkich bądź wybranych), leżących w bliskim otoczeniu wybranego rozwiązania. Spośród analizowanych rozwiązań zostaje wybrane takie, które staje się kolejnym źródłem lokalnych poszukiwań, co umożliwia powtórzenie tego procesu. Poszukiwania lokalne nazywane są metodami poprawy (*ang. improvement methods*) lub metodami iteracyjnymi (*ang. iterative methods*). Wyróżnia się co najmniej dwie strategie poszukiwania: do pierwszej poprawy oraz do najlepszej poprawy. Obie strategie polegają na przeszukiwaniu rozwiązań w pobliskim otoczeniu, jednakże strategia „do najlepszej poprawy” sprawdza wszystkie rozwiązania sąsiednie i wybiera najlepsze, które staje się rozwiązaniem bazowym w kolejnej iteracji, a strategia „do pierwszej poprawy” po znalezieniu pierwszego rozwiązania, lepszego od bazowego, traktuje je jako bazowe do kolejnej iteracji. Obie metody różnią się kosztem obliczeniowym oraz zbieżnością. Strategia „do najlepszej poprawy” wykonuje więcej obliczeń, przez co proces obliczeniowy trwa dłużej, generuje za to lepsze rozwiązania końcowe [27].

### Tabu Search

Algorytm Tabu Search (*TS*), znany również jako „poszukiwanie z zabrońieniami”, został zaproponowany przez F. Glovera w 1986 roku [64] i sfor-

malizowany w 1989 [65]. Odzworowuje naturalny proces poszukiwań wykonywany przez człowieka – rozpoczyna swoje działanie od losowego bądź zdefiniowanego rozwiązania, następnie sprawdza wszystkie rozwiązania sąsiednie (strategia najlepszej poprawy), po czym wybiera najlepsze z nich i rozpoczynając od niego, ponawia procedurę. Aby uniknąć zatrzymania się w lokalnym optimum oraz wejścia w cykl, algorytm posiada listę zawierającą informacje dotyczące rozwiązań i/lub ruchów wykonanych w poprzednich iteracjach tzw. listę taboo [120]. Na podstawie zawartości listy zbiór wszystkich rozwiązań sąsiednich dzielony jest na dwa podzbiory: rozwiązania zabronione i niezabronione. Ze zbioru rozwiązań niezabronionych wybierane jest rozwiązanie, które staje się źródłem przeszukiwań w kolejnej iteracji. Działanie algorytmu kończy się po wykonaniu określonej liczby iteracji bądź wraz ze spełnieniem innego warunku, zadanego przez użytkownika, np. po 10 iteracjach bez poprawy.

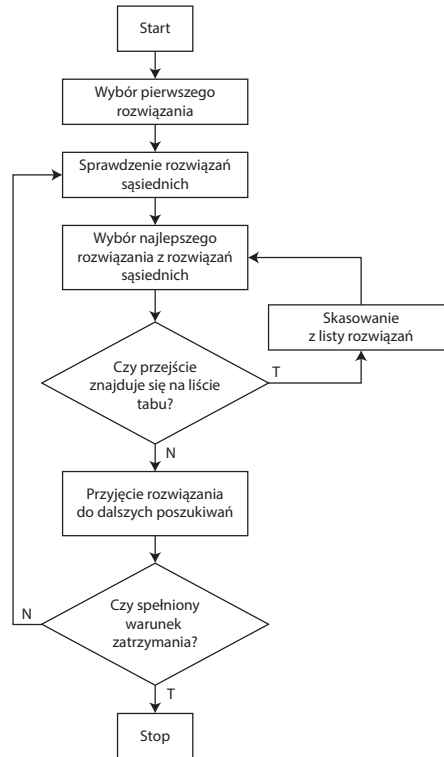
Schematyczny sposób działania algorytmu Tabu Search przedstawiono na rysunku 2.3. Algorytm rozpoczyna działanie od zadanego lub wygenerowanego szybką heurystyką rozwiązania początkowego  $\pi$  i zwraca najlepsze rozwiązanie znalezione podczas jego działania  $\pi^*$ .

Algorytm Tabu Search, dzięki swojej prostej implementacji oraz skuteczności, jest szeroko wykorzystywany w wielu obszarach, m. in. w problemach związanych z ustalaniem tras pojazdów [144], w tym w transporcie pacjentów pomiędzy placówkami medycznymi [88] bądź w zagadnieniach uwzględniających złożone zależności czasowe czy okna czasowe [124]. Wiele prac wskazuje również na użyteczność algorytmu w organizacji produkcji, np. w problemach logistycznych z załadunkiem i pakowaniem wyrobów [60], problemach związanych z realizacją partii zamówień [12], zagadnieniach umiejscowienia jednostek i wykorzystania layout'ów [160] oraz problemach harmonogramowania [115, 175].

Algorytm Tabu Search znajduje swoje zastosowanie wszędzie tam, gdzie problem jest możliwy do przedstawienia w formie ciągu binarnego [118, 121] bądź w formie kolejności wykonywanych czynności, jak ma to miejsce w zagadnieniach harmonogramowania produkcji. Więcej szczegółów dotyczących algorytmu opartego na metodzie Tabu Search znajduje się w rozdziale 5.

## Scatter Search

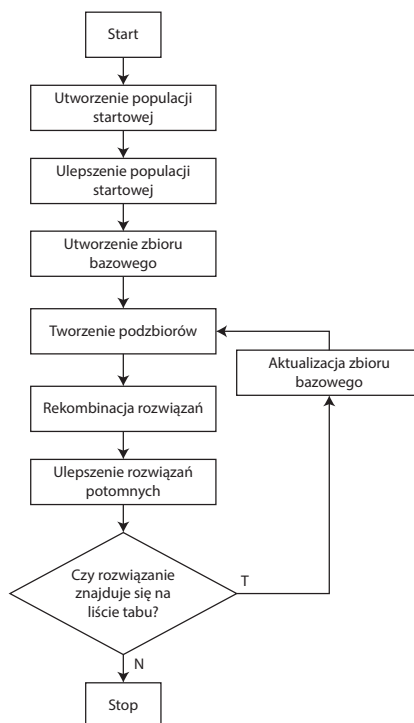
Scatter Search (*SS*) znany również pod nazwą "poszukiwanie rozproszone" opracowany został przez F.Glovera w 1977 [63]. Autor określił algorytm jako "algorytm ewolucyjny, który buduje nowe rozwiązania poprzez mieszanie innych" [63, 66]. Schemat funkcjonowania algorytmu Scatter Search został przedstawiony na rysunku 2.4.



Rysunek 2.3: Schemat działania algorytmu Tabu Search

Algorytm ten jest zaliczany do obszaru algorytmów ewolucyjnych i używany zarówno do problemów optymalizacyjnych ciągłych, jak i dyskretnych [56, 122]. Działanie algorytmu polega na utworzeniu niewielkiego zbioru bazowego (*ang. reference set*), złożonego z możliwie dobrych i zróżnicowanych rozwiązań, a następnie doskonaleniu ich poprzez rekombinację oraz optymalizację metodami lokalnymi. Zbiór bazowy jest aktualizowany w kolejnych iteracjach. Algorytm kończy pracę po spełnieniu określonego kryterium zatrzymania [98].

Scatter Search wykorzystywany jest w zaawansowanych problemach selekcji i nieliniowej wielokryterialnej optymalizacji [16] oraz w zagadnieniach produkcyjnych typu flow-shop [122, 127, 136]. Jest również z powodzeniem wykorzystywany do ustalania tras przejazdu pojazdów [170] oraz zadań wynajmu danych zasobów [162].



Rysunek 2.4: Schemat funkcjonowania algorytmu Scatter Search

### Symulowane wyzarczenie

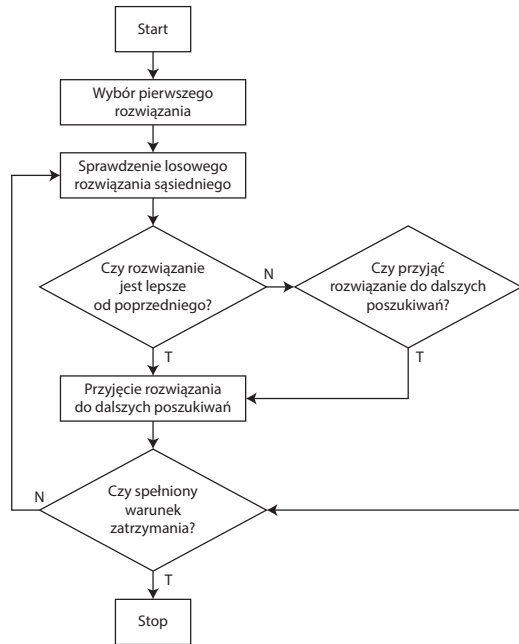
Algorytm rozpoczyna działanie z pewnego (losowego bądź zdefiniowanego) rozwiązania oraz sprawdza tylko jedno - losowo wybrane - rozwiązanie sąsiednie. Jeśli sprawdzone rozwiązanie jest lepsze od aktualnego, algorytm przechodzi do niego, jeśli nie – algorytm przechodzi do niego z zadanyim prawdopodobieństwem, w związku z czym dopuszcza przejście do rozwiązania gorszego i od niego kontynuowane są poszukiwania w kolejnej iteracji algorytmu. Prawdopodobieństwo akceptacji rozwiązania gorszego zależy od różnicy wartości funkcji celu rozwiązania sprawdzanego i bieżącego oraz od bieżącej temperatury i wyraża się wzorem

$$p = \exp(-\Delta/T), \quad (2.1)$$

gdzie  $\Delta$  - różnica wartości funkcji celu rozwiązania sprawdzanego i bieżącego,  $T$  bieżąca temperatura.

Temperatura w każdej iteracji zmniejsza się, ograniczając tym samym

prawdopodobieństwo akceptacji rozwiązań gorszych. Na rysunku 2.5 przedstawiony został schemat funkcjonowania algorytmu symulowanego wyżarzania.



Rysunek 2.5: Schemat działania algorytmu symulowanego wyżarzania

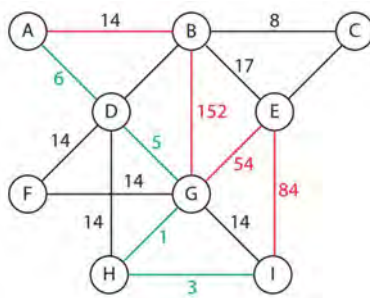
Symulowane wyżarzanie znalazło zastosowanie w szeroko rozumianych zagadnieniach optymalizacyjnych [8] w wytwarzaniu wyrobów: problemy przepływowe [57], problemy gniazdowe [28], problemy przydziału [139], problemy związane z ustalaniem tras pojazdów [34], z układem danych obiektów (*ang. Facility Layout Problem – FLP*) [39, 95, 113] czy też z minimalizacją czasu cyklu [137].

### Algorytm mrówkowy

Algorytm mrówkowy (*ang. Ant Colony Optimization – ACO*) został opracowany przez Mandericka oraz Maysona w 1988 roku [111]. Nawiązuje do „inteligentnego” zachowania kolonii „nieinteligentnych” lecz współpracujących osobników, analogicznie do społeczności mrówek [27, 50, 51]. Metoda ta powstała na bazie odkrycia znaczenia tzw. ścieżki feromonowej w poszukiwaniu przez mrówkę najkrótszej ścieżki prowadzącej z mrowiska do źródła

pożywienia i z powrotem. Każda mrówka porusza się w sposób losowy, pozostawiając za sobą ślad feromonowy, który z czasem paruje, a więc traci na intensywności. Gdy mrówka natrafi na ścieżkę feromonową innej mrówki, podąża nią z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do intensywności feromonu oraz znaczy ścieżkę własnym, co zwiększa intensywność śladu feromonowego. W praktyce, jeśli 2 mrówki wrócą z pożywieniem, a ślad feromonowy pierwszej z nich będzie mocniejszy, oznacza to, że mrówka ta szybciej znalazła pożywienie, czyli pożywienie znajdowało się bliżej bądź mrówka wybrała krótszą ścieżkę. Kolejne mrówki z większym prawdopodobieństwem wybiorą tę właśnie trasę.

Algorytm mrówkowy może być z powodzeniem używany tam, gdzie problem można przedstawić w postaci grafu z węzłami i połączeniami między nimi, a poszczególne rozwiązania, jako zbiór połączeń między węzłami.



Rysunek 2.6: Przykładowa reprezentacja problemu dla algorytmu mrówkowego

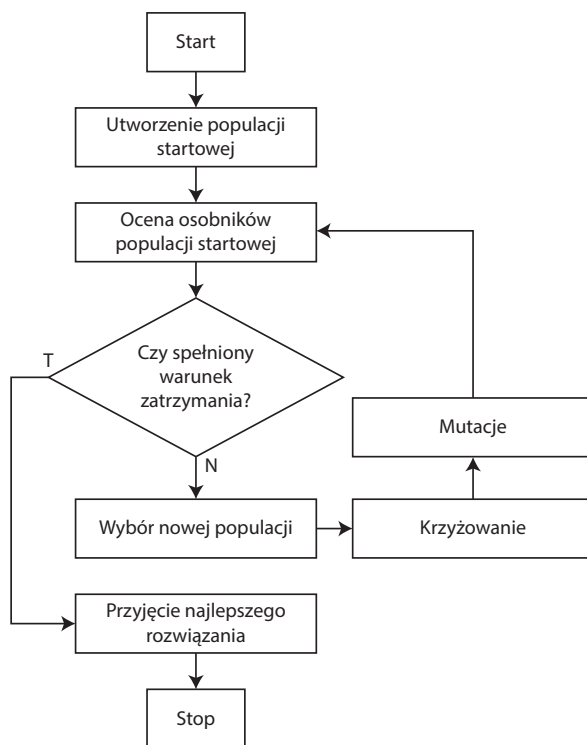
Na rysunku 2.6 przedstawiono model problemu wyboru najkrótszej ścieżki w grafie, dla którego z powodzeniem można zastosować optymalizację algorytmem mrówkowym. Literatura wskazuje na szerokie zastosowanie algorytmu mrówkowego w problemach wyboru tras pojazdów (*ang. Vehicle routing problem - VRP*) [46, 104], zarządzaniu łańcuchem dostaw [164] oraz szeroko rozumianych zagadnieniach harmonogramowania [38, 91, 108].

## Algorytmy bez poszukiwań lokalnych

Algorytmy niewykorzystujące mechanizmu poszukiwań lokalnych bazują na innych technikach znajdowania i udoskonalania rozwiązań, np. na łączeniu (krzyżowaniu) wcześniej znalezionych rozwiązań.

## Algorytmy ewolucyjne

Początki algorytmów ewolucyjnych to koniec lat 50. ubiegłego wieku (Bremerman, Box, Friedberg) [23, 59]. W 1975 roku Holland [72] nadał kierunek rozwojowi obliczeń ewolucyjnych. Poszukiwanie ewolucyjne (*ang. Genetic Search - GS*) zakłada, że niejawnym celem ewolucji jest optymalizacja dopasowania osobników do środowiska, zaś przekazywanie cech pomiędzy pokoleniami odbywa się zgodnie z teorią ewolucji Darwina [27, 35]. Na rysunku 2.7 został przedstawiony schemat funkcjonowania algorytmu ewolucyjnego.



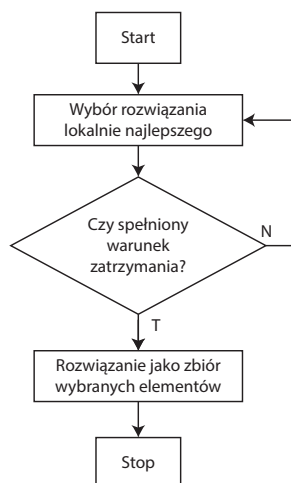
Rysunek 2.7: Ogólny schemat działania algorytmu ewolucyjnego

Rozpoczyna on swoje działanie nie od pojedynczego rozwiązania, a od wybranej populacji, tj. grupy rozwiązań. Do wygenerowania kolejnych rozwiązań (kolejnej populacji) algorytm wykorzystuje krzyżowanie oraz mutację (wprowadzenie pewnej losowej zmiany). Dzięki krzyżowaniu algorytm znajduje coraz lepsze rozwiązania, mutacje natomiast gwarantują różnorodność rozwiązań i zapobiegają zbieżności do lokalnego optimum [35, 94].

Algorytm ewolucyjny, dzięki swojej uniwersalnej postaci, znalazł szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach. Jest jednym z głównych algorytmów dla zadań harmonogramowania [45, 172, 174], używany jest również w zadaniach transportowych [35, 171] oraz zagadnieniach związanych z układem obiektów, w tym przy projektowaniu layout'ów [52, 69, 128]. Poza organizacją produkcji został on wykorzystany m. in. do optymalizacji zbiorników ciśnieniowych [9], modelowania warstw dyfuzyjnych gazu [48], optymalizacji pełnowymiarowej powierzchniowej energii potencjalnej dla atomu wodoru [84] czy optymalizacji umiejscowienia turbin wiatrowych [2].

### Algorytm zachłanny

Algorytm zachłanny (*ang. Greedy*) został opracowany w 1952 roku przez Davida Huffmana [75]. Jest to prosty algorytm podejmujący decyzje lokalnie optymalne bez przewidywania skutków decyzji w kolejnych krokach [93]. Na rysunku 2.8 przedstawiono schemat jego działania.



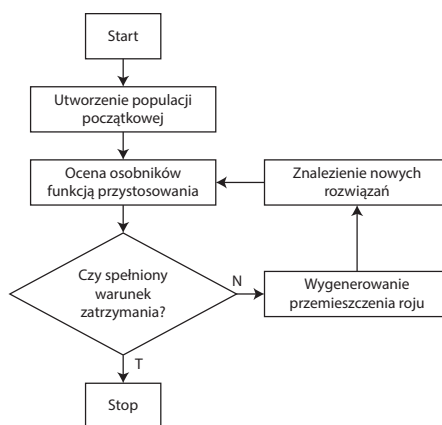
Rysunek 2.8: Schemat działania algorytmu zachłannego

Algorytm zachłanny ze względu na szybkość działania oraz prostotę implementacji jest stosowany w zagadnieniach harmonogramowania [131, 157] oraz zagadnieniach transportowych [107]. Rozwiązanie wygenerowane przez algorytm zachłanny może okazać się wystarczające dla potrzeb danego problemu, jednak w porównaniach z innymi algorytmami często okazuje się on być mniej efektywny [99, 119, 121].



## Poszukiwanie rojem cząstek

Poszukiwanie rojem cząstek (*ang. Particle Swarm Optimization - PSO*) zostało zaprezentowane w 1995 roku przez Kennediego [87]. Jest to algorytm inspirowany ruchem roju, analogicznie do stada ryb bądź ptaków. Idea algorytmu to iteracyjne przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań problemu przy pomocy roju cząstek. Każda z cząstek posiada określoną pozycję w przestrzeni rozwiązań, prędkość oraz kierunek, w jakim się porusza. Zapamiętywane jest najlepsze rozwiązanie znalezione przez każdą z cząstek (rozwiązanie lokalne), a także najlepsze rozwiązanie z całego roju (rozwiązanie globalne) [27, 43, 90]. Na rysunku 2.9 przedstawiono schemat działania algorytmu przeszukiwanie rojem cząstek.



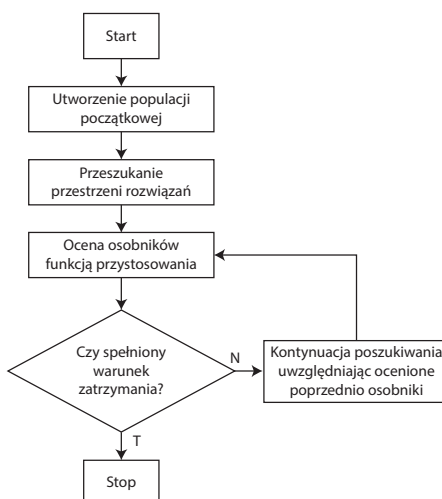
Rysunek 2.9: Schemat działania algorytmu przeszukiwanie rojem cząstek

Przeszukiwanie rojem cząstek wykorzystywane jest w złożonych problemach w wielu obszarach, m. in. w analizie i prognozowaniu emisji CO<sub>2</sub> [155], analizie złożonych widm promieniowania gamma [145], naprawie niespójności projektowych klas [61], wykrywaniu internetowych botów [7], precyzyjnych, trójwymiarowych systemach pozycjonowania [36] czy też poprawie zasięgu WiFi poprzez pozycjonowanie nadajnika [41].

Jest również używany w zaawansowanych problemach produkcji i harmonogramowania, np. w harmonogramowaniu pracy nieidentycznych maszyn do równoległego przetwarzania [76], równoległym planowaniu zadań tekstowych z ograniczeniami [109] oraz zagadnieniach job shop [125, 146].

## Poszukiwanie rojem pszczół

Poszukiwanie rojem pszczół (*ang. Artificial Bee Swarm - ABS*) zostało zaproponowane przez Karnaboga w 2005 roku [85]. Jest to algorytm przeszukiwania sąsiedztwa połączony z poszukiwaniem losowym, wykorzystującym uczenie się podobne do funkcjonowania roju pszczół. W naturze każda pszczoła przemieszcza się losowo, a jej efektywność oceniana jest w oparciu zebrany nektar. Najlepiej ocenione osobniki informują pozostałych o najlepszych regionach poszukiwań i kolejnym razem pszczoły rozpoczynają poszukiwania w oparciu o nowo otrzymaną informację [27]. Na rysunku 2.10 przedstawiono schemat działania algorytmu przeszukiwanie rojem pszczół.



Rysunek 2.10: Schemat działania algorytmu przeszukiwanie rojem pszczół

Optymalizacja rojem pszczół, podobnie jak optymalizacja rojem cząstek, wykorzystywana jest w wielu dziedzinach nauki, np. w optymalizacji funkcji numerycznych [6, 86] czy też identyfikacji parametrów modeli ogniów słonecznych [14].

W praktyce przemysłowej algorytm został wykorzystany m. in. do optymalizacji układu placu budowy [103], optymalizacji niestandardowych procesów obróbki [142], problemu komiwojażera [166], problemu obróbki w gniazdach produkcyjnych [168] czy też do rozwiązania problemu budowy i optymalizacji rozkładu jazdy pociągów [67].

## 2.2 Programowanie równoległe

Wraz z rozwojem metod optymalizacji oraz złożoności problemów optymalizacyjnych, popularne stało się programowanie równoległe polegające na prowadzeniu wielu obliczeń równocześnie przy użyciu wielu procesorów.

Pod koniec lat 70. nowością w dziedzinie optymalizacji była, opisana w podrozdziale 2.1.1, metoda podziału i ograniczeń (B&B), pozwalająca znacznie skrócić czas obliczeń bądź rozwiązać większy problem w akceptualnym czasie (np. dla problemu jednomaszynowego rozmiar ten zwiększył się z 20 zadań do 40–50). Szybko jednak okazało się to niewystarczające z powodu rosnącego poziomu skomplikowania problemów optymalizacyjnych. W latach 70.-80. XX w. nastąpił przełom, polegający na pojawieniu się zaawansowanych metod metaheurystycznych – symulowanego wyżarzania, algorytmów ewolucyjnych oraz Tabu Search. Metody te osiągnęły kres swoich możliwości na początku XXI w.

Od lat 80. rozwijały się heurystyki wielowątkowe, pozwalające m. in. prowadzić równoległe obliczenia najbardziej czasochłonnych elementów algorytmów. Kolejny przełom nastąpił, gdy producenci sprzętu komputerowego zaczęli produkować konstrukcje wielordzeniowe – idealnie pasujące do obliczeń równoległych. Obecnie popularne procesory posiadają od 4 do 8 rdzeni, a procesory GPU (*ang. Graphic Processing Unit*) posiadają ich nawet tysiące.

Aby efektywnie wykorzystać większą liczbę rdzeni wymagane jest odpowiednie dostosowanie algorytmów [27]. Algorytmy genetyczny oraz Tabu Search w każdej iteracji sprawdzają wiele rozwiązań (funkcji celu). Obliczenia te mogą być wykonywane równoległe przez poszczególne rdzenie procesora. Inną metodą wykorzystania obliczeń równoległych jest uruchomienie kilku instancji tego samego algorytmu, zadając im inne rozwiązanie początkowe (inne miejsce startu) bądź inne parametry poszukiwań.

## 2.3 Porównanie opisanych algorytmów

Zastosowanie metod przybliżonych nie gwarantuje znalezienia rozwiązania optymalnego danego problemu – użytkownik nie otrzymuje nawet informacji o tym, czy dane rozwiązanie jest optymalne, bądź jak dalekie jest od niego. Dlatego też bardzo często do danego problemu można znaleźć kilka algorytmów mogących potencjalnie stanowić jego rozwiązanie, przy czym jakość otrzymanego rozwiązania może się znacznie różnić w zależności od wybranej metody i dobranych parametrów. W wielu publikacjach omawiane jest rozwiązywanie danego problemu kilkoma metodami i porównanie rozwią-

zań [9, 93, 95, 99, 100, 109, 117, 118, 119, 120, 121, 138, 139, 140, 176].

W tabeli 2.2, na potrzebę realizacji celu pracy, zestawiono opisane w tym rozdziale metody wraz z przykładami zastosowań w przedsiębiorstwach produkcyjnych oraz oceniono je w zakresie ich:

- wykorzystania - oceny liczby publikacji z dziedziny inżynierii produkcji przedstawiających rozwiązanie danego problemu z wykorzystaniem danego algorytmu,
- możliwości zastosowania - oceny szerokości spektrum zastosowań danego algorytmu w inżynierii produkcji,
- dokładności wyniku - oceny jakości rozwiązań dostarczonych przez dany algorytm dla problemów z analizy literaturowej,
- trudności implementacji.

Porównanie oparto o analizę literaturową, studium przypadków oraz analizę implementacji danych algorytmów. W każdej kategorii została użyta 3-stopniowa skala: niska, średnia, duża. Kryteria zostały dobrane tak, aby uchwycić i porównać aspekty ważne z punktu widzenia tematu i celu pracy.

Tabela 2.2: Podsumowanie wybranych algorytmów w inżynierii produkcji

Nazwa algorytmu	Przykłady użycia w problemach inżynierii produkcji	Wykorzystanie w stanie	Możliwość zastosowania	Dokładność wyników	Trudność implementacji
Efektywne algorytmy dedykowane (lata 50te XX w.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Algorytm odpowiedni dla problemów P-klasy.</li> <li>Rzadko używany z racji tego, iż większość problemów to problemy klasy NP</li> </ul>	małe	mała	duża	średnia
Branch-and-Bound (1960)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- problem harmonogramowania hybrydowego dwu-etapowego no-wait flow shop[165]</li> <li>- problem komiwojażera[27]</li> <li>- problem pakowania palet[4]</li> <li>- problem formowania komórek (grup. maszyn) [161]</li> <li>- problem cięcia i pakowania części o nieregularnych kształtach[30]</li> </ul>	małe	duża	duża	mała
Programowanie dynamiczne (1957)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zagadnienie najdłuższej drogi w grafie</li> <li>- problemy załadunku</li> <li>- problemy szeregowania zadań</li> <li>- problemy komiwojażera</li> </ul>	małe	średnia	duża	mała
Programowanie liniowe całkowitoliczbowe (1958)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- problemy transportowe[73]</li> <li>- problemy przechowywania zapasów[112]</li> <li>- problemy dystrybucji i zarządzania energią[78]</li> </ul>	średnie	średnia	duża	mała
Programowanie liniowe binarne (1958)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zaprojektowanie linii produktów przy pomocy analizy TURF[144]</li> <li>- problem komiwojażera[144]</li> </ul>	małe	mała	duża	mała
Tabu search (1986)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zagadnienia uwzględniających zależności czasowe[124]</li> <li>- problemy logistyczne z załadunkiem i pakowaniem wyrobów[60, 132]</li> <li>- problemy związane z realizacją partii zamówień[12]</li> <li>- zagadnienia umiejscowienia jednostek i wykorzystania layout'ów [76, 160]</li> <li>- problemy harmonogramowania[78, 175, 115]</li> </ul>	duże	duża	duża	mała
Symulowane wyżarzanie (1983)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- problem harmonogramowania flow shop oraz job shop[57, 28]</li> <li>- problemy przydziału[139]</li> <li>- problemy związane z ustalaniem tras pojazdów [34]</li> <li>- problemy układu danych obiektów[39, 95, 113]</li> <li>- problemy minimalizacji czasu cyklu[137]</li> </ul>	duże	duża	średnia	średnia

Tabela 2.3: Podsumowanie wybranych algorytmów w inżynierii produkcji - cd

Nazwa algorytmu	Przykłady użycia w problemach inżynierii produkcji	Wykorzystanie	Możliwość zastosowania	Dokładność wyników	Trudność implementacji
Algorytm mrówkowy (1988)	- problemy wyboru tras pojazdów[46, 104] - zarządzanie łańcuchem dostaw[164] - zagadnienia harmonogramowania[38, 91, 108]	duże	średnia	średnia	duża
Algorytm ewolucyjny (1958)	- zadania transportowe[35, 171] - zagadnienia związane z układem obiektów[52, 69, 128] - szeroko rozumiane zagadnienia harmonogramowania[172, 174]	duże	duża	duża	duża
Algorytm zachłanny (1952)	- zagadnienia harmonogramowania[131, 157] - zagadnienia transportowe[107]	średnia	małe	mała	mała
Poszukiwanie rojem cząstek (1995)	- problemy harmonogramowania pracy nieidentycznych maszyn do równoległego przetwarzania[76] - problemy równoległego planowania zadań tekstowych z ograniczeniami[109] - zagadnienia job shop[125, 146]	duże	średnia	średnia	duża
Poszukiwanie rojem pszczoł (2005)	- problemy komiwojagera[166] - problemy job-shop[168]	duże	średnia	duża	duża

**Legenda:**

- **Wykorzystanie** - (duże, średnie, małe) - na bazie liczby artykułów w bazach Web of Science oraz Scopus, wykorzystujących dany algorytm w zagadnieniu optymalizacji produkcji.
- **Możliwość zastosowania do różnych problemów** - (duża, średnia, mała) - na bazie różnorodności problemów, w których dany algorytm został zastosowany.
- **Dokładność wyniku** - (duża, średnia, mała) - na bazie publikacji naukowych, pochodzących z bazy Web of Science, porównujących dany algorytm z innymi.
- **Trudność implementacji** - (duża, średnia, mała) - na bazie własnej wiedzy i doświadczeń.

Na podstawie analizy tabeli 2.2 i przytoczonych publikacji można stwierdzić, że metodami wiodącymi w zagadnieniach harmonogramowania produkcji są algorytmy ewolucyjne oraz algorytm Tabu Search, na których bazie projektowane są metaheurystyki dla danych problemów.

Algorytmy ewolucyjne dzięki swojej uniwersalnej budowie z powodzeniem wykorzystywane są w specyficznych problemach harmonogramowania [45, 172, 174] oraz w problemach pokrewnych [24, 35, 52, 69, 128, 171].

Z kolei zasada działania algorytmu Tabu Search sprawia, że sprawdza się on w rozwiązywaniu problemów harmonogramowania [78, 115, 175] oraz logistycznych [12, 24, 60, 76, 132, 160] i jest przy tym bardzo prosty w implementacji. Algorytmy symulowanego wyżarzania, Scatter Search, zachłanny oraz pszczele również są brane pod uwagę przy rozwiązywaniu problemów harmonogramowania produkcji jednak nie są aż tak popularne, co pokazuje przegląd literaturowy.

## Rozdział 3

# Cel, teza i przyjęte zadania badawcze

Z punktu widzenia zarządzania, efektywność systemów produkcyjnych zależy nie tylko od posiadania zaawansowanych technologii, ale w dużej mierze również od właściwej organizacji pracy i od efektywnego wykorzystania posiadanych zasobów produkcyjnych. Ponieważ postęp technologiczny w ostatnim czasie bardzo zwiększył dostęp do nowoczesnych technologii, w tym informatycznych, poszukuje się nowych możliwości uzyskania przewagi konkurencyjnej. Jedną z nich jest poprawa planowania i organizacji pracy, pozwalająca na zwiększenie wydajności i efektywności systemu produkcyjnego poprzez [81]:

- minimalizację czasów i kosztów produkcji,
- skracanie cykli produkcyjnych,
- terminową realizację zleceń.

Z tego powodu dla przedsiębiorstw produkcyjnych coraz istotniejsze jest stosowanie kryterium efektywności w procesie harmonogramowania zleceń produkcyjnych. Odpowiednio opracowany harmonogram produkcji zwiększa konkurencyjność przedsiębiorstwa poprzez efektywne wykorzystanie zasobów produkcyjnych, w tym ludzkich i przyczynia się do redukcji czasu oraz kosztu realizacji zleceń produkcyjnych.

W rozdziale pierwszym, na podstawie przeglądu literatury, scharakteryzowano problemy planowania i harmonogramowania produkcji. Przy założeniu, że harmonogramowanie produkcji określa właściwy dobór wykonawców działań cząstkowych przedsięwzięcia (dalej nazywanych zadaniami) i synchronizację ich pracy w czasie, to proces opracowania harmonogramu powinien rozwiązać trzy problemy [83]:



1. problem rozdziału posiadanych zasobów do wykonania zadań (zagadnienie alokacji zasobów),
2. problem ustalenia kolejności realizacji zadań niezależnych pod względem technologicznym, a wymagających kolejnego wykonania ze względów organizacyjnych (zagadnienie szeregowania zadań),
3. problem ustalenia terminarza realizacji zadań (analiza czasowa).

W rozdziale drugim, w oparciu o przegląd literatury, zostały przedstawione algorytmy optymalizacyjne, ich zasady działania, przykłady stosowania oraz porównanie według przyjętych na potrzeby realizacji celu pracy kryteriów (tabela 2.2). Wykonana analiza literaturowa wskazuje na:

1. Bardzo dużą i wciąż rosnącą różnorodność problemów optymalizacyjnych, rozwiązywanych przy pomocy algorytmów inteligentnych i technik informatycznych w wielu obszarach.

Rozwój technologii informatycznych powoduje, że może być ona stosowana w coraz większej liczbie obszarów do usprawnień oraz optymalizacji, a to pociąga za sobą rozwój oraz nowe możliwości zastosowań algorytmów inteligentnych.

2. Brak możliwości jednoznacznego wykazania wyższości jednego algorytmu nad innym.

Dla problemów rozwiązanych różnymi algorytmami inteligentnymi uzyskuje się wyniki różnej jakości. Porównanie algorytmów następuje w oparciu o przyjęte kryteria porównawcze, natomiast wyniki oceny zależne są od parametrów ustawionych dla danego algorytmu oraz sprzętu i czasu dostępnego na obliczenia.

3. Dużą złożoność problemów optymalizacyjnych, co powoduje, że ich rozwiązanie metodami tradycyjnymi staje się niemożliwe lub nieopłacalne. Natomiast coraz częściej problemy te mogą zostać rozwiązane przy pomocy algorytmów inteligentnych.
4. Brak algorytmów rozpatrujących wielowariantowość wykonania produktów.

Rosnąca złożoność i dynamika współczesnych systemów produkcyjnych powoduje, że zarządzanie nimi, podejmowanie decyzji czy ich optymalizacja staje się niezwykle trudna, a czasami wręcz niemożliwa przy zastosowaniu metod klasycznych stosowanych jeszcze kilkanaście lat temu. Problemy decyzyjne często są zbyt skomplikowane, a błędna lub nieoptymalna decyzja niesie ze sobą zbyt duże ryzyko utraty stabilności przez system czy utraty klientów lub zysków przez przedsiębiorstwo. Jednak z tak złożonymi problemami optymalizacyjnymi bardzo dobrze radzą sobie algorytmy inteligentne.

Porównanie rozwiązań złożonych problemów optymalizacyjnych, dostarczonych przez algorytmy inteligentne, z rozwiązaniami obliczanymi klasycznie jednoznacznie wskazuje wyższość stosowania algorytmów inteligentnych.

W literaturze nie znaleziono metody harmonogramowania produkcji, która rozpatrywałaby wielowariantowość wykonania produkcji oraz pozwalałaby na optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich z uwzględnieniem różnych kompetencji pracowników produkcyjnych. Możliwość generowania wielu wariantów wykonania harmonogramów produkcyjnych pozwoli na wybór najlepszego z nich, w zależności od przyjętego kryterium optymalizacyjnego oraz aktualnie występujących ograniczeń w systemie produkcyjnym. Natomiast uwzględnienie różnych kompetencji pracowników na etapie budowania harmonogramów produkcji pozwoli na zwiększenie efektywności realizacji procesów produkcyjnych.

W odpowiedzi na zaobserwowaną **lukę badawczą** sformułowano **problem badawczy** jako:

*Opracowanie algorytmu metaheurystycznego pozwalającego na optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich z uwzględnieniem różnych kompetencji pracowników oraz wielowariantowości sposobów wykonania produktów.*

W rozdziale 5 sformułowano problem harmonogramowania zadań w module produkcyjnym jednej z wiodących firm z branży automotive. Zaproponowano oryginalny algorytm metaheurystyczny oparty na metodzie przeszukiwania z zabronieniami. Celem optymalizacji jest wyznaczenie dopuszczalnego (spełniającego ograniczenia kolejnościowe wynikające z procesu technologicznego i kolejności wykonania na zasobach krytycznych) harmonogramu. W oparciu o ten algorytm, opracowano dwie strategie jego użycia tj. do wyznaczenia:

- minimalnej liczby zasobów każdego typu do realizacji zlecenia produkcyjnego w zadanym okresie czasu lub
- najmniejszego czasu realizacji wszystkich zadań dla zadanej liczby zasobów każdego typu.

Dzięki zastosowaniu algorytmu opracowany harmonogram produkcyjny pozwoli na lepsze wykorzystanie zasobów ludzkich, co przełoży się na zmniejszenie kosztów produkcji, a co za tym idzie, przyczyni się do uzyskania przewagi konkurencyjnej.

Z uwagi na tak postawiony problem badawczy oraz na dużą wagę dla przedsiębiorstw produkcyjnych budowy harmonogramów produkcji w kontekście efektywności wykorzystania zasobów ludzkich i realizacji zleceń produkcyjnych przyjęto następującą **tezę pracy**:

*Wykorzystanie metaheurystyk w opracowywaniu harmonogramów produkcyjnych pozwala na szybsze i bardziej efektywne, w porównaniu z me-*

tradycyjnymi, przyporządkowywanie zasobów ludzkich do realizacji zadań produkcyjnych.

Dla tak przyjętej tezy **za cel główny pracy przyjęto:**

*Opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich opartej na metodach inteligentnych z uwzględnieniem takich kryteriów optymalizacyjnych jak minimalna liczba pracowników lub minimalny czas realizacji zadań produkcyjnych z uwzględnieniem kompetencji pracowników.*

Do **celów szczegółowych** pracy, stanowiących etapy niezbędne do realizacji celu głównego, zalicza się:

1. Opracowanie algorytmu optymalizacyjnego Neuro-Tabu Search (NTS), który zostanie wykorzystany w metodyce harmonogramowania produkcji w kontekście minimalizacji czasu realizacji zadań produkcyjnych.

Proponowany algorytm (NTS) będzie hybrydą algorytmu Tabu Search i samouczącej się prostej sieci neuronowej. Algorytm Tabu Search jest jedną z najefektywniejszych metod konstruowania algorytmów heurystycznych dla problemów szeregowania zadań, natomiast połączenie go z samouczącą się prostą siecią neuronową pozwoli na usprawnienie mechanizmu zabronień algorytmu Tabu Search. Dzięki użyciu tak skonstruowanego algorytmu NTS możliwe będzie zastosowanie opracowanej metodyki i wygenerowanie harmonogramu spełniającego zadane kryteria optymalizacyjne.

2. Opracowanie poszczególnych etapów metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. Poszczególne etapy metodyki zawierać będą opisy zasad i wytycznych jej zastosowania w budowie harmonogramów produkcyjnych.
3. Weryfikację metodyki w przedsiębiorstwie produkcyjnym.

Aby zrealizować przyjęte cele w pracy, należy spełnić poniższe **zadania badawcze:**

1. Analiza literatury przedmiotu w zakresie dostępnej wiedzy w obszarze harmonogramowania produkcji i wykorzystania zasobów produkcyjnych w realizacji harmonogramów.
2. Analiza literatury przedmiotu w zakresie algorytmów inteligentnych oraz możliwości wykorzystania ich w planowaniu i optymalizacji produkcji.
3. Ocena algorytmów inteligentnych dostępnych w literaturze przedmiotu według własnych wybranych kryteriów w celu oceny możliwości ich

- wykorzystania w budowie i optymalizacji harmonogramów produkcyjnych.
4. Sformułowanie problemu harmonogramowania zadań produkcyjnych w wybranym przedsiębiorstwie produkcyjnym.
  5. Opracowanie modelu matematycznego zagadnienia optymalizacyjnego.
  6. Opracowanie algorytmu optymalizacyjnego opartego na wybranej metodzie inteligentnej.
  7. Przeprowadzenie badań komputerowych efektywności algorytmu.

Dla tak zdefiniowanego celu głównego i celów szczegółowych **celem utylitarnym pracy będzie:**

*Budowa narzędzia informatycznego (aplikacji) wspierającego generowanie harmonogramów produkcji opracowanego na potrzeby zastosowania metodyki.*

Aplikacja pozwoli przedsiębiorstwom usprawnić sposób planowania produkcji poprzez automatyczne generowanie zoptymalizowanych harmonogramów dla różnych sposobów wykonania produktów.

Zaproponowana w niniejszej pracy metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich z wykorzystaniem metaheurystyk, przeznaczona jest dla przedsiębiorstw z branży produkcyjnej o masowej i wieloasortymentowej produkcji realizowanej przez zasoby ludzkie o różnych kompetencjach, dla których koszty zasobów ludzkich stanowi duży udział w kosztach całkowitych wytworzenia wyrobów. Jej wykorzystanie pozwoli przedsiębiorstwom produkcyjnym m.in. na:

1. wyznaczenie potrzebnej (minimalnej) liczby pracowników dla danego planu produkcji,
2. wyznaczenie harmonogramu produkcji, który będzie mógł być zrealizowany przy mniejszym wykorzystaniu zasobów produkcyjnych (pracowników produkcyjnych) i w czasie nie dłuższym niż harmonogram opracowany w sposób tradycyjny,
3. optymalne przyporządkowanie pracowników do zadań dla zadanego planu produkcyjnego, przy uwzględnieniu ich kompetencji w realizacji zadań produkcyjnych oraz
4. szybkie przeprowadzenie symulacji różnych scenariuszy w przypadku wystąpienia ograniczeń (np. choroba pracownika, awaria maszyny).

Metodyka i opracowana aplikacja komputerowa pozwoli przedsiębiorstwom na zmianę sposobu planowania produkcji. Możliwe będzie zrealizowanie harmonogramu produkcji przy wykorzystaniu mniejszej ilości zasobów ludzkich w takim samym lub krótszym czasie. Mniejsze wykorzystanie zasobów

ludzkich przełoży się na niższe koszty pracy, a w konsekwencji na niższe koszty jednostkowe wyrobu. Dlatego zakłada się, że wdrożenie metodyki do praktyki produkcyjnej pozwoli przedsiębiorstwom na zwiększenie efektywności i obniżenie kosztów produkcji, a przez to na uzyskanie przewagi konkurencyjnej na rynku. Dodatkową korzyścią zaproponowanej metodyki i algorytmu optymalizacyjnego Neuro-Tabu Search będzie automatyczne przydzielenie określonych zasobów ludzkich do poszczególnych zadań harmonogramu produkcji.

## Rozdział 4

# Metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich

Budowa harmonogramów produkcji (scharakteryzowana w rozdziale 1 pracy) jest zagadnieniem bardzo pracochłonnym, złożonym i skomplikowanym. Jest też zagadnieniem bardzo ważnym z punktu widzenia zarządzania współczesnymi przedsiębiorstwami. Odpowiednio opracowany harmonogram produkcji zwiększa konkurencyjność przedsiębiorstwa poprzez efektywną realizację zleceń produkcyjnych. Podobnie odpowiednie zarządzanie posiadanymi zasobami produkcyjnymi, w tym ludzkimi, przekłada się na konkurencyjność przedsiębiorstwa na rynku poprzez np. redukcję kosztów działalności.

Na potrzeby realizacji celu pracy opracowany został algorytm optymalizacyjny Neuro-Tabu Search (NTS) (sposób budowy algorytmu przedstawia rozdział 5). Algorytm oparty jest na metodzie przeszukiwania przestrzeni rozwiązań z zabranieniami (Tabu Search). W ramach prac badawczych opracowano oryginalny sposób reprezentacji rozwiązania, definicji sąsiedztwa oraz unikalny mechanizm zabronień w postaci prostej sieci neuronowej. W rozdziale 5 przedstawiono również wyniki badań efektywności algorytmu Neuro-Tabu Search.

W tym rozdziale pracy zostanie zaproponowana metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludz-

kich. W niniejszej pracy będzie ona rozumiana jako zbiór zasad i wytycznych dotyczących opracowania optymalnego harmonogramu realizacji zlecenia produkcyjnego z punktu widzenia wykorzystania zasobów ludzkich i czasu produkcji. Za harmonogram optymalny będzie uważany taki harmonogram, który w porównaniu z harmonogramem opracowanym w sposób tradycyjny:

- wykorzystuje minimalną ilość zasobów każdego typu do realizacji zlecenia produkcyjnego w zadanym okresie czasu,
- wykorzystuje najkrótszy czas realizacji wszystkich zadań dla zadanej ilości zasobów każdego typu.

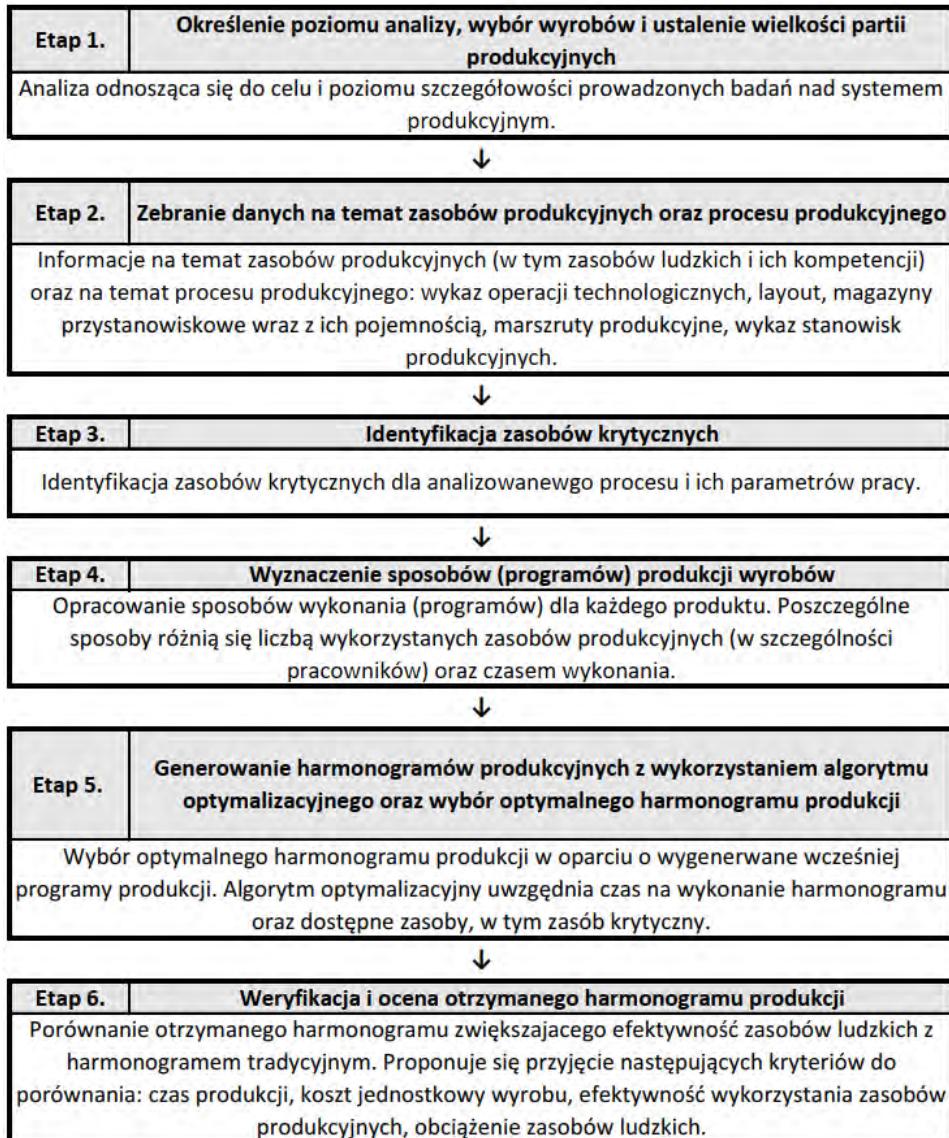
W celu łatwej implementacji metodyki w przedsiębiorstwach produkcyjnych podzielono ją na 6 etapów. Wszystkie etapy zostały opisane, a następnie zweryfikowane na przykładzie praktycznym, do którego dane zebrano w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp. z o.o., mieszczącego się w Polkowicach (sposób weryfikacji i wyniki metodyki w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp. z o.o. przedstawiono w rozdziale 7 pracy). Ponadto opracowano aplikację komputerową, pozwalającą na automatyczne generowanie zoptymalizowanych, w oparciu o algorytm optymalizacyjny (NTS), zbioru harmonogramów produkcji dla zadanych programów produkcji (aplikacja została opisana w rozdziale 8 pracy).

Etapy proponowanej metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich przedstawia rysunek 4.1.

## **Etap 1. Określenie poziomu analizy, wybór wyrobów i ustalenie wielkości partii produkcyjnych**

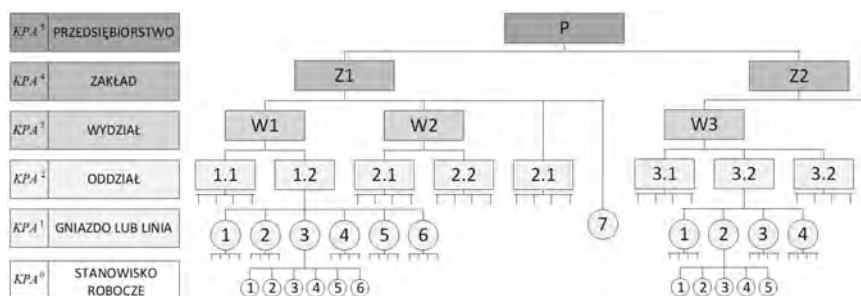
Celem pierwszego etapu metodyki jest określenie poziomu, na którym będzie analizowany system produkcyjny. System produkcyjny ma budowę hierarchiczną, stąd może być analizowany na różnych poziomach organizacyjnych. Również harmonogramy produkcji mogą być budowane zarówno dla całego przedsiębiorstwa jak i dla pojedynczego stanowiska roboczego. Ze względu na skierowanie proponowanej metodyki dla sektora przemysłowego, sugeruje się określenie poziomu analizy zgodnie z podziałem struktury produkcyjno-administracyjnej (KPA) przedsiębiorstwa, będącej układem komórek produkcyjnych i zespołem związków organizacyjnych pomiędzy nimi. Na rysunku 4.2 przedstawiono schemat sześciostopniowej struktury produkcyjno-administracyjnej.

W etapie tym powinny zostać wybrane również wyroby, dla których będzie budowany harmonogram produkcji oraz powinno nastąpić ustalenie wielkości partii produkcyjnych. Wielkość partii produkcyjnej jest jednym



Rysunek 4.1: Metodyka harmonogramowania produkcji w oparciu o optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich





Rysunek 4.2: Schemat struktury produkcyjno-administracyjnej

z ważniejszych parametrów wejściowych procesu produkcyjnego i stanowi istotny parametr w procesie planowania produkcji oraz planowania potrzeb materiałowych.

## Etap 2. Zebranie danych na temat zasobów produkcyjnych oraz procesu produkcyjnego

Aby rozpocząć budowę harmonogramu konieczne jest zdefiniowanie zasobów produkcyjnych. Istnieje wiele klasyfikacji zasobów produkcyjnych. Według normy *PN-EN ISO 9001:2015 Systemy zarządzania jakością*. Wymagania, zasoby dzieli się na kategorie:

- ludzie,
- infrastruktura,
- środowisko funkcjonowania procesów,
- zasoby do monitorowania i pomiarów,
- wiedza organizacji.

Najbardziej podstawowa klasyfikacja dzieli zasoby na [81]:

- odnawialne,
- nieodnawialne,
- podwójnie ograniczone.

Zasób odnawialny po wykonaniu operacji może zostać przydzielony do realizacji kolejnej. Zasobami odnawialnymi są ludzie, stanowiska produkcyjne, maszyny i urządzenia, narzędzia, oprzyrządowanie itp. Zasoby odnawialne charakteryzują się zazwyczaj ograniczoną pojemnością, dostępnością, a w przypadku zasobów ludzkich także tzw. kompetencjami czyli wiedzą, kwalifikacjami, umiejętnościami do wykonywania określonych zadań. Z kolei zasoby nieodnawialne to surowce, kapitał i energia. Są one

zużywane w kolejnych operacjach, przy planowaniu ograniczona jest ich liczba oraz nie podlegają procesowi odtwarzania.

Zasoby podwójnie ograniczone są to zasoby, dla których należy uwzględnić zarówno ograniczenie dostępności w czasie jak i ich ograniczoną liczbę. Z punktu widzenia podzielności pracy zasoby dzieli się na ciągłe i dyskretne [81]. Zasoby ciągłe charakteryzują się tym, że mogą być rozdzielane w dowolnej liczbie z dostępnego przedziału. Natomiast zasoby dyskretne rozdzielane są tylko w określonych przedziałach wartości.

W dalszej części pracy rozpatrywane będą wyłącznie zasoby odnawialne i dyskretne. W zależności od wybranego obszaru analizy, budowa harmonogramu może obejmować wszystkie lub wybrane zasoby przedsiębiorstwa. Jednak najczęściej wymagany jest opis tych, które biorą bezpośredni udział w realizacji zleceń. Problemy harmonogramowania, w których uwzględnia się ograniczoną dostępność zasobów, nazywane są problemami z ograniczeniami zasobowymi (*ang. Resource Constrained Scheduling Problem, RCSP*) [21, 19, 135].

W etapie 2. metodyki powinno nastąpić, oprócz zdefiniowania zasobów produkcyjnych niezbędnych do realizacji zaplanowanego zadania produkcyjnego, również zebranie danych na temat bieżącej ich dostępności (tzw. rzeczywisty fundusz czasu pracy) oraz powinny zostać zdefiniowane kompetencje pracowników potrzebne do realizacji określonych czynności. Do budowy harmonogramu produkcji potrzebne będą również wartości parametrów charakterystycznych dla zbioru zasobów oraz dane na temat procesu produkcyjnego. Do danych na temat procesu produkcyjnego należą:

- wykaz operacji technologicznych,
- layout,
- magazyny przystanowiskowe wraz z ich pojemnością,
- marszruty produkcyjne,
- wykaz stanowisk produkcyjnych wraz z ich dostępnością i pojemnością

Wszystkie dane powinny zostać zebrane bezpośrednio w przedsiębiorstwie, dla którego przeprowadzana będzie optymalizacja harmonogramów produkcji. Niektóre dane wymagać mogą weryfikacji, którą należy przeprowadzić poprzez bezpośrednie obserwacje procesu produkcyjnego i pomiary czasów. Tak wytypowany i zdefiniowany zbiór danych na temat zasobów produkcyjnych tworzyć będzie system produkcyjny, będący przedmiotem dalszego planowania i budowania harmonogramów produkcji.

### **Etap 3. Identyfikacja zasobów krytycznych**

Zasób krytyczny, czyli taki, który determinuje wydajność procesu produkcyjnego, jest zasobem odnawialnym oraz dyskretnym. W przypadku niniejszej pracy zasobami krytycznymi, dla których w dalszej części pracy, przeprowadzana będzie optymalizacja są zasoby ludzkie. Z uwagi na wysoki koszt pracy zasobów ludzkich ich ilość w procesie produkcyjnym jest ograniczona. Analiza zebranych w etapie 2. metodyki danych na temat procesu produkcyjnego pokazuje, że istnieje taka wartość wydajności produkcyjnej, po osiągnięciu której zwiększenie liczby pracowników nie wpływa znacząco na zwiększenie wydajności produkcji natomiast znacząco zwiększa koszty produkcji.

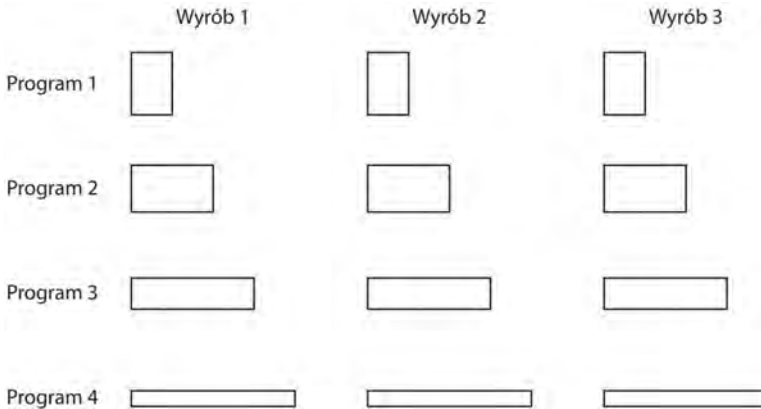
Jednak w literaturze przedmiotu, w większości prac badawczych, zasobem krytycznym zazwyczaj jest stanowisko produkcyjne, przez które rozumiane jest urządzenie, maszyna bądź wydzielone miejsce na hali produkcyjnej. Harmonogram produkcji może zostać sporządzany w sposób hierarchiczny, tzn. przez planowanie na poziomie komórek wyższego rzędu, a następnie z większym poziomem szczegółowości w komórkach niższego rzędu. W przypadku, gdy poszczególne operacje wymagają więcej niż jednego zasobu, zidentyfikowanie zasobu krytycznego w systemie produkcyjnym wymaga dekompozycji zbioru zasobów na rozłączne zbiory, zawierające stanowiska produkcyjne oraz zasoby osobowe. Mogą zostać również zdefiniowane grupy zasobowe określające zasoby mogące wykonywać wybrane operacje.

Dzięki określeniu przynależności zasobu do danej grupy zasobów możliwe jest określenie zakresu możliwości jego użycia co można później przełożyć na np. możliwość wykonania operacji technologicznej na określonym stanowisku roboczym i liczbie dostępnych zasobów w danym czasie [81].

### **Etap 4. Wyznaczenie sposobów (programów) produkcji wyrobów**

Z reguły czas realizacji wieloetapowych zadań wymagających obsługi przez ludzi silnie zależy od ich liczby. W szczególności czas wykonania wielu wyrobów przez jednego człowieka jest równy sumie czasów czynności wykonywanych przez operatora pomnożonej przez liczbę sztuk wyrobów. W drugiej skrajnej sytuacji, gdy mamy tylu operatorów ile wynosi liczba czynności wymagających operatora, czas ten jest równy maksymalnemu z czasów czynności wymagających operatora pomnożonemu przez liczbę sztuk wyrobu.

Na rysunku 4.3 przedstawiono programy (sposoby) wykonania trzech wyrobów. Czas wykonania proporcjonalny jest do długości prostokąta, na-



Rysunek 4.3: Programy produkcyjne dla poszczególnych wyrobów

tomiast łączna liczba zasobów do jego wysokości. Ogólnie, czym większa jest liczba pracowników, tym krótszy jest czas wykonania zadania. Niestety zależność ta nie jest proporcjonalna, co więcej zależy ona może nie tylko od liczby zasobów, ale również od liczby typów zasobów.

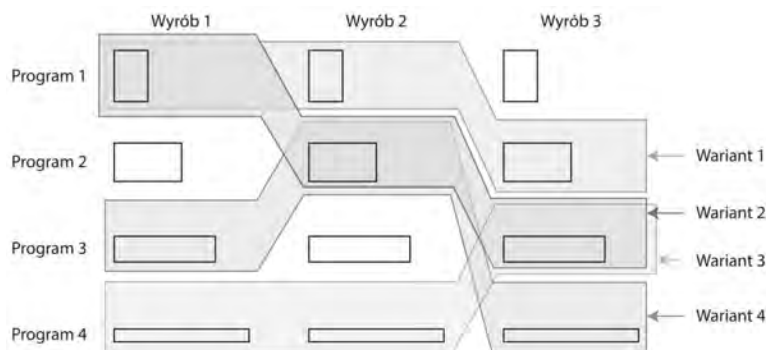
## **Etap 5. Generowanie harmonogramów produkcyjnych z wykorzystaniem algorytmu optymalizacyjnego oraz wybór optymalnego harmonogramu produkcji**

Liczba operacji wykonywanych nawet w niewielkim okresie planowania oraz liczba zmiennych (liczba możliwych kolejności ich wykonywania na ograniczonych zasobach) uniemożliwia wyznaczenie takiego harmonogramu w sposób ręczny, nie mniej duża moc obliczeniowa współczesnych komputerów umożliwia generowanie ogromnej liczby harmonogramów w czasie akceptowalnym przez praktyków. Następnie, proces produkcyjny realizowany jest zgodnie z najlepszym planem operacyjnym.

W opisywanej metodyce, ukierunkowanej na optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich przyjmuje się, że zlecenie produkcyjne podzielone jest na zadania. Każde zadanie polega na wyprodukowaniu określonej liczby sztuk pewnego wyrobu. Dla każdego wyrobu podane są sposoby (programy) ich wykonania. Każdy sposób określa jakie zasoby i w jakich ilościach są wykorzystane do produkcji. Dla każdego sposobu oraz liczby sztuk do wykonania można wyznaczyć czas realizacji zadania. W czasie wykonywania zadania danym sposobem wszystkie zasoby zdeterminowane przez opis sposobu są niedostępne dla innych zadań przez cały czas realizacji tego zadania.

Na tym etapie metodyki, dla ograniczonych zasobów ludzkich wyznaczany jest harmonogram wykonywania zadań minimalizujący czas zakończenia wykonywania wszystkich zadań. Dla każdego zadania należy przyporządkować sposób jego wykonania oraz wyznaczyć kolejność wykonywania zadań na zasobach. Na rysunku 4.4 przedstawiono różne warianty wyboru sposobów wykonania zadań

Zauważmy, że wykonania zadań w terminie przekraczającym okres planowania oznacza, że ilość zasobów ludzkich jest niewystarczająca do wykonania zlecenia w wyznaczonym terminie. W takim przypadku, decydent musi podjąć decyzję o zatrudnieniu nowej osoby i/lub nie udzieleniu urlopu osobie zatrudnionej albo zrezygnować z mniej pilnych zadań. Z drugiej strony, jeżeli czas realizacji zlecenia jest krótszy od okresu planowania, decydent może przeprowadzić obliczenia dla mniejszej liczby pracowników i pozostałym udzielić urlopów i/lub podjąć się realizacji dodatkowych zadań tak, aby maksymalnie wykorzystać czas pracy pracowników.



Rysunek 4.4: Przykładowe warianty przyporządkowania sposobów wykonania do zadań

## Etap 6. Weryfikacja i ocena otrzymanego harmonogramu produkcji

W ostatnim etapie metodyki powinna zostać przeprowadzona weryfikacja i ocena otrzymanego harmonogramu z harmonogramem zbudowanym z wykorzystaniem metod tradycyjnych. Celem tego etapu jest porównanie obydwu wersji harmonogramów przy wykorzystaniu następujących kryteriów oceny użytecznych z punktu widzenia przedsiębiorstwa:

- czas wykonania zlecenia produkcyjnego,
- koszt realizacji zlecenia produkcyjnego,

- efektywność wykorzystania zasobów produkcyjnych w szczególności zasobów ludzkich,
- obciążenie zasobów ludzkich.

Należy jednak zaznaczyć, że proces weryfikacji i oceny obydwu harmonogramów może się wiązać z zagrożeniem, jakim jest niedokładność danych. Na dużym poziomie szczegółowości dane dotyczące procesu produkcyjnego często nie są odnotowywane w systemach lub w dokumentacji. Nie ma pewności, czy wszystkie zmienne, które wystąpiły w rzeczywistym procesie produkcji zostały w rzeczywistym harmonogramie produkcyjnym. Przykładem może tutaj być nieodnotowany nigdzie czas przygotowania stanowiska roboczego do pracy na początku zmiany lub konieczność dokończania pracy zmiany poprzedniej. Tego typu ryzyko rozbieżności danych można ograniczyć poprzez prowadzenie obserwacji bezpośrednich różnego typu praktyk w danym przedsiębiorstwie oraz poprzez pozyskanie nieoficjalnych informacji od poszczególnych pracowników produkcyjnych.

Powyżej przedstawione zagrożenie można złagodzić bądź wyeliminować stosując / generując harmonogramy odporne na zakłócenia, co pozwala na zachowanie stabilności systemu produkcyjnego.

## Rozdział 5

# Algorytm optymalizacyjny Neuro-Tabu Search

Na potrzeby realizacji celu pracy opracowany został algorytm optymalizacyjny. Algorytm ten oparty jest na algorytmie Tabu Search, przeszukującym przestrzeń rozwiązań sąsiednich. W celu dywersyfikacji procesu przeszukiwań oraz efektywnego opuszczania lokalnych minimów zastosowano mechanizm zabronień.

Zastosowanie klasycznego podejścia w postaci listy zabronień, na którym pamiętane są zabronione relacje kolejnościowe pomiędzy zadaniami, jest zbyt restrykcyjne dla rozważanego problemu i znacząco ogranicza zbiór niezabronionych rozwiązań sąsiednich w sąsiedztwie rozwiązań bazowych. W związku z tym zdecydowano się na osłabienie restrykcyjności mechanizmu przez połączenie go z prostą samoorganizującą się siecią neuronową, a algorytm optymalizacyjny nazwano Neuro-Tabu Search (NTS).

W pierwszej części rozdziału przedstawiono opis matematyczny problemu optymalizacyjnego oraz jego ilustrację na przykładzie systemu produkcyjnego. Następnie przedstawiono schemat i opis proponowanego algorytmu optymalizującego Neuro-Tabu Search (NTS), jak również oceniono jego efektywność poprzez przeprowadzenie badań eksperymentalnych, w których porównano jakość rozwiązań generowanych przez proponowany algorytm NTS z jakością rozwiązań generowanych przez algorytmy oparte na znanych metodach konstrukcji algorytmów przeszukiwań lokalnych.

## 5.1 Opis matematyczny problemu optymalizacyjnego

Problem optymalizacyjny można sformułować w następujący sposób:

W okresie planowania należy wykonać  $n$  zadań ze zbioru  $J = \{1, \dots, n\}$ . W systemie produkcyjnym znajduje się  $m$  gniazd produkcyjnych (grup zasobowych, zawierających stanowiska produkcyjne) ze zbioru  $M = \{1, \dots, m\}$ . Zadanie  $j \in J$  można wykonać tylko w gnieździe  $\mu_j, \mu_j \in M$ . Każde zadanie może być wykonane na jeden lub wiele sposobów. Wykonanie zadania  $j \in J$  w sposób  $k = 1, \dots, r_j$  wymaga  $z_{jk}$  spawaczy oraz  $o_{jk}$  operatorów i zajmuje  $p_{jk} > 0$  czasu, gdzie  $r_j$  oznacza liczbę sposobów wykonania zadania  $j$ .

W okresie planowania dostępnych jest  $Z$  spawaczy oraz  $O$  operatorów maszyn stanowiących grupy zasobów osobowych. Należy wyznaczyć przydział pracowników do zadań oraz wyznaczyć harmonogram wykonywania zadań tak, aby czas wykonania wszystkich zadań był najkrótszy z możliwych.

Niech  $S_j$  ( $C_j$ ) oznacza moment rozpoczęcia (zakończenia) wykonywania zadania  $j \in J$ . Dopuszczalny harmonogram wykonywania zadań musi spełniać następujące warunki:

1. moment zakończenia  $C_j$  musi być równy momentowi rozpoczęcia  $S_j$  powiększonemu o czas wykonania  $p_{jk}$ ,
2. w okresie czasowym od  $S_j$  do  $C_j$  musi być dostępnych  $z_{jk}$  spawaczy oraz  $o_{jk}$  operatorów do wykonania zadania  $j$ ,
3. w okresie czasowym od  $S_j$  do  $C_j$  musi być dostępne gniazdo produkcyjne  $\mu_j$ .

gdzie  $k$  określa sposób wykonania zadania  $j$ .

Niech  $\pi = (\pi(1), \dots, \pi(n))$  oznacza permutację określającą kolejność wprowadzania zadań do systemu, a  $a_j$  numer sposobu wykonania zadania  $j \in J$ .

Dla zadanej pary  $(\pi, a)$  harmonogram wykonywania zadań, spełniający w/w wymagania, można wyznaczyć zgodnie z regułą zachłanną. Oznacza to, iż zadania szeregowane są w kolejności  $\pi$ . Do wykonania zadania z listy przydzielana jest, wynikająca ze sposobu wykonania, liczba spawaczy i operatorów. Podczas wyboru pracowników, przydzielani są pracownicy (spawacze, operatorzy), którzy najwcześniej zakończyli realizację wcześniej szeregowanych zadań.

Oznaczmy przez  $R_k^Z, R_k^O, R_k^M$  najwcześniejszy moment dostępności odpowiednio  $k$ -tego spawacza,  $k$ -tego operatora maszyn oraz  $k$ -tej maszyny. Dokładny opis wyznaczenia harmonogramu przedstawia algorytm 5.1.



**Algorytm 5.1** Wyznaczenie harmonogramu dla zadanej pary  $(\pi, \alpha)$ 

Niech  $R_k^z, R_k^o, R_k^m$  oznacza odpowiednio najwcześniejszy moment dostępności  $k$ -tego spawacza,  $k$ -tego operatora oraz  $k$ -tej maszyny

1.  $R_k^z \leftarrow 0$  dla każdego  $k = 1, \dots, Z$ ;
2.  $R_k^o \leftarrow 0$  dla każdego  $k = 1, \dots, O$ ;
3.  $R_k^m \leftarrow 0$  dla każdego  $k = 1, \dots, m$ ;
4. Dla każdego  $i = 1, 2, \dots, n$  wykonaj
  - 4.1  $j \leftarrow \pi(i); k \leftarrow \alpha_j$ ;
  - 4.2 wyznacz zbiór  $I^z$  składający się z  $z_{jk}$  spawaczy z najmniejszą wartością  $R_k^z$ ;
  - 4.3 wyznacz zbiór  $I^o$  składający się z  $o_{jk}$  operatorów z najmniejszą wartością  $R_k^o$ ;
  - 4.4  $S_j \leftarrow \max\{\max_{s \in I^z}\{R_s^z\}, \max_{s \in I^o}\{R_s^o\}, R_{\mu_j}^m\}$ ;
  - 4.5  $C_j \leftarrow S_j + p_{jk}$ ;
  - 4.6  $R_s^z \leftarrow C_j$  dla każdego  $s \in I^z$ ;
  - 4.7  $R_s^o \leftarrow C_j$  dla każdego  $s \in I^o$ ;
  - 4.8  $R_{\mu_j}^m \leftarrow C_j$ ;

Złożoność obliczeniowa algorytmu wynosi  $O(n^2)$

**Przykład**

Rozważmy system produkcyjny, w którym mamy do wykonania  $n = 10$  zadań przy pomocy  $m = 5$  gniazd produkcyjnych. Do dyspozycji mamy  $Z = 5$  spawaczy oraz  $O = 3$  operatorów. Parametry zadań zostały zebrane w tabeli 5.1.

Dla kolejności  $\pi = (5, 7, 10, 9, 1, 8, 6, 3, 2, 4)$  oraz  $a = (2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 1, 2)$  harmonogram wykonywania zadań przez pracowników został przedstawiony w tabeli 5.2 oraz zilustrowany na rysunku 5.1.

Rozważmy przykładowe zadanie 7. Jest ono wykonywane w komórce produkcyjnej  $\mu_7 = 2$  w sposób  $\alpha(7) = 2$ , wymagającej  $z_{72} = 2$  spawaczy i  $o_{72} = 2$  operatorów. Czas wykonania tego zadania w określony sposób wynosi  $p_{72} = 28$ . W wyniku wykonania Kroku 4. algorytmu 5.1 otrzymujemy harmonogram wykonania zadania, w którym do zadania 7 przypisano spawaczy 2 i 3 oraz operatorów 2 i 3. Wszystkie te zasoby i gniazdo 3 są przypisane do wykonania tego zadania od  $S_7 = 0$  do  $C_7 = 28$ .

Tabela 5.1: Parametry zadań

$j$	$\mu_j$	sposób 1			sposób 2		
		$c_{j1}$	$d_{j1}$	$t_{j1}$	$c_{j2}$	$d_{j2}$	$t_{j2}$
1	1	10	3	3	12	2	3
2	2	19	2	1	28	2	0
3	3	22	1	1	38	1	0
4	4	19	3	2			
5	1	20	1	1			
6	2	25	2	2			
7	3	23	3	3	28	3	2
8	4	23	2	1	34	2	0
9	1	27	3	2			
10	2	21	3	1	27	2	1

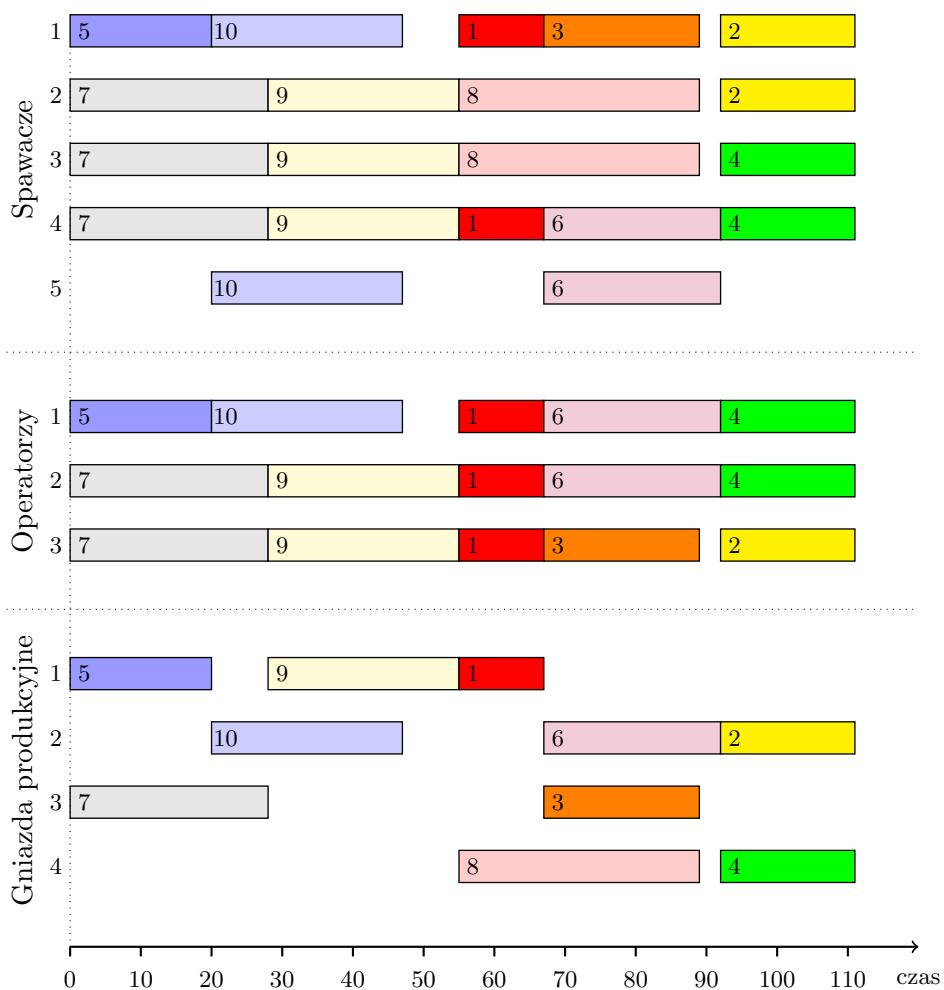
Tabela 5.2: Harmonogram wykonania zadań

$j$	$\mu_j$	sposób	spawacze	operatorzy	$S_j$	$C_j$
5	1	1	1	1	0	20
7	3	2	2,3,4	2,3	0	28
10	2	2	1,5	1	20	47
9	1	1	2,3,4	2,3	28	55
1	1	2	1,4	1,2,3	55	67
8	4	2	2,3		55	89
6	2	1	4,5	1,2	67	92
3	3	1	1	3	67	89
2	2	1	1,2	3	92	111
4	4	1	3,4	1,2	92	111

## 5.2 Algorytm Neuro-Tabu Search (NTS)

Tabu Search jest jedną z najefektywniejszych metod konstruowania algorytmów heurystycznych dla problemów szeregowania zadań. W zaproponowanej przez Glovera [97] metodzie w każdej iteracji przeglądane jest sąsiedztwo rozwiązania bazowego w celu znalezienia rozwiązania o najmniejszej wartości funkcji celu. Sąsiedztwo rozwiązania generowane jest przez modyfikacje rozwiązania bazowego zwane ruchami. Metoda swoją nazwę zawdzięcza mechanizmowi zabronień.

Mechanizm ten implementowany jest w postaci listy, na której zapamiętywane są atrybuty rozwiązań generowanych w kilku poprzednich iteracjach. Lista jest pewnego rodzaju pamięcią procesu przeszukiwań. Podczas



Rysunek 5.1: Wygenerowany harmonogram pracy pracowników

przeszukiwania sąsiedztwa rozwiązania bazowego, na podstawie zawartości listy zabronień, sąsiedztwo dzielone jest na dwa podzbiory: zbiór rozwiązań zabronionych oraz zbiór rozwiązań niezabronionych. Podczas wyboru najlepszego rozwiązania sąsiedniego brany jest pod uwagę tylko zbiór rozwiązań niezabronionych.

Mechanizm zabronień zabezpiecza proces przeszukiwań przed powrotem do rozwiązań wcześniej generowanych i umożliwia skuteczne wychodzenie z minimów lokalnych. Algorytm kończy działanie po spełnieniu wa-

runku zatrzymania, którym najczęściej jest liczba iteracji i/lub czas wykonywania się algorytmu. Konstrukcja algorytmu opartego na metodzie Tabu Search wymaga zdefiniowania postaci rozwiązania, sąsiedztwa rozwiązania oraz mechanizmu zabronień.

### 5.2.1 Ruchy oraz sąsiedztwo

W rozważanym problemie, rozwiązanie reprezentowane jest w postaci pary  $(\pi, a)$ . W najefektywniejszych algorytmach opartych na metodach przeszukiwania z zabronieniami sąsiedztwo generowane jest przy wykorzystaniu ruchów typu wstaw.

Niech  $v = (x, y, z)$  będzie trójką, gdzie  $x$  i  $y$  oznaczają pozycje w  $\pi$ , natomiast  $z$  będzie sposobem wykonania zadania  $\pi(x)$ . Rozwiązanie sąsiednie  $(\pi_v, a_v)$  powstałe z  $\pi$  oraz  $a$  przez wykonanie ruchu  $v$  przyjmuje postać:

$$\pi_v = (\pi(1), \dots, \pi(x-1), \pi(x+1), \dots, \pi(y), \pi(x), \dots, \pi(n)) \text{ jeżeli } a < b, \quad (5.1)$$

$$\pi_v = (\pi(1), \dots, \pi(x), \pi(y) \dots, \pi(x-1), \pi(x+1), \dots, \pi(n)) \text{ jeżeli } a > b, \quad (5.2)$$

natomiast

$$a_v = (a_1, \dots, a_{x-1}, z, a_{x+1}, \dots, a_n). \quad (5.3)$$

Zbiór wszystkich tego typu ruchów zdefiniowany jest następująco:

$$V = \{(x, y, z) : y \notin \{x-1, x\}, x, y \in \{1, \dots, n\}, z \in \{1, \dots, r_{\pi(a)}\}\}. \quad (5.4)$$

Warunek  $y \notin \{x-1, x\}$  został dodany, aby wyeliminować ruchy generujące rozwiązania tożsame z  $(\pi, a)$  oraz ruchy redundantne (generujące rozwiązania, które można wygenerować innymi ruchami z tego zbioru). Liczba rozwiązań w sąsiedztwie  $\mathcal{N}(V, \pi, a)$  rozwiązania  $(\pi, a)$  generowanym przez ruchy ze zbioru  $V$  wynosi  $n(n-2) \sum_{i=1}^n r_i$ . Biorąc pod uwagę złożoność obliczeniową wyznaczenia wartości funkcji celu  $O(n^2)$ , złożoność przeszukania sąsiedztwa generowanego przez ruchy ze zbioru  $V$  wynosi  $O(n^4, ave(r))$ , gdzie  $ave(r)$  oznacza wartość średnią liczby sposobów wykonania zadań.

Duża złożoność obliczeniowa przeglądania sąsiedztwa ma istotny wpływ na czas działania algorytmu. Czas ten można skrócić przez zmniejszenie liczby rozwiązań - przez wyeliminowanie rozwiązań, o których wiemy bez wyznaczenia wartości funkcji celu, że nie będą lepsze od rozwiązania bieżącego. Oznaczmy przez  $\mathcal{C} = (\mathcal{C}_1, \dots, \mathcal{C}_l)$  ciąg krytyczny zadań wyznaczony dla pary  $(\pi, a)$ . W oparciu o ciąg  $\mathcal{C}$  można sformułować następującą własność:

### Własność 5.1

Niech  $\mathcal{C}$  będzie dowolnym ciągiem krytycznym wyznaczonym dla pary  $(\pi, a)$  oraz niech  $(\pi_v, a_v)$  będzie rozwiązaniem takim, że:

$C_{max}(\pi_v, a_v) < C_{max}(\pi, a)$  wówczas:

- co najmniej jedno zadanie z ciągu  $\mathcal{C}$  wykonane jest w  $\pi_v$  na innej pozycji niż  $\pi$  i/lub
- co najmniej jedno zadanie z ciągu  $\mathcal{C}$  wykonane jest w  $\pi_v$  innym sposobem.

Warunki własności 5.1 są warunkami koniecznymi, niestety nie są warunkami wystarczającymi. Niech zbiór  $U$  będzie podzbiorem zbioru  $V$ , w którym znajdują się ruchy generujące rozwiązania spełniające warunki własności 5.1. Ostatecznie w algorytmie zostało użyte sąsiedztwo  $\mathcal{N}(U, \pi, a)$ . Czas przeszukiwania tego sąsiedztwa zależy od liczby zadań w ciągu krytycznym, która z reguły jest dużo mniejsza od liczby zadań.

### 5.2.2 Mechanizm Tabu z siecią neuronową

W algorytmach opartych na metodzie przeszukiwania z zabronieniami dla problemów szeregowania zadań mechanizm zabronień realizuje się w postaci listy ograniczeń, na której przechowywane są zakazane relacje kolejnościowe pomiędzy zadaniami.

Stosując to podejście do rozważanego problemu, elementami listy zabronień  $T$  są trójki w postaci  $(a, b, c)$ , gdzie  $a$  oraz  $b$  oznaczają zadania, natomiast  $c$  sposób wykonania zadania. Rozwiązanie  $(\pi, a)$  jest zabronione jeżeli w liście  $T$  istnieje trójka  $(a, b, c)$  taka, że zadanie  $a$  wykonywane jest sposobem  $c$  oraz wykonywane jest w  $\pi$  przed zadaniem  $b$ .

W każdej iteracji algorytmu lista  $T$  jest aktualizowana tj. dodawane są atrybuty nowo wygenerowanego rozwiązania. Jeżeli  $v = (x, y, z)$  jest ruchem generującym rozwiązanie wybrane w danej iteracji, to do listy  $T$  dodawane jest:

- $(\pi(x), \pi(x + 1), a_{\pi(x)})$  jeżeli  $x < y$ ,
- $(\pi(x - 1), \pi(x), a_{\pi(x)})$  jeżeli  $x > y$ .

Opisany mechanizm zabronień jest bardzo restrykcyjny tj. mechanizm zabrania generowania rozwiązań wcześniej wygenerowanych oraz wielu innych. Dla przykładu trójka  $(a, b, c)$  zabrania wstawienia zadania  $a$  bezpośrednio przez zadanie  $b$  oraz na wszystkie pozycje w  $\pi$  przed pozycją

zadania  $a$ . Duża restrykcyjność tego mechanizmu ma swoje zalety, mianowicie pozwala na ograniczenie penetracji podprzestrzeni składających się z podobnych rozwiązań.

Zastosowanie tak restrykcyjnego mechanizmu dla rozważanego problemu znacząco ogranicza zbiór niezabronionych rozwiązań sąsiednich w sąsiedztwie rozwiązań bazowych. Wynika to z faktu, iż w omawianym okresie planowania z reguły ciąg krytyczny składa się z kilku zadań i często zdarza się, że otoczenie rozwiązania bazowego nie posiada rozwiązań niezabronionych. Dlatego zdecydowano się na osłabienie restrykcyjności mechanizmu przez zastosowanie prostej samoorganizującej się sieci neuronowej. Proponowana sieć neuronowa składa się z jednej warstwy neuronów, a każdemu neuronowi przyporządkowano jedno rozwiązanie sąsiednie rozwiązania bazowego (rysunek 5.2). Na wejściach neuronów podawane są liczby binarne (0 lub 1). Wartość 1 oznacza, że rozwiązanie sąsiednie posiada pewną cechę, natomiast 0, że tej cechy nie posiada. Precyzyjniej, na wejście  $i$  neuronu przyporządkowanego do rozwiązania  $(\pi_v, a_v)$  podajemy wartość funkcji:

$$\mathcal{F}(a_i, b_i, c_i, \pi^{(v)}, \alpha^{(v)}) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli w } (\pi^{(v)}, \alpha^{(v)}) \text{ zadanie } a_i \text{ jest} \\ & \text{wykonywane sposobem } c_i \text{ przed zadaniem } b_i, 0, \\ & \text{w przeciwnym wypadku.} \end{cases} \quad (5.5)$$

Tak więc każdy neuron posiada  $|I|$  wejść, gdzie zbiór

$$I = \{(a_i, b_i, c_i) : a_i \neq b_i, a_i, b_i \in J, c_i \in \{1, \dots, r_{a_i}\}\}. \quad (5.6)$$

Neuron posiada dodatkowe wejście, którego wartość zależy od jakości rozwiązania i jest równa

$$\Delta_v = \frac{C_{\max}(\pi_v, a_v) - C_{\max}^*}{C_{\max}^*} \quad (5.7)$$

gdzie  $C_{\max}^*$  jest wartością funkcji celu najlepszego rozwiązania znalezionej do tej pory.

Wartość wyjściowa neuronu  $v$  jest zdefiniowana następująco

$$\mu_v = \alpha \cdot \Delta_v + \sum_{i \in I} (\beta + \omega_i) \cdot \mathcal{F}(a_i, b_i, c_i, \pi_v, a_v). \quad (5.8)$$

Neuron  $v$  jest aktywowany, zgodnie z zasadą ”zwycięzca bierze wszystko” (winner-take-all), jeśli ma najniższą wartość  $\mu_v$  ze wszystkich neuronów. Aktywacji neuronu towarzyszą dwie czynności: wygenerowanie nowego rozwiązania bazowego tj. w kolejnej iteracji rozwiązaniem bazowym

będzie rozwiązanie  $(\pi_v, a_v)$  oraz reorganizacja sieci polegająca na zmianie wag wejściowych neuronów. W przypadku aktywacji neuronu odpowiadającego rozwiązaniu  $(\pi_v, a_v)$  dla  $v = (x, y, z)$  modyfikowana jest waga wejścia  $i$  odpowiadającego trójce:

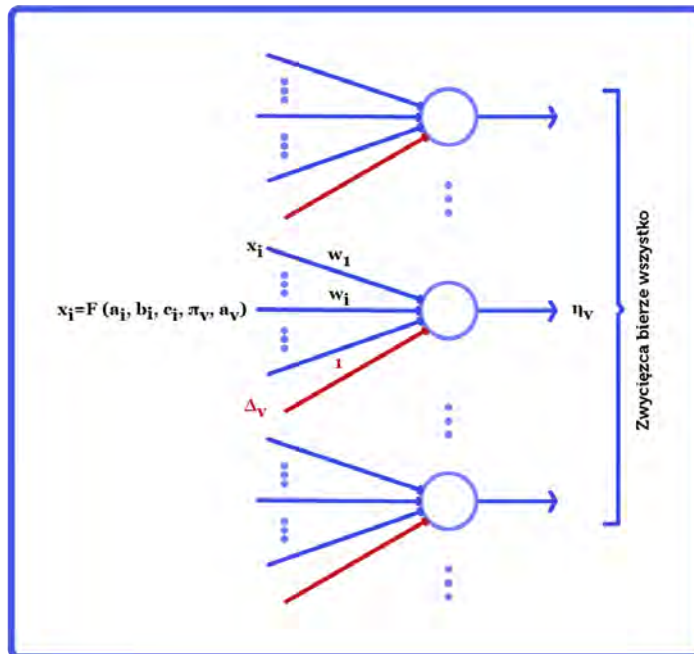
- $(\pi(x), \pi(x+1), a_{\pi(x)})$  jeżeli  $x < y$ ,
- $(\pi(x-1), \pi(x), a_{\pi(x)})$  jeżeli  $x > y$ ,

zgodnie z następującą zależnością

$$\omega_i = \beta(1 + \omega_i), \quad (5.9)$$

natomiast pozostałe neurony zgodnie z zależnością

$$\omega_i = \beta\omega_i. \quad (5.10)$$



Rysunek 5.2: Struktura sieci neuronowej

Zaproponowana metoda modyfikacji sieci rozróżnia zabronienia pamiętane w oryginalnej liście zabronień. Zabronienia najnowsze mają większą wagę (5.9) niż zabronienia wcześniejsze. Jest to rezultatem zapominania

realizowanego przez wyrażenie (5.10). Dodatkowo sieć pamięta, że dane zabronienie zostało zastosowane wcześniej raz lub wiele razy i fakt ten jest wzmacniany przez neuron. Schemat algorytmu Neuro-Tabu Search (NTS) przedstawia algorytm 5.2.

---

### Algorytm 5.2 Algorytm Neuro-Tabu Search (NTS)

---

#### Zmienne

$(\pi^0, \alpha^0)$  – rozwiązanie początkowe,

$(\pi^*, \alpha^*)$  – najlepsze znalezione rozwiązanie,

$(\pi, \alpha)$  – rozwiązanie bieżące.

1.  $(\pi^*, \alpha^*) \leftarrow (\pi^0, \alpha^0)$ ;
  2.  $(\pi, \alpha) \leftarrow (\pi^0, \alpha^0)$ ;
  3. Dopóki nie jest spełnione kryterium STOPU wykonaj:
    - 3.1 Wyznacz sąsiedztwo  $\mathcal{N}(\pi, \alpha)$  rozwiązania bieżącego  $\pi$ ;
    - 3.2 Wyznacz rozwiązanie  $(\pi^{(v)}, \alpha^{(v)})$  przy wykorzystaniu sieci neuronowej;
    - 3.3 Jeżeli  $C_{\max}(\pi^*, \alpha^*) > C_{\max}(\pi^{(v)}, \alpha^{(v)})$  to:
      - 3.3.1  $(\pi^*, \alpha^*) \leftarrow (\pi^{(v)}, \alpha^{(v)})$ ;
      - 3.4  $(\pi, \alpha) \leftarrow (\pi^{(v)}, \alpha^{(v)})$ ;
      - 3.5 Wykonaj samoreorganizację sieci neuronowej
- 

## 5.3 Testy komputerowe algorytmu

Celem badań eksperymentalnych była ocena efektywności zaproponowanego algorytmu Neuro-Tabu Search (NTS). Jakość rozwiązań generowanych przez algorytm (NTS) została porównana z jakością rozwiązań generowanych przez algorytmy oparte na znanych metodach konstrukcji algorytmów przeszukiwań lokalnych: descending search (DS), simulated annealing (SA) oraz Tabu Search (TS).

Testy przeprowadzono na 22 grupach instancji różniących się liczbą zadań, gniazd oraz liczbą dostępnych pracowników. Każda grupa składa się z 5-ciu instancji co łącznie daje 110 instancji. Instancje generowano dla liczby zadań  $n \in \{10, 20, 50, 100\}$ , liczby gniazd  $m \in \{5, 10, 20\}$ . Parametry zadań generowane były losowo tj. czas wykonania operacji z przedziału 10-30, liczba sposobów wykonania z zakresu 1-2 (przy czym jeżeli zadanie wykonane było na dwa sposoby, to drugi z nich był dłuższy od pierwszego i wymagał mniej spawaczy i/lub operatorów), liczba spawaczy z zakresu 1-4, liczba operatorów 0-3.



Liczbę spawaczy  $Z$  oraz operatorów maszyn  $O$  dostępnych w systemie produkcyjnym określono w następujących krokach:

- wyznaczany jest podzbiór  $M'$  gniazd produkcyjnych wykorzystywanych do realizacji zadań ze zbioru  $J$ ,
- dla każdego gniazda  $g \in M'$  wyznaczana jest liczba spawaczy  $Z^g$  i operatorów  $O^g$ , pozwalająca na realizację każdego zadania dowolnym sposobem tj.  $Z^g = \max\{z_{jk} : \mu_j = g, j \in J, k = 1, \dots, r_j\}$ ,  $O^g = \max\{o_{jk} : \mu_j = g, j \in J, k = 1, \dots, r_j\}$ ,
- liczbę spawaczy i operatorów wyznaczono z następujących wyrażeń:  $Z = fact \sum_{g \in M'} Z^g$ , natomiast  $O = fact \sum_{g \in M'} O^g$ , gdzie  $fact$  jest współczynnikiem określającym dostępność pracowników obu rodzajów w okresie planowania.

Łatwo zauważyć, że jeśli  $fact = 100\%$ , to w dowolnym momencie można wykonać dowolny podzbiór zadań wykonywanych na różnych modułach, ponieważ dostępnych jest wystarczająco dużo pracowników. Mniejsze wartości  $fact$  wymagają uwzględnienia ograniczonej liczby pracowników w planowaniu produkcji. Przeprowadzono badania eksperymentalne dla wartości  $fact \in \{50\%, 75\%\}$ .

Wszystkie algorytmy zostały zakodowane w języku C++ i zostały uruchomione na jednym rdzeniu komputera z procesorem Intel I7 2,4 GHz, 8 GB pamięci RAM, w systemie Windows 8.1. W początkowym rozwiązaniu algorytmów wszystkie zadania były realizowane pierwszym sposobem w kolejności zgodnej z ich numerami, tj.  $a_j = 1, j \in J, \pi = (1, 2, \dots, n)$ .

Algorytmy TS i NTS uruchomiono na 1000 iteracji. Długość listy zabronień dla algorytmu TS wynosiła 7, a wartość  $\beta = 0,95$  dla NTS. Algorytm SA uruchomiono 5 razy dla każdej instancji.

Dla każdego algorytmu i każdej instancji zebrano następujące dane:

- $C_{\max}(\pi^A) - \pi^A$  jest najlepszym rozwiązaniem znalezionym przez algorytm  $A \in \{DS, SA, TS, NTS\}$ ,
- $CPU(A)$  - czas wykonania algorytmu  $A$ .

Jakość rozwiązań generowanych przez algorytmu została oceniona za pomocą względnej różnicy ( $RD$ ) pomiędzy wartością funkcji celu rozwiązania wygenerowanego przez algorytm oraz wartości referencyjnej tj.

$$RD(A) = \frac{C_{\max}(\pi^A) - C^*}{C^*} \cdot 100\%, \quad (5.11)$$

gdzie  $C^*$  jest wartością funkcji celu najlepszego rozwiązania znalezionego podczas badań dla danej instancji. W przypadku algorytmu SA wyznaczono najlepszą wartość  $RD$  oraz średnią dla pięciu uruchomień.

Z prezentowanych w tabeli 5.3 rezultatów eksperymentu wynika, że zaproponowany algorytm *NTS* generuje istotnie lepsze rozwiązania od algorytmów opartych na klasycznych metodach konstruowania algorytmów przeszukiwań lokalnych. Średnia wartość RD dla tego algorytmu wynosi 0,44 i jest przeszło dwukrotnie mniejsza od RD algorytmu *TS* i blisko 10 krotnie mniejsza od RD pozostałych algorytmów.

Należy zauważyć, że algorytm *NTS* jest znacznie bardziej wydajny dla instancji z  $fact = 75\%$ . Dla tej grupy RD algorytmu *NTS* wynosi 0,16 i jest ponad 3 razy mniejszy niż RD algorytmu *TS*, który wynosi 0,66. Wykazuje to, że zastosowanie mechanizmu neuronowego znacznie zwiększa efektywność algorytmu przeszukiwania tabu dla przypadków, w których dostępnych jest wielu pracowników, tj. liczba zadań na ścieżce krytycznej jest niewielka.

Wartość RD algorytmu *DS* wynosi od 0 do 10% i średnio wynosi 4,83 % dla wszystkich instancji. Biorąc pod uwagę zasadę działania algorytmu, dochodzimy do wniosku, że rozważany problem optymalizacyjny charakteryzuje się występowaniem wielu lokalnych minimów, które średnio oddalone są ok 10 % (pod względem wartości funkcji celu) od optymalnych rozwiązań. Dla grupy  $fact = 50\%$  średnia wartość RD wynosi 6,5 %.

Algorytm *SA* reprezentuje algorytmy, w których sąsiedztwo jest losowo próbkowane. Wysoka skuteczność tej metody potwierdzona w przypadku wielu problemów szeregowania zadań, niestety nie została potwierdzona w przypadku badań przeprowadzonych dla rozpatrywanego problemu. Wartość RD algorytmu *SA* wynosi od 0 do 11,5%, wynosi średnio 5,32 % i jest gorsza niż wartość RD algorytmu *DS*. Wielokrotne uruchomienie algorytmu *SA* nieznacznie poprawia jakość uzyskanych rozwiązań. Średnia wartość RD wyliczona dla najlepszego rozwiązania wygenerowanego przez 5-krotne uruchomienie algorytmu *SA*, wynosi od 0 do 11 % i średnio wynosi 4,23 %.

Czas działania algorytmów dla największych z testowanych instancji nie przekraczał 10 minut.

Tabela 5.3: Wyniki obliczeń

$m$	$n$	$DS$	min $SA$	ave $SA$	$TS$	$NTS$
dostępność pracowników 75%						
5	10	6.2	0.34	1.42	0.34	1.11
5	20	2.18	0	0.68	0	0
5	50	2.81	5.73	7.08	0.19	0
5	100	2.91	9.6	11.26	1.77	0.1
10	10	4.42	0	0	1.02	0
10	20	5.71	0	0	0	0
10	50	1.8	1.98	2.63	0	0
10	100	2.56	8.69	10.29	1.04	0
20	20	4.97	1.31	2.03	2.51	0.53
20	50	0	0	0	0	0
20	100	1.06	3.85	5.71	0.36	0
dostępność pracowników 50%						
5	10	10.01	0.86	2.87	2.31	0
5	20	6.08	4.2	5.11	2.13	0.35
5	50	4.32	7.42	8.18	3.01	0
5	100	4.48	10.32	11.26	2.9	0
10	10	7.81	0	1.43	0.56	1.11
10	20	8.53	2.89	5.17	0.61	1.29
10	50	5.48	7.79	9.12	0.46	0.44
10	100	3.32	10.99	11.58	1.01	0.55
20	20	8.41	0	0.63	0	1.28
20	50	6.9	7.37	9.51	0	1.89
20	100	6.29	9.82	11.2	0.15	1.12
Średnio		4.83	4.24	5.33	0.93	0.44
odch. stand.		4.49	4.36	4.61	1.66	1.09

Każda liczba jest średnią wyliczoną dla 5-ciu instancji

## Rozdział 6

# Charakterystyka systemu produkcyjnego, dla którego zostanie przeprowadzona weryfikacja metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich

W niniejszym rozdziale zostanie scharakteryzowany system produkcyjny przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach oraz proces produkcji metalowych stelaży siedzisk samochodowych (tzw. korpusów siedzeń). W dalszej części pracy, wybrana grupa produktów DOPEL należąca do projektu T6 (Volkswagen Transporter) oraz dane na temat tego procesu produkcyjnego posłużą do weryfikacji opracowanej metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich.

## 6.1 Ogólna charakterystyka przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o.

Przedsiębiorstwo Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach należy do koncernu Volkswagen i specjalizuje się w produkcji metalowych stelaży siedzisk samochodowych, tzw. korpusów siedzeń. Firma powstała w 1998 roku w Polkowicach na terenie Legnickiej Specjalnej Strefy Ekonomicznej. Obecnie przedsiębiorstwo posiada 3 zakłady produkcyjne oraz 2 działy badań i rozwoju (B+R) we Wrocławiu oraz w Polkowicach.

- Zakład produkcyjny Brose Sitech Sp. z o.o. Polkowice powstał 1998 roku i jest najstarszym oraz największym z zakładów przedsiębiorstwa. Pracuje w nim około 1600 osób. Produkowane są w nim metalowe stelaże siedzeń samochodowych, a sam zakład wyposażony jest w nowoczesne urządzenia spawalnicze i lakiernicze oraz tłocznię. Dodatkowo w zakładzie w Polkowicach znajduje się centrum kompetencji, gdzie budowane są prototypy oraz rozwijane własne struktury.
- Zakład produkcyjny Brose Sitech Sp. z o.o. Głogów otwarty został w 2013 roku w odległości 25 km od zakładu Polkowice i zatrudnia około 200 osób. Produkowane są w nim części siedzisk do samochodów takich marek jak: Volkswagen, Audi, Skoda. Planowane jest również wdrożenie nowej technologii, opartej na pracy robotów, automatów spawalniczych i własnej lakierni.
- Zakład produkcyjny Brose Sitech Sp. z o.o. Września jest najnowszym z zakładów przedsiębiorstwa. Istnieje od 2016 roku i zatrudnia około 150 osób. Produkowane są w nim kompletne fotele dla nowego samochodu Volkswagen Crafter w systemie Just in Sequence (produkty są dostarczane w wyznaczonym czasie i w odpowiedniej kolejności na linię produkcyjną).

Na rysunku 6.1 zostały przedstawione przykładowe produkty - struktury metalowe oraz kompletne siedziska produkowane przez przedsiębiorstwo. Rocznie przedsiębiorstwo Brose Sitech Sp. z o.o. produkuje 10 800 000 metalowych struktur (korpusów siedzeń), które trafiają do odbiorców na całym świecie: Niemcy, Rosja, Chiny, Hiszpania, Czechy, Argentyna, RPA, Słowacja, Belgia oraz Polska.



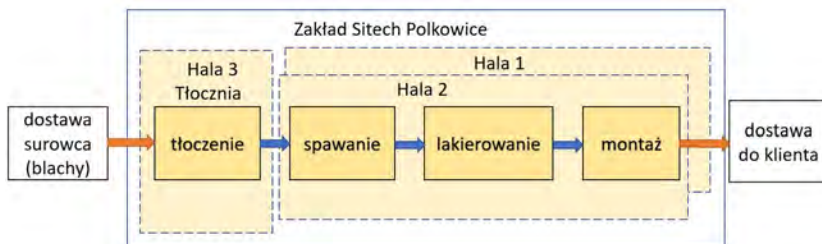
Rysunek 6.1: Produkty produkowane w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp. z o.o. [153]

## 6.2 Charakterystyka głównych procesów produkcyjnych w Zakładzie Brose Sitech sp. z o.o. w Polkowicach

Zakład Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach jest największym z zakładów, a produkowane w nim metalowe stelaże siedzisk samochodowych (tzw. korpusy siedzeń) charakteryzują się dużą złożonością produkcyjną. W zakładzie znajdują się trzy hale produkcyjne o numerach I, II oraz III. Halę III zajmuje dział Tłocznia, z której wytłoczone elementy trafiają na hale I i II celem wykonania operacji spawania, lakierowania oraz montażu. Główne etapy procesu produkcyjnego przedstawione zostały na rysunku 6.2.

Pierwszym etapem jest dostarczenie blachy o odpowiednich parametrach, z której następnie wytłaczane są elementy do produkcji. Blacha dostarczana jest w formie zwiniętych rolek przez firmy zewnętrzne kilka razy w tygodniu. W celu zapewnienia stałego dostępu do surowca oraz racjonalnego zarządzania powierzchnią składowania dział Gospodarki Materiałowej, odpowiedzialny za dostarczenie blachy do procesu produkcyjnego, utrzymuje dwudniowy zapas blachy.

Tłocznia, zajmująca halę produkcyjną nr III o powierzchni  $11\ 000\ m^2$ , została wyposażona w 12 pras (9 pras transferowych i 3 prasy postępowe), na których tłoczone są części do montażu wszystkich wyrobów wytwarzanych na halach I i II. Prasy mają wymienne elementy tłoczące, dzięki czemu mogą być przystosowane do tłoczenia różnych części i w zależności od potrzeb jedna prasa może zastąpić drugą. Przeciwdziała to opóźnieniom w realizacji zamówienia w przypadku awarii któreś z pras. Prasy mają siłę nacisku pomiędzy 200, a 2600 ton i dziennie wytwarzają 260 000 części z 156 ton blachy stalowej. Rysunek 6.3 przedstawia zdjęcie wyrobu na prasach.



Rysunek 6.2: Główne etapy procesu produkcyjnego w Zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach



Rysunek 6.3: Zdjęcie produkowanego wyrobu na hali III (Tłocznia) [153]

Wytłoczone komponenty konstrukcji trafiają do drugiego etapu procesu produkcyjnego na halę I lub II na operacje spawania i zgrzewania. Dział Spawania, odpowiedzialny za nadzór tych operacji, stosuje techniki takie jak zgrzewanie elektryczne oporowe (TIG), spawanie w osłonie gazów (MIG/MAG), spawanie metodą CMT, MicroMig oraz spawanie laserowe. Część operacji spawania wykonywanych jest przez roboty spawalnicze. Jednak z uwagi na duży stopień skomplikowania i złożoność tych operacji, w procesie produkcyjnym znaczna część operacji wykonywana jest ręcznie przez wykwalifikowanych spawaczy. Dziennie w zakładzie spawanych jest 32 000 podzespołów. Rysunek 6.4 przedstawia zdjęcie ręcznego spawania elementów w zakładzie w Polkowicach.



Rysunek 6.4: Zdjęcie operacji spawania ręcznego wyrobu w zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach [153]

W kolejnym, trzecim etapie procesu produkcyjnego, produkowane elementy przechodzą proces lakierowania kataforetycznego (zanurzeniowego), dzięki czemu uzyskana powłoka cechuje się długotrwałym zabezpieczeniem antykorozyjnym. Dziennie na dwóch liniach, zlokalizowanych na halach produkcyjnych I i II, lakierowanych jest ponad 8 000  $m^2$  powierzchni metalowych, co odpowiada 48 000 komponentom. W Lakierni na hali nr II produkty nakładane oraz ściągane są przez specjalistycznego robota. Z kolei Lakiernia znajdująca się na hali I (nazywana KTL) działa w systemie kołowo-karuzelowym. Wszystkie produkty przeznaczone do lakierowania nakładane są ręcznie przez pracowników lakierni na specjalne zawieszki (metalowe uchwyty) umieszczone na wysokości około 2 metrów na szynie transportowej. Rysunek 6.5 przedstawia zdjęcie systemu kołowo-karuzelowego po lakierni na hali nr I (KTL) w zakładzie.

Polakierowane elementy trafiają do ostatniego etapu procesu produkcyjnego na montaż końcowy (Dział Montaż). Główne operacje technologiczne wykonywane w tym dziale to zgrzewanie, szlifowanie i tapicerowanie. Celem tych operacji jest nadanie ostatecznego kształtu wyrobom wysyłanym następnie do klientów. Dziennie zakład w Polkowicach opuszcza 49 000 sztuk wyrobów. Rysunek 6.6 przedstawia zdjęcie jednej z operacji montażu w zakładzie w Polkowicach

Firma działając w systemie Just in Time oraz Just in Sequence dba, aby dana partia wyrobów trafiła do klienta bądź do innego zakładu w ustalonym oknie czasowym, co gwarantuje ciągłość pracy i pozwala na efektywne wykorzystanie zasobów.





Rysunek 6.5: Zdjęcie systemu kołowo-karuzelowego po lakierni na hali nr I (KTL) w zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach [153]



Rysunek 6.6: Zdjęcie przykładowej operacji montażu w zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach [154]

### 6.3 Charakterystyka procesu produkcji grupy wyrobów DOPEL

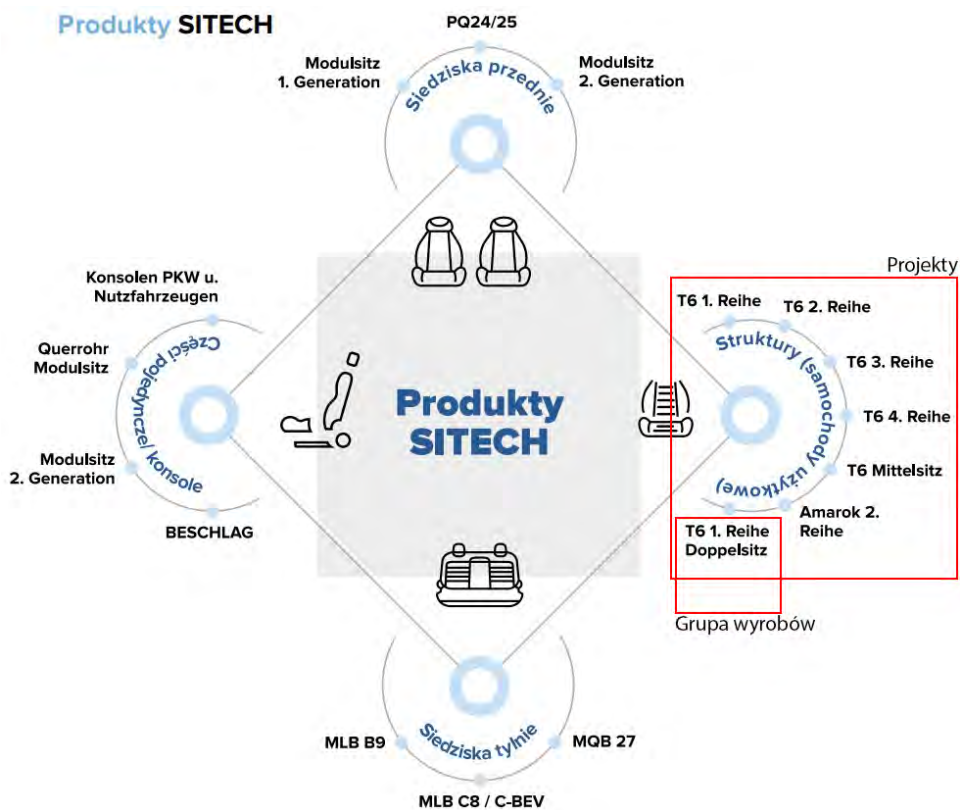
Wszystkie produkty (metalowe korpusy siedzeń samochodowych) produkowane w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach pogrupowane są w tzw. projekty. Na każdy projekt, będący produktem końcowym dla klienta, składa się kilka grup produktów. W przedsiębiorstwie wyróżnia się 4 główne projekty:

- siedziska przednie,
- struktury (samochody użytkowe),
- siedziska tylnie,
- części pojedyncze / konsole.

W skład każdego z projektów wchodzi grupa produktów. Grupa produktów zawiera kilka podobnych technologicznie wyrobów produkowanych na tych samych stanowiskach roboczych bez konieczności ich przezbrajania (w tzw. modułach produkcyjnych). Proces wytwórczy poszczególnych wyrobów, wchodzących w skład grupy produktów, różni się jedną bądź kilkoma operacjami technologicznymi. Ten umowny sposób podziału produktów, przyjęty przez przedsiębiorstwo, na projekty i grupy wyrobów, składających się na dany projekt przedstawia rysunek 6.7.

W dalszej części niniejszej rozprawy doktorskiej szczegółowej analizie poddana zostanie grupa wyrobów T6 1. Reihe Doppelsitz (tzw. DOPEL), należąca do projektu Struktury (samochody użytkowe), zawierającego metalowe struktury siedzeń przeznaczonych do samochodów Volkswagen Transporter. Natomiast w skład całego projektu T6 wchodzi następujące grupy produktów:

- BFSK LL,
- BFSK RL,
- BFSK RL + BHB,
- DOPEL LL\_V1,
- DOPEL LL\_V2,
- DOPEL R\_V1,
- DOPEL RL\_V2,
- FSK LL + BHB,
- FSK LL,
- FSK RL,
- Langstrager 3TT,



Rysunek 6.7: Projekty i grupy produktów produkowanych w zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach [154]

- Langstrager 4,
- Lehne 1 STAUFACH,
- Lehne 1,
- Lehne 2 LL Isofix (automat),
- Lehne 2 LL Isofix + Armlena (automat),
- Lehne 2 RL Isofix,
- Lehne 3,
- Lehne 4,
- Lehne GP (li, re),
- Lehne GP z 2 Armlenami (li, re),
- Unterbau 2 LL + Gegenlager,
- Unterbau 2 LL TT,
- Unterbau 2 RL TT + Gegenlager,

- Unterbau 2 RL TT.

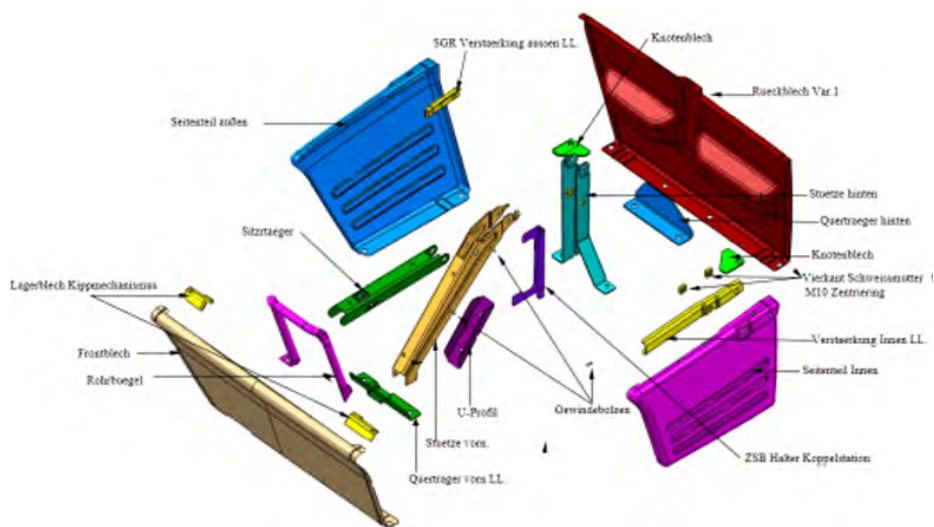
W dalszej części pracy na grupie wyrobów DOPEL zostanie przeprowadzona weryfikacja opracowanej metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. W skład grupy wyrobów T6 1. Reihe Doppelsitz (DOPEL) wchodzi 4 wyroby:

- DOPEL LL\_V1,
- DOPEL LL\_V2,
- DOPEL RL\_V1,
- DOPEL RL\_V2,

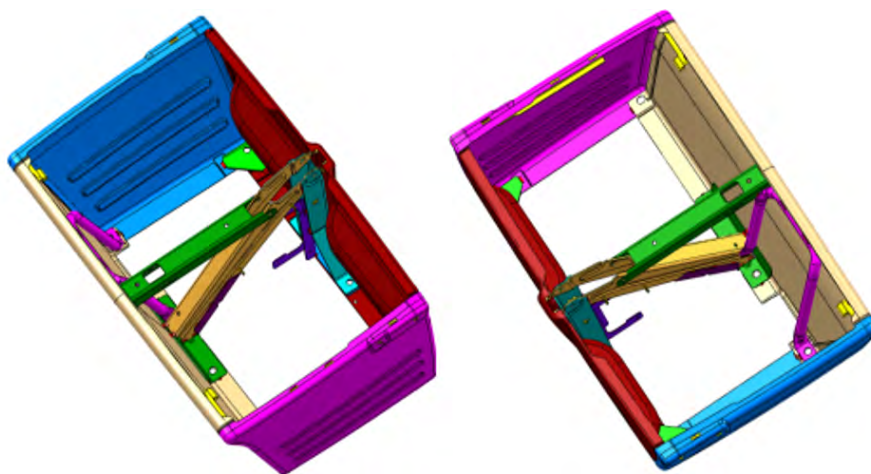
gdzie:

- LL oznacza wersję lewą,
- LL oznacza wersję prawą,
- V1 oznacza wersję europejską,
- V2 oznacza wersję amerykańską.

Produkcja poszczególnych wyrobów grupy DOPEL różni się między sobą pojedynczymi operacjami, dlatego też wykonywana jest w tym samym module produkcyjnym. Na rysunkach 6.8, 6.9 oraz 6.10 przedstawiono rysunek montażowy, schemat oraz korpus ze stelażem (skrzynią) wyrobu DOPEL w wersji RL\_V1.



Rysunek 6.8: Części potrzebne dla wyrobu Dopel RL\_V1



Rysunek 6.9: Schemat wyrobu DOPEL RL\_V1



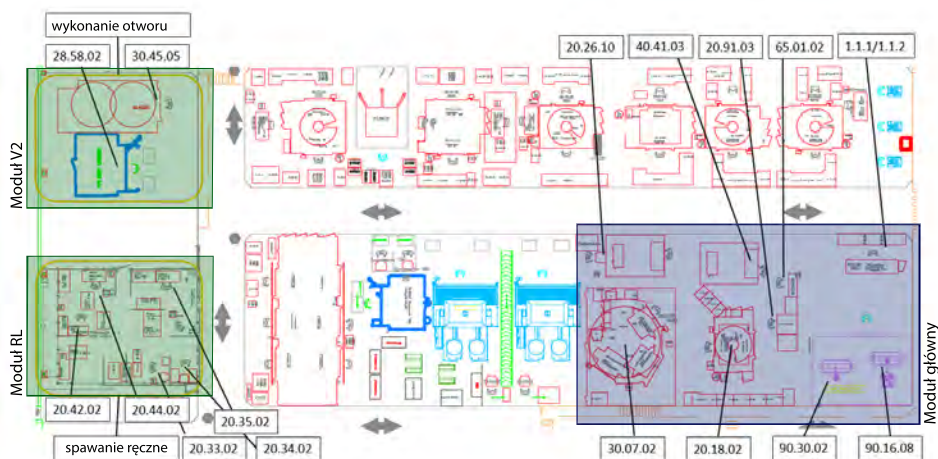
Rysunek 6.10: Wnętrze siedzenia samochodowego oraz siedzenie ze stelażem (skrzynią) DOPEL RL\_V1

Na rysunku 6.11 przedstawiono fragment hali II z oznaczonymi stanowiskami roboczymi do produkcji wyrobów grupy DOPEL. Większość stanowisk roboczych na hali produkcyjnej pogrupowanych jest w tzw. moduły produkcyjne. W modułach produkcyjnych wytwarza się wyroby z danej grupy produktów, dzięki czemu nie ma konieczności przezbierania stanowisk roboczych lub czas przebrojeń skrócony jest do minimum.

Grupa produktów DOPEL produkowana jest w trzech modułach produkcyjnych (widocznych na rysunku 6.11), w tzw. module głównym, module RL oraz module V2. Ponieważ moduły te znajdują się w różnych częściach hali produkcyjnej, konieczny jest transport elementów pomiędzy modułami. Z kolei w tabeli 6.1 przedstawiono wykorzystanie poszczególnych wyrobów grupy DOPEL w modułach produkcyjnych, widocznych na rysunku 6.11.

Tabela 6.1: Wykorzystanie poszczególnych wyrobów grupy DOPEL w modułach produkcyjnych

Produkt	Moduł główny	Moduł V2 dodatkowy otwór	Moduł RL spawanie ręczne
LL V1	tak	nie	nie
LL V2	tak	tak	nie
RL V1	tak	nie	tak
RL V2	tak	tak	tak



Rysunek 6.11: Fragment hali produkcyjnej II na którym produkowana jest grupa wyrobów DOPEL

W tabeli 6.3 przedstawiono wykaz operacji technologicznych oraz stanowisk roboczych, na których są wykonywane wyroby grupy DOPEL, natomiast w tabelach 6.2, 6.6, 6.5, 6.4 przedstawiono poszczególne operacje technologiczne, ich czasy jednostkowe oraz stanowiska, na których są wykonywane dla czterech wyrobów grupy produktu DOPEL (LL\_V1, LL\_V2, RL\_V1 i RL\_V2).

Jak wspomniano powyżej, w przypadku analizowanej grupy wyrobów DOPEL konieczny jest transport elementów na stanowiska umiejscowione w różnych częściach hali.

Tabela 6.2: Wykaz operacji technologicznych dla wyrobu DOPEL LL\_V1

Nr	Nazwa operacji	Stanowisko	Czas [sec]	Pracownik	w*
1	Zgrzewanie wzmocnienia wewnętrznego	1.1.1	13	operator	1
2	Zgrzewanie oparcia tylnego	1.1.2	22	operator	1
3	Spawanie części DOPEL	20.26.10	99	operator	1
4	Spawanie ramy siedziska	30.07.02	136	spawacz	1
5	Zgrzewanie ramy siedziska	20.18.02	136	operator	1
6	Spawanie ręczne DOPEL	20.91.03	136	spawacz	1
7	Szlifowanie	65.01.02	96	operator	1
8	Tuckowanie DOPEL	40.41.03	46	operator	1
9	Kontrola jakości	90.16.08	23	operator	1
10	Pakowanie	90.30.02	136	operator	1

w\* - liczba pracowników wykonujących daną operację

Tabela 6.4: Wykaz operacji technologicznych dla wyrobu DOPEL RL\_V2

Nr	Nazwa operacji	Stanowisko	Czas [sec]	Pracownik	w*
1	Spawanie ręczne 1 części bocznej zewnętrznej	20.43.02	30	spawacz	1
2	Spawanie ręczne 2 części bocznej zewnętrznej	20.44.02	28	spawacz	1
3	Spawanie ręczne U-Profil	20.35.02	33	spawacz	1
4	Spawanie ręczne oparcia przedniego	20.33.02	36	spawacz	1
5	Spawanie ręczne oparcia tylnego	20.34.02	61	spawacz	1
6	Zgrzewanie wzmocnienia wewnętrznego	1.1.1	13	operator	1
7	Zgrzewanie oparcia tylnego	1.1.2	22	operator	1
8	Cięcie przegrody	20.58.02	52	spawacz	1
9	Szlifowanie przegrody	30.45.05	42	spawacz	1
10	Spawanie części DOPEL	20.26.10	99	operator	1
11	Spawanie ramy siedziska	30.07.02	136	spawacz	1
12	Zgrzewanie ramy siedziska	20.18.02	136	operator	1
13	Spawanie ręczne DOPEL	20.91.03	136	spawacz	1
14	Szlifowanie	65.01.02	96	operator	1
15	Tuckowanie DOPEL	40.41.03	46	operator	1
16	Kontrola jakości	90.16.08	23	operator	1
17	Pakowanie	90.30.02	136	operator	1

w\* - liczba pracowników wykonujących daną operację



Tabela 6.3: Wykaz wszystkich operacji technologicznych dla wyrobów grupy DOPEL

Nr	Nazwa operacji	Stanowisko	Czas [sec]	Pracownik	w*
1	Zgrzewanie wzmocnienia wewnętrznego	1.1.1	13	operator	1
2	Zgrzewanie oparcia tylnego	1.1.2	22	operator	1
3	Spawanie ręczne 1 części bocznej zewnętrznej	20.43.02	30	spawacz	1
4	Spawanie ręczne 2 części bocznej zewnętrznej	20.44.02	28	spawacz	1
5	Spawanie ręczne U-Profil	20.35.02	33	spawacz	1
6	Spawanie ręczne oparcia przedniego	20.33.02	36	spawacz	1
7	Spawanie ręczne oparcia tylnego	20.34.02	61	spawacz	1
8	Cięcie przegrody	20.58.02	52	spawacz	1
9	Szlifowanie przegrody	30.45.05	42	spawacz	1
10	Spawanie części DOPEL	20.26.10	99	operator	1
11	Spawanie ramy siedziska	30.07.02	136	spawacz	1
12	Zgrzewanie ramy siedziska	20.18.02	136	operator	1
13	Spawanie ręczne DOPEL	20.91.03	136	spawacz	1
14	Szlifowanie	65.01.02	96	operator	1
15	Tuckowanie DOPEL	40.41.03	46	operator	1
16	Kontrola jakości	90.16.08	23	operator	1
17	Pakowanie	90.30.02	136	operator	1

w\* - liczba pracowników wykonujących daną operację

Na rysunku 6.12 zamieszczono szczegółowy schemat przepływów poszczególnych wyrobów wchodzących w skład grupy wyrobów T6 1. Reihe Doppelsitz (DOPEL). Przedstawiono również sposób transportu elementów pomiędzy stanowiskami roboczymi oraz wielkości buforów przystanowiskowych.

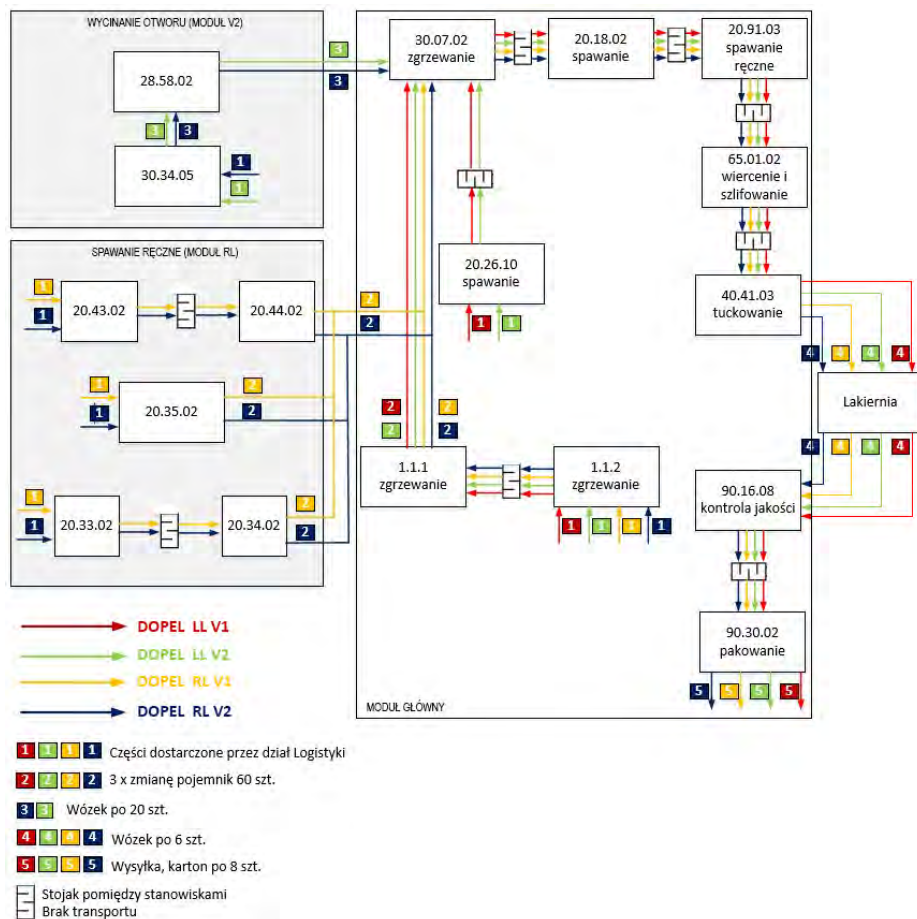
Jak widać na rysunku 6.12 wyrób LL\_V1 wykonywany jest w całości w module głównym, natomiast wykonanie pozostałych wyrobów wymaga transportu części do innej części hali produkcyjnej.

Wyroby V2 (LL\_V2 oraz RL\_V2) wymagają wykonania dodatkowego otworu na stanowiskach roboczych 28.58.02 oraz 30.45.05 w module V2.

Tabela 6.5: Wykaz operacji technologicznych dla wyrobu DOPEL RL\_V1

Nr	Nazwa operacji	Stanowisko	Czas [sec]	Pracownik	w*
1	Spawanie ręczne 1 części bocznej zewnętrznej	20.43.02	30	spawacz	1
2	Spawanie ręczne 1 części bocznej zewnętrznej	20.44.02	28	spawacz	1
3	Spawanie ręczne U-Profil	20.35.02	33	spawacz	1
4	Spawanie ręczne oparcia przedniego	20.33.02	36	spawacz	1
5	Spawanie ręczne oparcia tylnego	20.34.02	61	spawacz	1
6	Zgrzewanie wzmocnienia wewnętrznego	1.1.1	13	operator	1
7	Zgrzewanie oparcia tylnego	1.1.2	22	operator	1
8	Spawanie ramy siedziska	30.07.02	136	spawacz	1
9	Zgrzewanie ramy siedziska	20.18.02	136	operator	1
10	Spawanie ręczne DOPEL	20.91.03	136	spawacz	1
11	Szlifowanie	65.01.02	96	operator	1
12	Tuckowanie DOPEL	40.41.03	46	operator	1
13	Kontrola jakości	90.16.08	23	operator	1
14	Pakowanie	90.30.02	136	operator	1

w\* - liczba pracowników wykonujących daną operację



Rysunek 6.12: Layout i schemat przepływu materiałów pomiędzy stanowiskami dla wyrobów grupy DOPEL

Natomiast wyroby RL (RL\_V1 oraz RL\_V2) wymagają spawania ręcznego składającego się z 5-ciu operacji w module RL. Wyrób RL\_V2 wymaga transportu części między wszystkimi trzema modułami składowymi.

Pomiędzy stanowiskami, które rozmieszczone są blisko siebie, stosowane są specjalne stojaki do transportu elementów. Natomiast na stanowiska zlokalizowane w większej odległości od siebie, elementy są transportowane w pojemnikach o odpowiedniej pojemności przy pomocy wózków transportowych. W procesie montażu stosuje się bufory przystanowiskowe wielkości maksymalnie kilkunastu sztuk. Wewnątrz procesu nie ma możliwości produkcji „na zapas”, a po wykonaniu operacji na danej części musi ona zostać niemal natychmiast przekazana na kolejne stanowisko robocze.

## 6.4 Sposób planowania pracy i harmonogramowania produkcji w procesie produkcji wyrobu DOPEL

W zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach harmonogram produkcji sporządzany jest raz w tygodniu przez Dział Logistyki i Dział Planowania i Rozwoju Technologii. Dział Logistyki w oparciu o zamówienia klientów, możliwości produkcyjne oraz stany magazynowe tworzy zestaw zamówień dziennych na dany tydzień. Dział Planowania i Rozwoju Technologii odpowiada za oszacowanie czasu potrzebnego na wykonanie zadanego planu produkcyjnego oraz obliczenie zapotrzebowania na personel w oparciu o czasy poszczególnych operacji produkcyjnych i zależności między procesami produkcyjnymi poszczególnych wyrobów oraz projektów. Pod uwagę brane są również aktualne utrudnienia raportowane przez Dział Produkcji. Rysunek 6.13 przedstawia schemat procesu planowania produkcji w przedsiębiorstwie.



Rysunek 6.13: Schemat planowania produkcji w przedsiębiorstwie

Większość danych pochodzi z systemu informatycznego ERP, natomiast szczegółowy harmonogram produkcji sporządzany jest przez pracowników Działu Logistyki w arkuszu kalkulacyjnym Excel. Szczegółowe harmonogramy realizacji poszczególnych zadań produkcyjnych dla zmiany produkcyjnej układane są bezpośrednio na hali produkcyjnej przez brygadzystów przed rozpoczęciem zmiany. Następuje tutaj przydzielenie pracowników do zadań produkcyjnych oraz przesuwanie ich pomiędzy stanowiskami w zależności od bieżących potrzeb. W procesie produkcji operacje realizowane są przez 2 rodzaje zasobów ludzkich (pracowników):

1. spawaczy - wykonujących operacje spawania i posiadających kompetencje do wykonywania pozostałych operacji technologicznych spawania,
2. operatorów - mogących wykonywać pozostałe operacje technologiczne za wyjątkiem operacji spawania.

Tabela 6.6: Wykaz operacji technologicznych dla wyrobu DOPEL LL\_V2

Nr	Nazwa operacji	Stanowisko	Czas [sec]	Pracownik	w*
1	Zgrzewanie wzmocnienia wewnętrznego	1.1.1	13	operator	1
2	Zgrzewanie oparcia tylnego	1.1.2	22	operator	1
3	Cięcie przegrody	20.58.02	52	spawacz	1
4	Szlifowanie przegrody	30.45.05	42	spawacz	1
5	Spawanie części DOPEL	20.26.10	99	operator	1
6	Spawanie ramy siedziska	30.07.02	136	spawacz	1
7	Zgrzewanie ramy siedziska	20.18.02	136	operator	1
8	Spawanie ręczne DOPEL	20.91.03	136	spawacz	1
9	Szlifowanie	65.01.02	96	operator	1
10	Tuckowanie DOPEL	40.41.03	46	operator	1
11	Kontrola jakości	90.16.08	23	operator	1
12	Pakowanie	90.30.02	136	operator	1

w\* - liczba pracowników wykonujących daną operację

Liczba pracowników jest najczęściej mniejsza niż liczba stanowisk roboczych, w związku z tym pracownicy obsługują kilka stanowisk. Z powodu wysokich kosztów pracy ważne jest, aby liczba pracowników oraz czas ich przejść między stanowiskami były jak najmniejsze. Jednak, aby zminimalizować ryzyko niewykonania harmonogramu produkcyjnego, np. w wyniku absencji pracownika w danym dniu pracy, przy budowie harmonogramów, zakłada się 8% bufor czasowy.

W kolejnej sekcji przedstawiony zostanie obecnie stosowany w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp. z o.o. sposób obliczania zapotrzebowania na personel oraz przykład obliczeniowy na przyjętym w weryfikacji poziomie analizy KPA1.

## Sposób obliczania zapotrzebowania na pracowników produkcyjnych w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp. z o.o.

Nieefektywne rozplanowanie pracowników produkcyjnych może spowodować niewykonanie planu produkcyjnego dla danej zmiany, co może skutkować dalszymi opóźnieniami, natomiast poprawa któregoś z parametrów np. zmniejszenie czasu potrzebnego na transport części może znacząco poprawić wydajność i przełożyć się na zysk dla firmy.

Zapotrzebowanie na pracowników dla zadanego okresu planowania (najczęściej jednej zmiany) wyznaczane jest na podstawie zbioru zleceń wykonywanych w tym okresie. Niech  $N = \{1, \dots, n\}$  będzie zbiorem składającym się z  $n$  zleceń produkcyjnych. Dla każdego zlecenia dany jest konkretny produkt oraz liczba sztuk tego produktu, którą należy wyprodukować. Oznaczmy przez  $s_i$  liczbę sztuk produktu  $i \in N$ , przez  $O_i$  podzbiór operacji wykonywanych przez operatora, natomiast przez  $S_i$  podzbiór operacji wykonywanych przez spawaczy. Wykonanie  $j$ -tej operacji w produkcji produktu  $i$  wymaga  $p_{i,j} > 0$  czasu i wymaga  $w_{i,j}$  pracowników (operatorów/spawaczy). Ostatecznie liczbę operatorów wyznaczmy ze wzoru:

$$Z_O = b_p \sum_{i=1}^n \left[ s_i \sum_{j \in O_i} (p_{i,j} w_{i,j}) \right] / t_d \quad (6.1)$$

natomiast liczbę spawaczy wyznaczmy ze wzoru:

$$Z_S = b_p \sum_{i=1}^n \left[ s_i \sum_{j \in S_i} (p_{i,j} w_{i,j}) \right] / t_d \quad (6.2)$$

gdzie:

- $t_d$  – czas pracy pracownika w danym dniu [min],
- $b_p$  – bufor pracowników.

Otrzymany wynik zaokrąglany jest w górę do liczby całkowitej.

We wzorach (6.1) i (6.2) dla wszystkich wyrobów zsumowane zostają czasy wszystkich operacji, dla których potrzebny jest dany pracownik (spawacz/operator) i pomnożone przez liczbę produkowanych sztuk danego wyrobu. Wynik ten następnie podzielony jest przez dzienny czas pracy pracownika oraz pomnożony przez tzw. bufor pracowników tj. 1.08, czyli wstępnie wyliczone zapotrzebowanie na pracowników z uwzględnieniem 8% zapasu.

## Przykład obliczania zapotrzebowania na pracowników produkcyjnych

W tabeli 6.2 przedstawiono listę wszystkich operacji produkcyjnych wykonywanych przy produkcji produktu DOPEL LL\_V1. Lista zawiera nazwę operacji, numer stanowiska, czas operacji oraz typ i liczbę pracowników przyporządkowanych dla każdej z nich. Należy rozpatrzyć wyznaczenie zapotrzebowania na operatorów i spawaczy w przypadku produkcji 184 sztuk produktu DOPEL LL\_V1.

Zapotrzebowanie na pracowników produkcyjnych dla tego przykładu wyznaczane jest przez dział Planowania i Rozwoju Technologii w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp. z o.o. w następujący sposób:

1. zsumowanie czasów operacji dla jednej sztuki produktu: 4,53 minut (spawacz) oraz 9,52 minut (operator),
2. po pomnożeniu czasu przez liczbę sztuk zaplanowanych do wyprodukowania wynoszącą 184 sztuki wyrobu otrzymano 833,52 minut pracy spawacza oraz 1751,68 minuty pracy operatora,
3. czas ten zostaje podzielony przez 420 (dzienny czas pracy pracownika w minutach),
4. otrzymane wyniki 1,98 (spawacz), 4,17 (operator), przedstawiające liczbę pracowników potrzebnych na danej zmianie, zostają pomnożone przez 1,08, aby zapewnić ciągłość pracy w przypadku choroby pracownika bądź innych wypadków losowych (tzw. bufor czasowy wielkości 8% stosowany w Zakładzie),
5. ostateczne wyniki: 2,14 (spawacz), 4,5 (operator) zostają zaokrąglony w górę. Finalnie zapotrzebowanie na spawaczy na danej zmianie w danym projekcie wynosi 3 osoby, a zapotrzebowanie na operatorów 5 osób.

Pracą na danej zmianie zarządza brygadzista, który na bieżąco w trakcie trwania zmiany produkcyjnej w zależności od bieżących potrzeb, przydziela pracowników do zaplanowanych zadań. Proces ten realizowany jest jedynie w oparciu o doświadczenie brygadzisty, który nie ma dostępu do systemów informatycznych, a posługuje się:

1. obliczonym przez Dział Planowania i Rozwoju Technologii zapotrzebowaniem na personel,
2. przygotowanym przez Dział Logistyki planem produkcji,
3. faktyczną liczbą dostępnych pracowników,

4. znajomością procesu produkcyjnego, w tym kolejnością operacji, czasem ich trwania i dostępnością stanowisk roboczych,
5. informacjami dotyczącymi dostępności maszyn współdzielonych między grupami wyrobów oraz innych utrudnień,
6. możliwością rozłożenia przerw,
7. wielkością buforów między stanowiskami,
8. dostępności części z tłoczni,
9. stanem obciążenia lakierni oraz
10. informacją o problemach i o niezbędnych czynnościach poza procesowych.

Przy układaniu szczegółowych harmonogramów pracy na zmianie brygadzista musi zapewnić wykonanie harmonogramów produkcji, ale jest on również zobowiązany do kierowania się przy tym kryterium kosztowym. Pracownik będący spawaczem może wykonywać te same operacje, co operator, jednak jest zasobem znacznie droższym ze względu na wysoki poziom kwalifikacji. Natomiast operator nie może wykonywać operacji spawania z uwagi na brak kompetencji.

W przypadku zwiększonych potrzeb produkcyjnych bądź niespodziewanych przestoju spowodowanych np. awariami, istnieje możliwość uruchomienia zmian weekendowych. Jednak takie rozwiązanie skutkuje wzrostem kosztów produkcji, gdyż za pracę w weekendy pracownicy produkcyjni otrzymują większe wynagrodzenie. Dlatego w kolejnym rozdziale pracy (rozdział 7) zostanie zweryfikowana zaproponowana w tej pracy metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich. Główny problem, który będzie można rozwiązać przy pomocy tej metodyki, to wyznaczenie harmonogramu produkcji, w którym dla zadanej liczby zasobów ludzkich czas realizacji zlecenia produkcyjnego będzie możliwie najkrótszy.



## Rozdział 7

# Weryfikacja metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich

W rozdziale tym zostanie przeprowadzona weryfikacja praktyczna metodyki harmonogramowania produkcji w oparciu o optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich, której główne etapy przedstawiono w rozdziale 4. Poszczególne etapy zaproponowanej metodyki zostaną przedstawione i zweryfikowane na danych pochodzących z przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach. Za przykład posłuży proces produkcji grupy wyrobów T6 1. Reihe Doppelsitz (DOPEL), którego opis i charakterystyka znajdują się w rozdziale 6 pracy. Na grupę wyrobów DOPEL zdecydowano się ze względu na stosunkowo wysoki stopień skomplikowania procesu produkcyjnego.

Celem zaproponowanej w niniejszej pracy metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich opartej na metodach inteligentnych z uwzględnieniem takich kryteriów optymalizacyjnych jak minimalna liczba pracowników lub minimalny czas realizacji zadań produkcyjnych z uwzględnieniem kompetencji pracowników jest możliwość szybkiego wygenerowania takiego harmonogramu produkcji, który możliwy będzie do realizacji w jak najkrótszym czasie przy wykorzystaniu danych zasobów ludzkich. Ponadto zaproponowany w pracy algorytm w sposób automatyczny przyporządkuje zasoby ludzkie (operatorów i spawaczy) do realizacji poszczególnych zadań harmonogramu produkcji.

Obecnie przyporządkowanie takie wykonywane jest przez brygadzystów bezpośrednio na liniach produkcyjnych, a więc nie zawsze w sposób optymalny.

### **Etap 1. Określenie poziomu analizy, wybór wyrobów i ustalenie wielkości partii produkcyjnych**

Za przykład wybrano proces produkcji grupy wyrobów DOPEL. Ustalono, że poziomem analizy, na którym prowadzona będzie weryfikacja opracowanej metodyki, będzie poziom KPA1, czyli poziom gniazd produkcyjnych. Weryfikacja zostanie szczegółowo omówiona dla produktów grupy DOPEL, przeprowadzona natomiast zostanie dla zestawu 27 produktów, należących do różnych grup produktów w obrębie jednego projektu, co odpowiada realnym warunkom pracy. Za partię produkcyjną przyjęto trzy-zmianowy tygodniowy plan produkcyjny dla zestawu 27 produktów przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o.

### **Etap 2. Zebranie danych na temat zasobów produkcyjnych oraz procesu produkcyjnego**

Wszystkie dane na temat procesu zostały zebrane w czasie ośmiu jedno bądź kilkudniowych wizyt w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp.z o.o. w zakładzie Polkowice w latach 2017 - 2019. Na potrzeby realizacji celu pracy pozyskano również dane z systemu ERP przedsiębiorstwa oraz dzięki współpracy z działem Logistyki oraz działem Planowania i Rozwoju Technologii pozyskano szczegółowe informacje na temat:

- charakterystyki przedsiębiorstwa oraz zakładu Polkowice,
- charakterystyki głównych procesów produkcyjnych oraz systemu produkcyjnego (działy Tłocznia, Lakiernia, Spawalnia, Montaż, Utrzymanie Ruchu),
- produkowanych wyrobów, grup wyrobów oraz projektów,
- zamówień klientów oraz sposobie generowania zamówień wewnętrznych,
- sposobu obliczania zapotrzebowania na personel oraz
- stanowisk roboczych, gniazd produkcyjnych i procesów wytwórczych dla wyrobów grupy DOPEL.

Podczas wizyt w przedsiębiorstwie poprawność i dokładność zebranych danych zostały zweryfikowane przez pracowników Działu Produkcji, jak również poprzez bezpośrednie obserwacje procesu produkcji i pomiary czasów na hali produkcyjnej. Niektóre dane zostały uzupełnione przez pracowników Działu Produkcji o dodatkowe aspekty takie jak np. czynności po-

zaprosesowe czy sposób obsługi nieprzewidywanych zdarzeń. Dzięki pozyskanym danym sporządzono zestawienia dzienne przedsiębiorstwa, mogące zostać użyte w pracy nad weryfikacją metodyki. W rozdziale 6, w tabeli 6.3 zebrano wszystkie czynności technologiczne związane z grupą produktów DOPEL, natomiast w tabelach 6.2, 6.6, 6.5, 6.4 przedstawiono poszczególne operacje technologiczne procesu produkcyjnego poszczególnych wyrobów grupy DOPEL wraz z ich czasami jednostkowymi, przypisanymi stanowiskami roboczymi oraz rodzajem i liczbą pracowników wykonujących dane operacje.

### **Etap 3. Identyfikacja zasobów krytycznych**

Na podstawie danych zebranych w etapie 2. metodyki przeanalizowano stopień obciążenia stanowisk roboczych w trakcie realizacji zleceń produkcyjnych wyrobów grupy DOPEL oraz obciążenie pracowników wykonujących poszczególne operacje technologiczne. Wyniki analiz pokazują, że zasobami ograniczającymi przebieg procesu produkcyjnego są zasoby ludzkie (traktowane w dalszej części pracy jako zasoby krytyczne, które podlegać będą optymalizacji). Natomiast stanowiska robocze nie są w pełni wykorzystane ze względu na ograniczoną liczbę pracowników, co jest spowodowane dwoma czynnikami:

- wartością maksymalnej wydajności produkcyjnej, po osiągnięciu której zwiększenie liczby pracowników nie wpływa na wzrost wydajności procesu produkcyjnego, oraz
- kompromisu między czasem realizacji zlecenia produkcyjnego, a jego kosztem, na który znaczny wpływ ma koszt pracy pracowników.

W analizowanym przedsiębiorstwie koszt pracy spawacza jest dużo wyższy niż koszt pracy operatora, przy czym jest on zasobem niezbędnym w realizacji wybranych operacji montażu (spawania). Wyższy koszt spawacza wynika z jego wyższych kompetencji. Spawacz może wykonywać te same operacje co operator, natomiast operator nie może wykonywać operacji spawania. Analiza zebranych danych w przedsiębiorstwie, pokazuje iż zbyt mała liczba spawaczy spowalnia proces produkcyjny, a zbyt duża generuje koszty nieadekwatne do zrealizowanej wielkości produkcji, co powoduje że proces produkcyjny staje się nieefektywny.

W trakcie obserwacji procesu produkcyjnego i podczas zbierania danych w przedsiębiorstwie zauważono problemy w realizacji harmonogramów produkcyjnych spowodowane absencją pracowników. Problem absencji jest znany w Zakładzie i tak jak pokazano w punkcie 6.4. podczas obliczania zapotrzebowania na personel, aby zabezpieczyć się przed negatywnymi skut-

kami nieoczekiwanej absencji pracownika np. z powodu choroby bądź urlopu na żądanie, przedsiębiorstwo stosuje 8% bufor dla wyliczonego zapotrzebowania. Oznacza to, że na każdej zmianie roboczej zaplanowanych jest 8% więcej pracowników, niż wynika z obliczonego zapotrzebowania. Dzięki temu, w przypadku absencji pracownika plan wciąż może zostać wykonany w zadanym czasie. Niewykorzystany bufor czasowy może zostać odebrany przez pracowników produkcyjnych w tzw. "odbiorze nadgodzin". Jeżeli tygodniowy plan produkcyjny wykonywany jest bez opóźnień, możliwe jest "odebranie" przez pracownika wcześniej wypracowanych nadgodzin i wcześniejsze zakończenie pracy w danym dniu.

Zakłócenia i opóźnienia w realizacji harmonogramu produkcji pojawiają się w przypadku absencji większej liczby pracowników. W tym przypadku decyzje operacyjne związane z przydziałem zasobów ludzkich do poszczególnych operacji technologicznych, bezpośrednio na hali produkcyjnej podejmuje brygadzista. Problem najczęściej rozwiązywany jest poprzez inny sposób przydzielenia pracowników pomiędzy projektami. Przykładowo, brygadzista może skierować pracownika do innego zadania np. do dokończenia pracy poprzedniej zmiany bądź do innego projektu, w którym aktualnie występują braki osobowe. W uzasadnionych sytuacjach brygadzista musi podjąć decyzję, który wyrób zostanie wyprodukowany później, niż zakłada plan produkcyjny, co najczęściej wiąże się z konsekwencjami finansowymi dla przedsiębiorstwa.

To właśnie ze względu na przedstawiony sposób planowania zasobów ludzkich w realizacji harmonogramów produkcji stanowiska robocze (maszyny) nie są w pełni wykorzystane. Jednak zatrudnienie zbyt dużej liczby pracowników wiąże się ze wzrostem kosztów produkcji i przekłada na spadek efektywności całego procesu produkcyjnego.

#### **Etap 4. Wyznaczenie sposobów (programów) produkcji wyrobów**

W analizowanym przedsiębiorstwie, produkcja poszczególnych grup wyrobów odbywa się w tzw. modułach produkcyjnych, w skład których wchodzi stanowiska produkcyjne dedykowanej tej grupie. W każdym module realizowanych jest od kilku do kilkunastu czynności wytwórczych. Każda z tych czynności wykonywana jest na innym stanowisku. Główną rolą operatorów jest przesuwanie części i umieszczenie ich w uchwytach (formach) obrabiarów sterowanych cyfrowo oraz wykonywanie prostych czynności wykończeniowych. Operacje te trwają z reguły krótko, w związku z tym, w praktyce, operatorzy obsługują kilka stanowisk (wykonują kilka czynności) jednocześnie. Podobnie jest w przypadku spawaczy. Tutaj ich rola sprowadza się do

umieszczenia części w automacie spawalniczym, a następnie na poprawieniu spawów w sposób ręczny. Oczywiście, niektóre czynności dla wybranych części wyrobu wymagają wykonania w całości spawania ręcznego.

W obecnej praktyce przedsiębiorstwa, w zdecydowanej liczbie przypadków, liczba pracowników obsługujących moduły produkcyjne jest zdecydowanie mniejsza od liczby stanowisk. Wobec mniejszej liczby pracowników od stanowisk istotne jest wskazanie pracowników, którzy będą wykonywali więcej niż jedną operację. Podczas wyznaczania i przyporządkowywania pracowników do dodatkowych operacji technologicznych należy wziąć pod uwagę wiele czynników związanych z:

- kompetencjami pracowników (spawacz, operator),
- rozmieszczeniem stanowisk roboczych w gnieździe produkcyjnym,
- czasem przemieszczania się pomiędzy stanowiskami oraz przede wszystkim
- możliwością nachodzenia się ścieżek przemieszczania się tego typu pracowników. Problem ten można łatwo rozwiązać przyporządkowując obsługę sąsiednich stanowisk pracy temu samemu pracownikowi.

Wobec dużej liczby wariantów wyrobów, operacji technologicznych i stanowisk wytwórczych istnieje bardzo duża liczba wariantów możliwości przyporządkowania pracowników do poszczególnych operacji technologicznych. Z punktu widzenia użyteczności dla przedsiębiorstwa ważna byłaby możliwość zautomatyzowania sposobu wyznaczania czasu wyprodukowania zadanej liczby produktów jednego typu przez zadany zespół pracowników. W tym celu poniżej opisane zostaną dwa sposoby wyznaczania tego czasu i wydajności:

- sposób stosowany w firmie Brose Sitech Sp. z o.o.,
- metoda analizy elementarnych czynności technologicznych (metoda ta została opisana w pracy [25]).

### **Wyznaczenie wydajności metodą stosowaną w firmie Brose Sitech Sp. z o.o.**

Wydajność zespołu pracowników, rozumiana jako liczba sztuk produktu wykonywana w ciągu jednej godziny, szacowana jest w firmie Brose Sitech Sp. z o.o. na podstawie danych procesowych przy założeniu, że łączny czas pracy poświęconej na wykonanie wyrobu równomiernie dzielony jest pomiędzy pracowników z danej grupy. Znając wydajność jednostkową w łatwy sposób możemy wyznaczyć czas produkcji określonej liczby

produktów mnożąc tą liczbę przez wydajność. Podejście to jest często stosowane w praktyce, nie mniej obarczone jest pewnymi niedoszacowaniami związanymi z niemożnością spełnienia wszystkich założeń, w szczególności założenia dotyczącego równomiernego obciążenia wszystkich pracowników. W analizowanym przedsiębiorstwie problem ten został rozwiązany przez zastosowanie tzw. bufora czasowego, który zmniejsza wydajność.

Wydajność produkcji wyrobów wyznaczana jest w 3 krokach:

1. wyznaczenie czasu wykonania wszystkich czynności  $T(g)$  przez daną grupę pracowniczą  $g \in \{S, O\}$  (S-spawacze, O-operatorzy),
2. wyznaczenie dla każdej grupy czasu wykonania czynności przypadającego na jednego pracownika tj.  $T(g)/Lp(g)$ , gdzie  $Lp(g)$  oznacza liczbę pracowników należących do grupy  $g$ ,
3. wyznaczenie wydajności danej grupy pracowniczej ze wzoru:

$$W(g) = \frac{3600}{(1 + b) \cdot T(g)/Lp(g)} \quad (7.1)$$

gdzie  $b$  jest procentowym wydłużeniem czasu wykonania.

Ostatecznie wydajność modułu produkującego wyroby danego typu jest najmniejszą z wydajności wyznaczonych dla wszystkich grup pracowniczych tj.

$$W = \min\{W(S), W(O)\} \quad (7.2)$$

### Przykład

Rozważmy dla wyrobu DOPEL LL.V1 z zasobami ludzkimi składającymi się z  $Lp(S) = 2$  spawaczy oraz  $Lp(O) = 4$  operatorów. Operacja technologiczne i ich czasy wykonania zostały zebrane w tabeli 6.2.

1. łączny czas wykonania wszystkich operacji przez spawaczy wynosi  $T(S) = 272$  sekundy (4 min. i 32 [s]) oraz  $T(O) = 571$  sekund (9 min. i 31 [s]) przez operatorów,
2. czas wykonania czynności, przypadający na jednego pracownika wynosi  $T(S)/Lp(S) = 136$  [s] w przypadku spawaczy oraz  $T(O)/Lp(O) = 142,75$  [s] w przypadku operatorów,
3. wydajność spawaczy wynosi  $W(S) = 26,47$  szt./godz., a operatorów  $W(O) = 25,22$  szt./godz., natomiast po uwzględnieniu 8% bufora czasowego, wydajność spawaczy wynosi  $W(S) = 24,51$  szt./godz., a operatorów  $W(O) = 23,35$  szt./godz.

Ostatecznie wydajność linii produkcyjnej DOPEL LL.V1 w przypadku 2 spawaczy i 4 operatorów wynosi maksymalnie 23,35 sztuki na godzinę.

### **Wyznaczenie wydajności metodą analizy elementarnych czynności technologicznych**

W proponowanej metodyce proces wytwarzania w module (gnieździe) produkcyjnym dzielony jest na poszczególne operacje technologiczne, następnie generowany jest harmonogram wykonywania tych operacji uwzględniający ograniczenia zasobów produkcyjnych. Ponadto każdy produkt musi być przetwarzany w gnieździe w zadanej kolejności zgodnej z technologią produkcji. Ograniczenia zasobowe, występujące w gnieździe produkcyjnym można podzielić na dwa rodzaje:

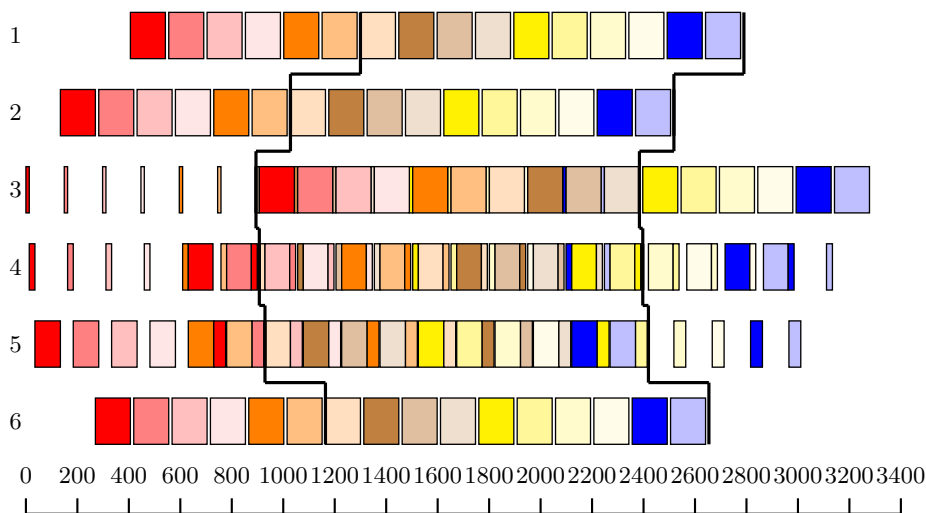
- maszynowe / stanowiskowe,
- ludzkie.

Ograniczenia maszynowe / stanowiskowe oznaczają, że na tym samym stanowisku w danej chwili może być przetwarzany tylko jeden produkt. Ograniczona liczba pracowników wymusza przydzielenie operacji technologicznych do pracowników i określenie kolejności ich wykonywania. Duża liczba możliwych przydziałów operacji do pracowników oraz różnych kolejności ich wykonania, uniemożliwia przygotowania harmonogramu w sposób ręczny. Problem wyznaczenia optymalnego harmonogramu wykonywania operacji technologicznych w cyklicznych modułach produkcyjnych był rozważany w pracy [25]. W ramach prac badawczych opracowano algorytm oparty na wspomnianym algorytmie dostosowanym do danych produktów firmy Brose Sitech Sp. z o.o.

Rozważmy harmonogram wygenerowany przez algorytm dla danych produktu DOPEL LL.V1. Został on zilustrowany na rysunku 7.1. Przedstawia on harmonogram wykonania 16 produktów przez dwóch spawaczy i 4 operatorów. Na rysunku zaznaczono tym samym kolorem operacje technologiczne wykonywane na tym samym produkcie. Spawacze są ponumerowani numerami 1 i 2, pozostałe numery przyporządkowane są operatorom. Łatwo można zauważyć, że zarówno spawacze 1 i 2 wykonują tylko jedną operację technologiczną na każdym produkcie tj. spawacz 1 wykonuje operację 6, natomiast spawacz 2 wykonuje operacje 4. Operatorzy mają przyporządkowane od jednej do trzech operacji technologicznych:

- pierwszy - 1 i 10,
- drugi - 2, 7 i 9,
- trzeci - 3 i 8,
- czwarty - 5.

Harmonogram wykonywania produktów można podzielić na trzy części (na rysunku oddzielone grubą linią). Pierwsza część harmonogramu dotyczy



Rysunek 7.1: Harmonogram pracy modułu produkcyjnego [s]

rozpoczęcia produkcji w module produkcyjnym, natomiast trzecia zakończenia procesu wytwarzania tj. momentu, od którego nie są już wprowadzane wyroby do modułu produkcyjnego. Oczywiście w obu przypadkach pewne czynności w pewnych okresach nie będą już wykonywane. W drugiej części gniazdo produkcyjne pracuje z pełną wydajnością.

Łatwo można zauważyć, że w drugiej części czynności wykonywane przez operatorów i spawaczy wykonywane są cyklicznie tj. wykonywane są w identycznej kolejności i rozpoczynających się w identycznych momentach względem momentu rozpoczęcia cyklu produkcyjnego.

W rozpatrywanym harmonogramie cykl wynosi 149 [s] i jest równy sumie czasów czynności wykonywanych przez pierwszego operatora. Czas pierwszej i drugiej części wynosi 894 [s]. Zatem w ogólnym przypadku czas wykonania serii składającej się z  $n$  produktów można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$W(n) = a + nT + b \quad (7.3)$$

gdzie  $a$  jest czasem pierwszej części,  $b$  jest czasem trzeciej części,  $T$  czasem cyklu.

Dla przytoczonych danych czas wykonania serii  $n$  produktów wynosi:

$$W(n) = 1788 + 149n. \quad (7.4)$$

Tabela 7.1 przedstawia zapotrzebowanie na pracowników oraz wydajność produkcji wyrobów grupy Doppel (LL\_V1, LL\_V2, RL\_V1, RL\_V2)



Tabela 7.1: Wydajność produkcyjna oraz zapotrzebowanie na pracowników

Nazwa wyrobu	program 1			program 2		
	sp	op	wydajność [szt/h]	sp	op	wydajność [szt/h]
<b>LL_V1</b>	3	4	23,35	2	3	17,5
<b>LL_V2</b>	3	5	27,31	3	3	17,5
<b>RL_V1</b>	4	4	28,24	2	2	14,12
<b>RL_V2</b>	5	4	23,35	3	2	11,66

w przypadku dwóch różnych programów produkcji:

**Program 1** - zakłada pełną obsadę i maksymalne tempo pracy w przedsiębiorstwie. Ze względu na wydajność pracy maszyny będącej wąskim gardłem, zwiększenie obsady pracowników nie przełoży się na szybsze tempo pracy,

**Program 2** - w tym programie co najmniej w jednej grupie pracowników obsada składa się z co najmniej jednego pracownika mniej, co przekłada się na mniejszą wydajność pracy.

W tabelach 7.2 i 7.3 zostały przedstawione szczegółowe programy produkcji dwóch wyrobów grupy Dopel z rozróżnieniem rodzaju i numeru pracownika obsługującego dane stanowisko. Pierwsza kolumna zawiera nazwę produktu z grupy Dopel, druga numer porządkowy operacji technologicznej, natomiast trzecia kolumna czas jej wykonania. Każdy program opisany jest dwoma kolumnami: pierwsza (sp) zawiera przyporządkowanie spawaczy do operacji technologicznych, natomiast druga kolumna (op) zawiera przyporządkowanie operatorów do operacji technologicznych, kolumny zawierają numery (spawaczy, operatorów) przyporządkowanych do konkretnych czynności technologicznych.

W przypadku wyrobu LL\_V1 w programie 1, operator 3 wykonuje 3 operacje technologiczne: 1, 2 oraz 3. Natomiast operator 4 tylko jedną operację technologiczną o numerze 5. Po zredukowaniu liczby operatorów o jeden (program 2) operatorowi 3 przyporządkowano dodatkowo operację 9 Operację wykonywaną przez operatora 4 w nowym programie wykonuje operator 2, w związku z tym operator 2 został zwolniony z wykonywania operacji 7 i 9, które przejęli operatorzy 1 i wcześniej wymieniony 3.

W przypadku wyrobu RL\_V1 program 2 (w porównaniu z programem 1) zakłada redukcję liczby spawaczy z 4 do 2, przez co do każdego z 2 dostępnych spawaczy zostały przypisane dodatkowe operacje. Jak można zauważyć, czas cyklu w przypadku programu 2 znacznie się wydłużył, a wydajność produkcyjna spadła.

Tabela 7.2: Sposoby produkcji wybranych wyrobów grupy Doppel

nazwa wyrobu	nr oper.	czas oper. [sec]	rodzaj pracownika	program 1		program 2	
				sp	op	sp	op
LL_V1	1	13	operator		3		3
	2	22	operator		3		3
	3	99	operator		3		3
	4	136	spawacz	1		1	
	5	136	operator		4		2
	6	136	spawacz	2		2	
	7	96	operator		2		1
	8	46	operator		2		2
	9	23	operator		2		3
	10	136	operator		1		1
LL_V2	1	13	operator		5		3
	2	22	operator		5		3
	3	52	spawacz	3		3	
	4	42	spawacz	3		3	
	5	99	operator		3		3
	6	136	spawacz	2		2	
	7	136	operator		2		2
	8	136	spawacz	1		1	
	9	96	operator		4		3
	10	46	operator		5		2
	11	23	operator		5		1
	12	136	operator		1		1
RL_V1	1	30	spawacz	1		1	
	2	28	spawacz	1		1	
	3	33	spawacz	1		1	
	4	36	spawacz	2		2	
	5	61	spawacz	2		2	
	6	13	operator		4		1
	7	22	operator		4		1
	8	136	spawacz	4		1	
	9	136	operator		1		1
	10	136	spawacz	3		2	
	11	96	operator		3		2
	12	46	operator		4		1
	13	23	operator		3		1
	14	136	operator		2		2

## Etap 5. Generowanie harmonogramów produkcyjnych z wykorzystaniem algorytmu optymalizacyjnego oraz wybór optymalnego harmonogramu produkcji

W ramach prac badawczych, skorzystano z historycznego planu produkcyjnego zakładającego wykonanie 27 produktów. Dla każdego produktu opracowano dwa sposoby wykonania:

1. praca z pełną wydajnością,
2. praca z ograniczoną wydajnością, w której liczba spawaczy i/lub liczba operatorów jest mniejsza od liczby spawaczy i operatorów zapewniających maksymalną wydajność.

Tabela 7.3: Program produkcji wybranych wyrobów grupy Dopel - kontynuacja

nazwa wyrobu	nr oper.	czas oper. [sec]	rodzaj pracownika	program 1		program 2	
				sp	op	sp	op
<b>RL_V2</b>	1	30	spawacz	3		2	
	2	28	spawacz	3		2	
	3	33	spawacz	3		2	
	4	36	spawacz	4		2	
	5	61	spawacz	4		2	
	6	13	operator		3		2
	7	22	operator		3		2
	8	52	spawacz	5		2	
	9	42	spawacz	5		1	
	10	136	spawacz	2		1	
	11	136	operator		2		2
	12	136	spawacz	1		1	
	13	96	operator		4		1
	14	46	operator		3		2
	15	23	operator		3		2
	16	136	operator		1		1

Najistotniejsze elementy zamówienia produkcyjnego przedstawiono w tabeli 7.4. Zawiera ona, oprócz nazwy i kodu produktu, numer modułu produkcyjnego, w którym jest produkowany, liczbę sztuk produktu, którą należy wyprodukować oraz liczbę operatorów i spawaczy, czas cyklu dla każdego sposobu wykonywania produktu w module. Czas cyklu jest to średni czas wykonania jednej sztuki wyrobu w module, a wydajność modułu jest odwrotnością czasu cyklu.

W wyniku ograniczenia liczby pracowników czas cyklu wydłużył się od 4.5 % (Lehne m.2 ARM BMI 2.R) do aż 99.5 % (Langstrager, Unterbau 4.R). Największe wydłużanie obserwuje się w przypadku produktów wymagających niedużej liczby pracowników, w szczególności spawaczy.

Kolejnym krokiem etapu 5. jest wyznaczenie harmonogramów wykonywania zadań produkcyjnych dla różnej liczby operatorów i spawaczy. Do wyznaczania harmonogramu został wykorzystany algorytm optymalizacyjny przedstawiony w rozdziale 5. Czas działania algorytmu dla danych obejmujących plan tygodniowy nie przekraczał 10 sekund, w związku z tym mógł on być uruchamiany wielokrotnie.

W ramach wstępnych uruchomień ustalono, że dla liczby operatorów

Tabela 7.4: Zamówienie produkcyjne i sposoby wykonania

Nazwa części	Moduł	Szt	Sposób I		Sposób II	
			l. op./ l. sp.	czas cyklu [sec]	l. op./ l. sp.	czas cyklu [sec]
BFSK LL ZT005139	2	1838	4/1	47	3/1	57
BFSK RL ZT005334	2	120	5/1	47	3/1	65
BFSK RL mit BHB ZT005331	2	72	6/1	47	4/1	62
DBFB Var. 1 LL ZT005341	3	2634	4/2	136	3/2	145
DBFB Var. 1 RL ZT005342	4	312	4/4	136	3/2	230
DBFB Var. 2 LL ZT005343	3	200	4/3	136	2/3	218
FSK LL ZT582584	1	194	6/2	56	4/2	81
FSK LL mit HBK und BHB T005320	1	1968	7/2	57	5/1	76
FSK RL ZT005082	1	452	4/1	157	2/1	251
Langstrager, Unterbau 3.R ZT005023	12	854	4/2	208	3/2	244
Langstrager, Unterbau 3.R TT ZT005309	12	420	4/3	208	3/2	244
Langstrager, Unterbau 4.R ZT005212	16	140	4/7	184	3/5	236
Lehne 1 Staufach LL ZT167311	6	224	1/2	258	1/1	515
Lehne 1.R LL ZT005011/ZT005258	5	2616	3/2	134	2/2	144
Lehne 2.R LL mit ISO - automat ZT005172/ZT005815	9	1252	6/2	119	4/2	158
Lehne 2.R LL mit ISO und ARM automat ZT005170/ZT005811	9	264	3/1	277	2/1	349
Lehne 2.R RL mit ISO ZT005173/ZT005814	9	88	5/2	166	3/2	240
Lehne 3.R ZT005002	13	522	1/2	265	1/1	516
Lehne 4.R ZT005234	15	120	1/3	388	1/2	408
Lehne GP mit 2 Armlehne ZT582743	7	6163	1/1	50		
Lehne GP ohne Armlehne ZT582739	7	550	1/1	59		
Lehne GP Starr ZT582742	7	844	1/1	75		
Lehne m.2 ARM BMI 2.R RL ISO ZT005810	14	20	4/2	223	3/2	245
Unterbau 2.R LL m.Notentriegelung TT ZT005801	10	16	3/3	245	2/2	256
Unterbau 2.R LL TT ZT005799	10	1840	3/3	201	2/2	232
Unterbau 2.R RL m. Notentriegelung TT ZT005802	11	15	3/3	220	2/2	322
Unterbau 2.R RL TT ZT005800	11	60	2/3	255	2/2	382

mniejszej od 10 oraz liczby spawaczy mniejszej od 17, harmonogram znacznie przekraczał 18 zmian produkcyjnych tygodniowo, co oznaczałoby konieczność pracy w niedzielę. Z drugiej strony dla liczby operatorów większej od 13 i liczby spawaczy większej od 19 nie obserwowano poprawy harmonogramu. Ostatecznie wygenerowano 12 harmonogramów produkcyjnych dla wszystkich par ( $lop, lsp$ ), gdzie  $lop$  oznacza liczbę operatorów natomiast  $los$  oznacza liczbę spawaczy dla  $lop = 10, \dots, 13, lsp = 17, \dots, 19$ .

Tabela 7.5: Czas realizacji wszystkich zadań [sec]

Liczba oper.	Liczba spawaczy		
	17	18	19 oraz 20
10	463090 (18 2:38)	455412 (18 3:00)	419600 (16 4:33)
11	486696 (19 2:11)	436362 (17 2:12)	416096 (16 3:34)
12	440652 (17 3:24)	444610 (17 4:30)	416096 (16 3:34)
13	440830 (17 3:27)	444610 (17 4:30)	419136 (16 4:25)

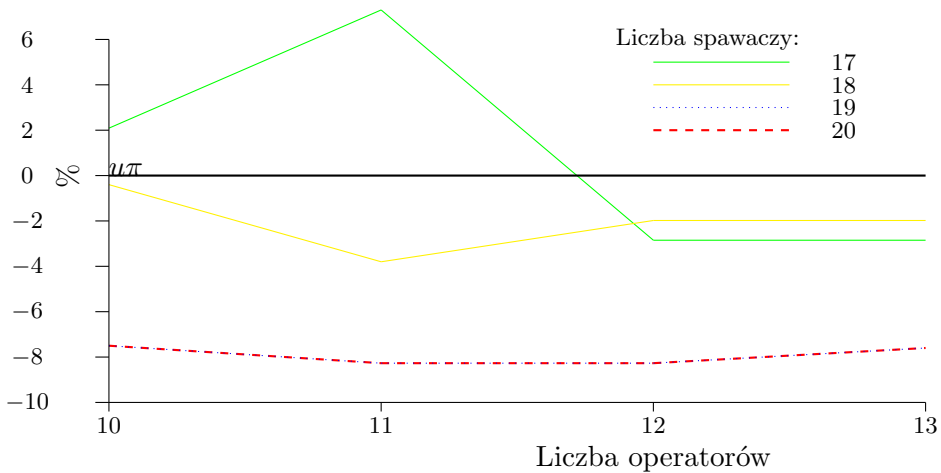
Tabela 7.6: Odchylenie względne czasu realizacji zadań [%]

Liczba oper.	Liczba spawaczy		
	17	18	19 oraz 20
10	2,09	0,40	-7,50
11	7,30	-3,80	-8,27
12	-2,85	-1,98	-8,27
13	-2,85	-1,98	-7,60

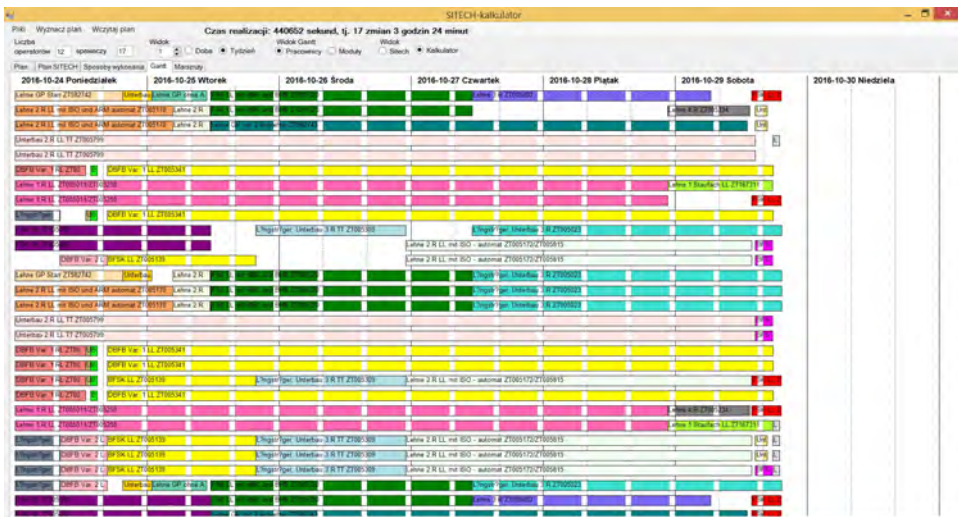
W tabeli 7.5 przedstawiono czas wykonania wszystkich zadań dla każdej kombinacji liczby operatorów i spawaczy. Czas podany jest w sekundach, natomiast w nawiasie podano liczbę pełnych zmian oraz liczbę godzin i minut kolejnej zmiany. Zdecydowana większość wyznaczonych harmonogramów jest krótsza od 18 zmian. Najkrótszy harmonogram wymaga 16 pełnych zmian oraz 3 godzin i 34 minut. Harmonogramy przekraczające 18 zmian można zaobserwować w przypadku małej liczby operatorów i spawaczy. Przekroczenie 18 zmianowego planu tygodniowego obserwujemy dla 10 operatorów i 17 spawaczy i wynosi on 2 godziny i 38 minuty, dla 11 operatorów i 17 spawaczy oraz dla 10 operatorów i 18 spawaczy.

Zwiększenie liczby operatorów i spawaczy w pewnym zakresie zmniejsza czas realizacji wszystkich zadań. Łatwo można to zaobserwować analizując odchylenie względne czasu realizacji zadań zebrane w tabeli 7.6 i zilustrowane na rysunku 7.2. Jest ono różnicą pomiędzy czasem realizacji wszystkich zadań i czasem 18 zmian, odniesionym do czasu 18 zmian i wyrażony w procentach. Wartość dodatnia oznacza przekroczenie 18 zmian, natomiast ujemna - wykonanie planu w czasie krótszym.

W przypadku 17 spawaczy najkrótszy harmonogram generowany jest dla 12 operatorów. Dalsze zwiększenie liczby operatorów nie zmniejsza długości planu tj. harmonogramy dla pozostałych liczb operatorów nie są krótsze (są zdominowane). W przypadku 18 i 19 spawaczy nie obserwuje się poprawy odpowiednio od 11 operatorów. W przypadku 20 spawaczy nie



Rysunek 7.2: Harmonogram pracy modułu produkcyjnego

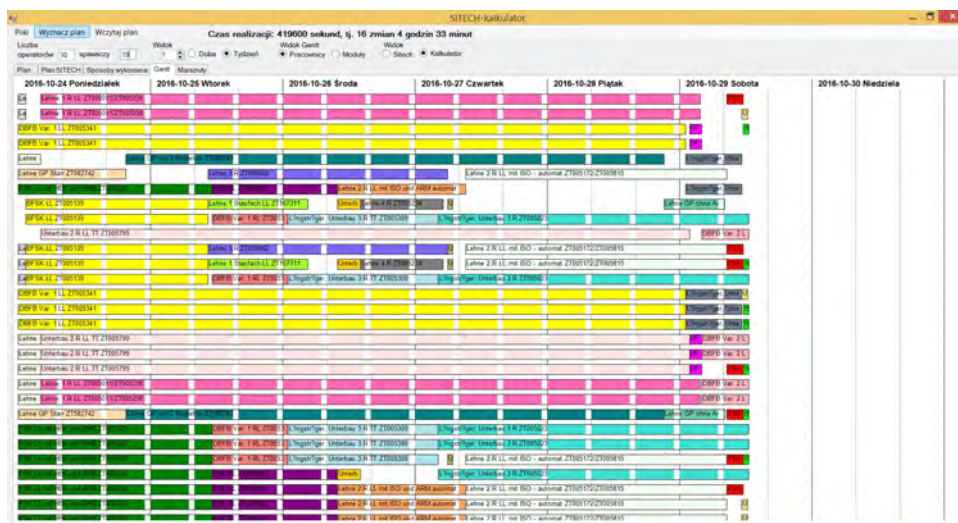


Rysunek 7.3: Harmonogram dla 12 operatorów i 17 spawaczy

obserwuje się poprawy w porównaniu z przypadkiem 19 spawaczy. Oznacza to, że zwiększanie liczby spawaczy powyżej 19 nie spowoduje skrócenia harmonogramu. Ostatecznie w zbiorze 12 harmonogramów można wyróżnić 9 harmonogramów, które wymagają nie więcej niż 18 zmian pracy.

Stosunkowo duża liczba wariantów harmonogramów ułatwi zarządzają-





Rysunek 7.5: Harmonogram dla 10 operatorów i 19 spawaczy

## Etap 6. Weryfikacja i ocena otrzymanego harmonogramu produkcji

Ocena efektywności zaproponowanej metodyki przeprowadzono na danych historycznych obejmujących okresy planowania produkcji w latach 2017 - 2019. Plan obejmował produkcję 27 produktów na łącznie 18 zmianach produkcyjnych tj. od poniedziałku do piątku 3 zmiany, w sobotę 1. i 2. zmianę oraz w niedzielę 3. zmianę. Plan produkcji został przedstawiony w tabeli 7.7. W pierwszej kolumnie podany jest kod produktu, w drugim numer modułu, w którym jest produkowany, natomiast w pozostałych kolumnach podana jest liczba sztuk produktu, którą należy wyprodukować w dany dzień na danej zmianie. Jest to zestawienie najistotniejszych danych, pochodzących z oryginalnego planu produkcji przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o. Plan produkcji został wygenerowany przez system ERP przedsiębiorstwa na podstawie zamówień klientów, a następnie eksportowany do programu Excel.

Warto zauważyć, że taka postać planu nie wskazuje kolejności i/lub okresów wykonywania (czasów rozpoczęcia i zakończenia operacji) produktów w modułach. W niektórych modułach produkowanych jest kilka różnych produktów na jednej zmianie. Z taką sytuacją mamy do czynienia w module dedykowanym do produktów grupy LEHNE, w którym na pierwszej zmianie w poniedziałek wykonywane są trzy produkty:

- Lehne 2.R LL mit ISO und ARM automat (ZT005170/ZT005811),

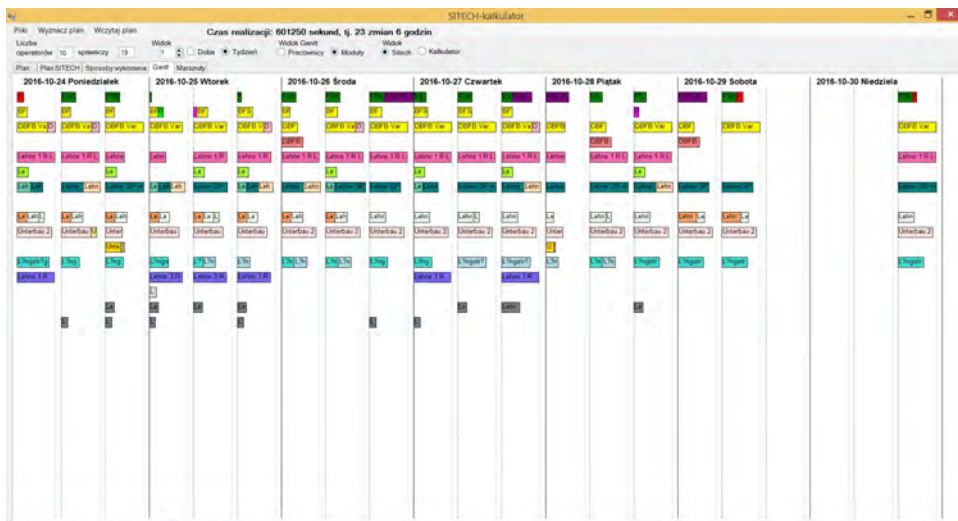


- Lehne 2.R LL mit ISO - automat (ZT005172/ZT005815),
- Lehne 2.R RL mit ISO (ZT005173/ZT005814).

Na Rysunku 7.6 zilustrowano graficznie, w postaci wykresu Gantt'a, otrzymany z przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o. plan produkcji (z lat 2017 - 2019), przy czym przyjęto arbitralną kolejność produkcji wyrobów w modułach, w których wykonywanych jest wiele produktów na tej samej zmianie. Z analizy wykresu Gantt'a wynika, że w zdecydowanej większości modułów produkowany jest tylko jeden produkt w ciągu jednej zmiany. Z przedstawionego wykresu wynika, że w większości przypadków moduły są niedociążone tj. nie są wykorzystywane w 100% na każdej zmianie. Co więcej, niektóre moduły nie są używane na wielu zmianach jak np. moduł 4. Nie mniej istnieje również 10 modułów przeciążonych tj. dla których czas pracy przekracza 420 minut pracy ( $8 \cdot 60 - 60$ , gdzie 60 jest sumą przerw dla pracowników).

Tabela 7.7: Plan produkcyjny

Kod części	Mod.	Poniedziałek			Wtorek			Środa			Czwartek			Piątek			Sobota			Niedz.					
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
ZT005334	2																								
ZT005320	1	168	168		24	48		168	168	168	144	168	120	144	144	72	168			168			168		
ZT005139	2	136	122	122	120	144	210	120	168	168	192	192	144												
ZT005331	2				72																				
ZT005082	1	74							154			82					120								
ZT582584	1																								
ZT005341	3	144	144	184	160	160	124	78	144	184	184	184	144	92	78	184	78	184		72	48		184		
ZT005342	4							104						104			104								
ZT005343	3	40	40					40			40			40											
ZT005011/	5	184	184	92	80	164	164	184	184	184	184	184	184	92	184	184	92	184					184		
ZT005258																									
ZT167311	6	28		28		28		28		28	28		28												
ZT582739	7	150			100	100		100		100	100		100												
ZT582743	7	155	290	505	154	445	154	290	405	405	205	505	290	250	505	290	405	405		405	405		505		
ZT582742	7		146		130	130		146			146		146												
ZT005170/	9	22	22	22	22	22	22	22	22	22							44	44		44	44				
ZT005811																									
ZT005172/	9	66	66	66	58	58	58	66	66	88	88	88	88	44	88	88	44	44		44	44		88		
ZT005815																									
ZT005173	9	22						22			22														
ZT005814																									
ZT005799	10	112	96	56	96	96	96	112	112	112	112	112	112	56	112	112	112	112		112	112		112		
ZT005800	11			40										20											
ZT005801	10		16																						
ZT005802	11			10																					
ZT005023	12	100	56	56	60	30		40	40	56	56			5	40	80	80	80		80	80		80		
ZT005309	12				40	40	40	40	40		90	90	92	40	40										
ZT005002	13	92			82	82	82	82	82		92	92													
ZT005810	14				20																				
ZT005234	15			15	15	15	15	15	15		15	30													
ZT005212	16		24	24	22	22	22	24		24	24														



Rysunek 7.6: Plan produkcyjny firmy Brose Sitech

Rozważmy produkcję wyrobów w pierwszym module na trzeciej zmianie w środę. Zaplanowano wtedy produkcję dwóch wyrobów:

- FSK LL mit HBK und BHB (ZT005320) - 168 szt.,
- FSK RL (ZT005082) - 154 szt.

Przyjmując, że moduły pracują z pełną wydajnością, czas produkcji pierwszego wyrobu wynosi  $168 \cdot 57 = 9576[s]$ , drugiego wynosi  $154 \cdot 157 = 24178[s]$ , co w sumie wynosi 33754 sekund tj. 9 godzin i 22 minuty.

### Analiza wykorzystania zdolności produkcyjnych operatorów i spawaczy

W przedsiębiorstwie, liczbę pracowników danej grupy potrzebną do realizacji planu na danej zmianie w danym dniu szacuje się przez podzielenie sumy czasów wykonania operacji technologicznych, obsługiwanych przez pracowników danej grupy przez 8 godzin. W tabeli 7.8, dla każdej zmiany i każdego dnia pracy, przedstawiono liczbę operatorów i spawaczy wyliczoną w opisany sposób. Dodatkowo wyliczono łączną liczbę pracowników (operatorów i spawaczy) oraz wskaźnik wykorzystania zdolności produkcyjnych (WZP) odnoszący się do operatorów i spawaczy.

Analizując wartości wskaźnika WZP można zauważyć, że jest on bardzo wysoki. Średnia wartość tego wskaźnika przekracza 96% zarówno w przypadku operatorów, jak i spawaczy. Jest to w pozornej sprzeczności z obciążeniem modułów, które jest znacznie mniejsze. Różnica ta wynika ze zmian

Tabela 7.8: Liczba operatorów i spawaczy w poszczególnych dniach oraz wskaźnik WZP w [%]

Dzień tygodnia	Zmiana	Operatorzy		Spawacze		Suma pracowników
		liczba	WZP	liczba	WZP	
Poniedziałek	1	14	95,7	21	95,8	35
	2	12	99,5	20	97,0	32
	3	13	92,7	19	95,2	32
Wtorek	1	12	99,5	17	99,0	29
	2	13	96,7	18	97,5	31
	3	14	96,1	18	96,8	32
Środa	1	13	94,1	20	96,7	33
	2	13	92,6	21	95,5	34
	3	13	95,7	24	96,6	37
Czwartek	1	14	98,3	21	96,4	35
	2	13	98,3	22	95,9	35
	3	17	94,9	23	99,1	40
Piątek	1	7	93,6	11	98,0	18
	2	13	93,5	19	98,3	32
	3	12	98,6	20	96,0	32
Sobota	1	10	95,4	16	98,4	26
	2	9	97,4	17	96,6	26
Niedziela	3	11	97,7	20	95,1	31
Średnio		12,39	96,13	19,28	96,89	31,67

modułów produkcyjnych przez grupy pracowników tj. w czasie jednej zmiany pracownicy mogą produkować wyroby w wielu modułach.

Z analizy danych zawartych w tabeli wynika, że zarówno liczba operatorów, jak i liczba spawaczy różni się na poszczególnych zmianach. Najmniejsza liczba potrzebnych operatorów wynosi 7, największa 17, najczęściej potrzebnych jest 13 operatorów, natomiast średnio 12,39. W przypadku spawaczy najmniejsza ich liczba wynosi 11, największa 24, natomiast średnio jest to 19,89 spawaczy. Średnia liczba pracowników wynosi 31,67 i waha się w zależności od zmiany od 18 aż do 40.

## Podsumowanie

Porównując rzeczywisty plan produkcyjny z wybranymi harmonogramami wygenerowanymi przy pomocy zaproponowanego w pracy algorytmu optymalizującego i prezentowanymi w etapie 5. metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich można sformułować następujące wnioski:

- a. Średnia liczba potrzebnych pracowników wynikająca z rzeczywistego planu produkcji przedsiębiorstwa to 31.67 jest większa od liczby potrzebnych pracowników dla planów wyznaczonych algorytmem optymalizacyjnym, która wynosi 29 pracowników.
- b. W całym okresie planowania liczba operatorów i spawaczy w planach wygenerowanych algorytmem optymalizacyjnym jest stała (zależna od wybranego wariantu). Natomiast w przypadku planu Brose Sitech Sp. z o.o. obserwuje się znaczne zróżnicowanie na zapotrzebowanie liczbowe pracowników.
- c. W obu typach planów obserwuje się duże wykorzystania pracowników, nie mniej w przypadku planu Brose Sitech Sp. z o.o. jest to tylko oszacowanie, które nie musi się sprawdzić w rzeczywistych warunkach produkcyjnych.
- d. Plan produkcyjny Brose Sitech Sp.z o.o. nie dostarcza informacji dotyczących przyporządkowania operatorów i spawaczy do realizacji poszczególnych operacji oraz okresów, w których są one wykonywane. Czynności te wykonują brygadyści bezpośrednio na hali produkcyjnej. Natomiast w przypadku harmonogramów generowanych przez algorytm optymalizacyjny operatorzy i spawacze są bezpośrednio przyporządkowani do realizacji poszczególnych operacji, dla których znane są okresy realizacji (czasy rozpoczęcia i zakończenia). Takie rozwiązanie jest znacznie lepsze z punktu widzenia osób zarządzających realizacją harmonogramów.

- e. Dzięki wykorzystaniu algorytmu optymalizującego uzyskuje się cały szereg wariantów harmonogramów produkcji. Dzięki temu można wybrać wariant dopasowany do aktualnej sytuacji na produkcji. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wzmożonej absencji pracowników produkcyjnych.
- f. Szybkość działania algorytmu optymalizującego pozwoli przedsiębiorstwu zabezpieczyć realizację planu produkcji w przypadku wystąpienia innych drobnych zakłóceń. Zmiana danych wejściowych i ponowne wygenerowanie nowych wersji harmonogramów pozwala na realizację założonego planu produkcji nawet przy zaistnieniu nieprzewidzianych zdarzeń.

## Rozdział 8

# Opis aplikacji wspierającej generowanie harmonogramów

W rozdziale 5 przedstawiony został algorytm Neuro-Tabu Search, będący najważniejszym elementem metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich, a w rozdziale 7 opisana została weryfikacja zaproponowanej metodyki. Aby ułatwić współpracę między algorytmem, a użytkownikiem opracowano interfejs graficzny (*ang. GUI - Graphical User Interface*). Dzięki temu poszczególne parametry oraz komendy mogą zostać wprowadzone w oknie aplikacji, a wyniki - zamiast w postaci liczbowej - zostają przedstawione w postaci wykresów bądź diagramów, które są zrozumiałe i przyjazne dla użytkownika. W niniejszym rozdziale został przedstawiony oraz opisany interfejs użytkownika "Kalkulatora-Sitech", zwany dalej aplikacją. Kalkulator-Sitech generuje harmonogram dla 27 produktów, należących do różnych grup produktów w ramach jednego projektu.

### 8.1 Dane wejściowe

Aby było możliwe obliczenie planu produkcyjnego, do aplikacji muszą zostać wprowadzone odpowiednie dane wejściowe. Dla każdego produktu musi zostać dostarczona informacja o operacjach składających się na jego produkcję:

- stanowisko robocze, na którym wykonywana jest dana operacja,
- czas, potrzebny na wykonanie danej operacji,

- typ pracownika wykonującego daną operację,
- moduł produkcyjny, w którym wykonywany jest każdy z produktów,
- liczba operatorów oraz spawaczy, wykonujących dany produkt i wynikający z tego czas cyklu oraz
- zamówienie - liczba sztuk każdego produktu do wyprodukowania.

Na rysunku 8.1 przedstawiono okno "Marszruty" aplikacji, w którym po lewej stronie zostały wypisane nazwy produkcyjne wszystkich produktów wprowadzonych do aplikacji, a po prawej poszczególne operacje, czasy ich trwania oraz typ potrzebnego pracownika dla zaznaczonego produktu "DBFB Var. 1 LL ZT005341" przedstawianego w pracy pod nazwą DOPEL LL.V1. Nazwy produktów oraz zadań (operacji) pochodzą z systemu przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o.

Lp.	Stanowisko	Zadanie	Czas	Typ prac.
1	40.20.02 / 40.19.22	Zgrzewanie Vent'Alung innen	14	D
2	20.26.10	Spawanie cz/ty DBFB LL	80	S
4	20.35.02	Spawanie r/czne U-Profil	0	S
7	40.20.02/40.19.02	Zgrzewanie St'ize hinten	22	D
8	30.07.02 (400)	Zgrzewanie ZSB St'izestell	125	D
9	20.18.02 (H30)	Spawanie SGR St'izestell LL	143	S
10	20.51.03	Spawanie r/czne SGR DBFB	94	S
11	65.01.02	Wiercenie i szlifowanie	89	D
12	40.41.03	Tuckowanie SGR DBFB	45	D
1	70.03.05	Poprawki lakierowice	0	
2	50.30.02	Pakowanie	145	

Rysunek 8.1: Aplikacja SITECH-kalkulator, marszruty

Rysunek 8.2 przedstawia 2 programy produkcyjne (Mod 1, Mod 2) dla każdego z produktów wprowadzonych do aplikacji. Każdy program ma określoną liczbę operatorów (l. op.), liczbę spawaczy (l. sp.) oraz czas cyklu. Dla produktu "Lehne 3.R" program pierwszy (Mod 1) zakłada wykorzystanie zasobów ludzkich w postaci jednego operatora oraz dwóch spawaczy, co przekłada się na czas cyklu 265 sekund, a program drugi (Mod 2) zakłada pracę jednego operatora i jednego spawacza, czego wynikiem jest czas cyklu 516 sekund.

Rysunek 8.3 przedstawia plan produkcyjny stosowany w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp z o.o. na podstawie danych z systemów informatycznych przedsiębiorstwa. "Nazwa części" oraz "Kod części" definiują produkt, "Moduł" określa moduł produkcyjny, w którym produkowany jest dany wyrób, a "Zamówienie" wskazuje liczbę sztuk danego wyrobu uwzględnionych w planie produkcyjnym na dany tydzień. Dodatkowo okno aplikacji



SITECH-kalkulator

Pliki Wyznacz plan Wczytaj plan Czas realizacji: 470480 sekund, tj. 5 dni 10 godzin 41 minut

Liczba operatorów 12 spawaczy 17 Widok 1

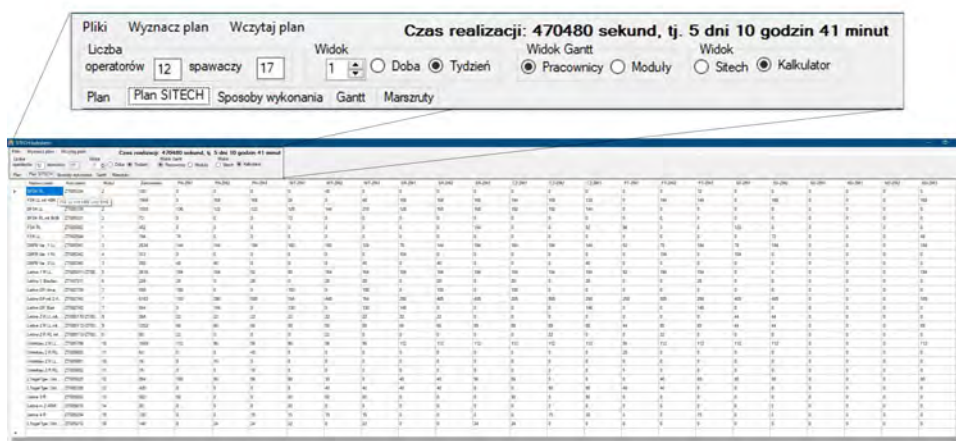
Widok Gantt Widok Pracownicy Moduły Kalkulator

Plan Plan SITECH Sposoby wykonania Gantt Marszuty

Nazwa czesci	Kod	Mod	I. op.	I. sp.	Czas cyklu
Lehne 3 R	ZT005002	1	1	2	265
Lehne 3 R	ZT005002	2	1	1	516
Lehne 1 R LL	ZT005011/ZT005258	1	3	2	134
Lehne 1 R LL	ZT005011/ZT005258	2	2	2	144
L?ngstr?ger, Unterbau 3 R	ZT005023	1	4	2	208
L?ngstr?ger, Unterbau 3 R	ZT005023	2	3	2	244
FSK RL	ZT005082	1	4	1	157
FSK RL	ZT005082	2	2	1	251
BFSK LL	ZT005139	1	4	1	47
BFSK LL	ZT005139	2	3	1	57
Lehne 2 R LL mit ISO und ARM automat	ZT005170/ZT005811	1	3	1	277
Lehne 2 R LL mit ISO und ARM automat	ZT005170/ZT005811	2	2	1	349
Lehne 2 R LL mit ISO - automat	ZT005172/ZT005815	1	6	2	119
Lehne 2 R LL mit ISO - automat	ZT005172/ZT005815	2	4	2	158
Lehne 2 R RL mit ISO	ZT005173/ZT005814	1	5	2	166
Lehne 2 R RL mit ISO	ZT005173/ZT005814	2	3	2	240
L?ngstr?ger, Unterbau 4 R	ZT005212	1	4	7	184
L?ngstr?ger, Unterbau 4 R	ZT005212	2	3	5	236
Lehne 4 R	ZT005234	1	1	3	388
Lehne 4 R	ZT005234	2	1	2	408
L?ngstr?ger, Unterbau 3 R TT	ZT005309	1	4	3	208
L?ngstr?ger, Unterbau 3 R TT	ZT005309	2	3	2	244
FSK LL mit HBK und BHB	ZT005320	1	7	2	57
FSK LL mit HBK und BHB	ZT005320	2	5	1	76
BFSK RL mit BHB	ZT005331	1	6	1	47
BFSK RL mit BHB	ZT005331	2	4	1	62
BFSK RL	ZT005334	1	5	1	47
BFSK RL	ZT005334	2	3	1	65
DBFB Var. 1 LL	ZT005341	1	4	2	136
DBFB Var. 1 LL	ZT005341	2	3	2	145
DBFB Var. 1 RL	ZT005342	1	4	4	136
DBFB Var. 1 RL	ZT005342	2	3	2	230
DBFB Var. 2 LL	ZT005343	1	4	3	136
DBFB Var. 2 LL	ZT005343	2	2	3	218
Unterbau 2 R LL TT	ZT005799	1	3	3	201
Unterbau 2 R LL TT	ZT005799	2	2	2	232
Unterbau 2 R RL TT	ZT005800	1	2	3	255
Unterbau 2 R RL TT	ZT005800	2	2	2	382
Unterbau 2 R LL m. Notentriegelung TT	ZT005801	1	3	3	245
Unterbau 2 R LL m. Notentriegelung TT	ZT005801	2	2	2	256
Unterbau 2 R RL m. Notentriegelung TT	ZT005802	1	3	3	220
Unterbau 2 R RL m. Notentriegelung TT	ZT005802	2	2	2	322
Lehne m. 2 ARM BMI 2 R RL ISO	ZT005810	1	4	2	223
Lehne m. 2 ARM BMI 2 R RL ISO	ZT005810	2	3	2	245
Lehne 1 Staufach LL	ZT167311	1	1	2	258
Lehne 1 Staufach LL	ZT167311	2	1	1	515
FSK LL	ZT582584	1	6	2	56
FSK LL	ZT582584	2	4	2	81
Lehne GP ohne Amlehne	ZT582739	1	1	1	59
Lehne GP Starr	ZT582742	1	1	1	75
Lehne GP mit 2 Amlehne	ZT582743	2	1	1	59

Rysunek 8.2: Aplikacja SITECH-kalkulator, programy produkcyjne

przedstawia tygodniowy plan produkcyjny z uwzględnieniem poszczególnych zmian. Skróty: "PN", "WT", "SR", "CC", "PT", "SO", "ND" oznaczają dni tygodnia, a "ZM1", "ZM2", "ZM3" odnoszą się do zmian w danym dniu. Plan produkcyjny przedsiębiorstwa zakłada pracę na 3 zmiany, a wykonanie planu wymaga wszystkich dostępnych 21 zmian - produkcja kończy się na trzeciej zmianie w niedzielę. Widok ten jest pomocny przy porównaniu planu realizowanego w przedsiębiorstwie z planem wygenerowanym z użyciem metodyki.



Rysunek 8.3: Aplikacja SITECH-kalkulator, tygodniowy plan produkcyjny przedsiębiorstwa Brose Sitech

Informacja o planie produkcyjnym przedsiębiorstwa Brose Sitech Sp. z o.o. w rozbiciu na poszczególne zmiany nie jest wymagana do obliczenia nowego harmonogramu. Dane te służą do porównania i oceny obliczonego harmonogramu względem harmonogramu firmy Brose Sitech Sp. z o.o.

## 8.2 Wyniki obliczeń

Jednym z celów opracowania aplikacji jest czytelność danych oraz łatwa i intuicyjna obsługa. Przedstawione powyżej dane zostały wprowadzone do aplikacji w postaci plików. Dane te nie powinny być modyfikowane podczas codziennego działania, a jedynie, gdy zmieni się któryś z procesów produkcyjnych bądź firma wprowadzi nowy produkt. Najczęściej - bo raz w tygodniu - będzie zmieniane "Zamówienie", czyli liczba sztuk produktów do wyprodukowania w danym tygodniu. Dane, które będą często modyfikowane, to liczba dostępnych operatorów oraz spawaczy. Aplikacja pozwala

wprowadzać i edytować te wartości w głównym oknie i po kliknięciu przycisku "Wyznacz plan", aplikacja oblicza i przedstawia nowy plan produkcyjny dostosowany do zaproponowanej obsady.



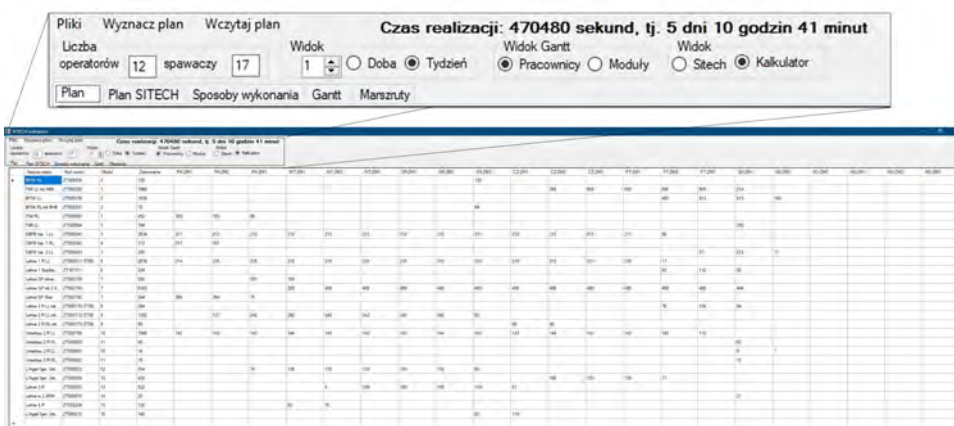
Rysunek 8.4: Aplikacja SITECH-kalkulator, przyporządkowanie pracowników do produktów



Rysunek 8.5: Aplikacja SITECH-kalkulator, legenda dla produkowanych wyrobów

Na rysunku 8.4 przedstawiono przyporządkowanie pracowników do produkowanych wyrobów przez algorytm. Każdy poziom określa pracownika, a dany kolor wskazuje na produkt, do którego dany pracownik jest przypisany w danym czasie. W tym widoku aplikacji, widać dokładnie, który

wyrób jest produkowany przez którego pracownika w danej chwili oraz który będzie produkowany w następnej kolejności. Dla załogi składającej się z 12 operatorów i 17 spawaczy plan produkcyjny może zostać zrealizowany w 5 dni 10 godzin i 41 minut, czyli zakończy się w sobotę na drugiej zmianie. Rysunek 8.5 przedstawia wykaz produkowanych wyrobów przedstawionych na rysunkach 8.4, 8.7, 8.8, oraz 8.9. Na rysunku 8.6 przedstawiono zakładkę "Plan" przedstawiającą w formie tabeli liczbę sztuk wszystkich produktów produkowanych na każdej ze zmian.

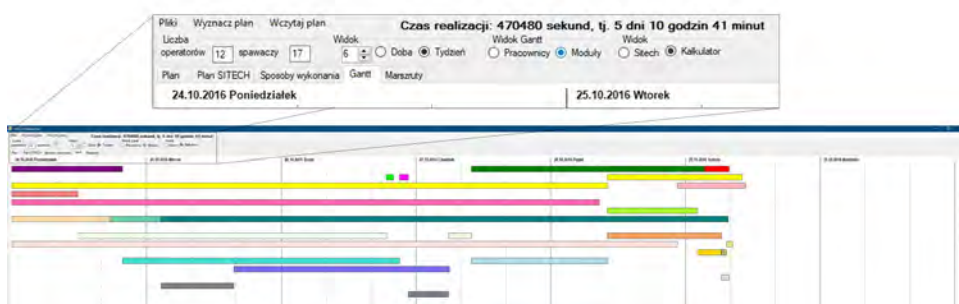


Rysunek 8.6: Aplikacja SITECH-kalkulator, plan produkcyjny

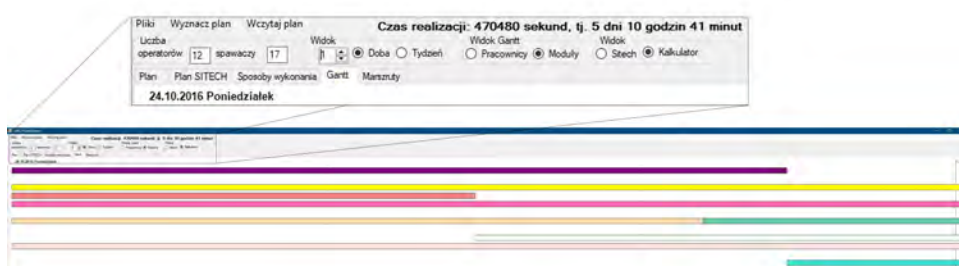
Rysunki 8.7 oraz 8.8 przedstawiają obciążenie poszczególnych modułów produkcyjnych dla obliczonego planu produkcyjnego. Rysunek 8.7 przedstawia obciążenie w ujęciu tygodniowym, a rysunek 8.8 w ujęciu dziennym. Widok obciążenia poszczególnych modułów produkcyjnych może posłużyć do analizy możliwości zwiększenia wolumenu produkcji. Zarówno na rysunkach 8.4, 8.7 jak i 8.8 liczba spawaczy wynosi 12, a liczba operatorów 17. Wszystkie 3 rysunki przedstawiają ten sam plan produkcyjny wygenerowany przez algorytm z wykorzystaniem metodyki.

Rysunek 8.9 przedstawia obciążenie modułów produkcyjnych dla planu produkcyjnego realizowanego przez przedsiębiorstwo. Widok ten może posłużyć do porównania obciążeń modułów produkcyjnych między planem produkcyjnym przedsiębiorstwa, a obliczonym przez algorytm.

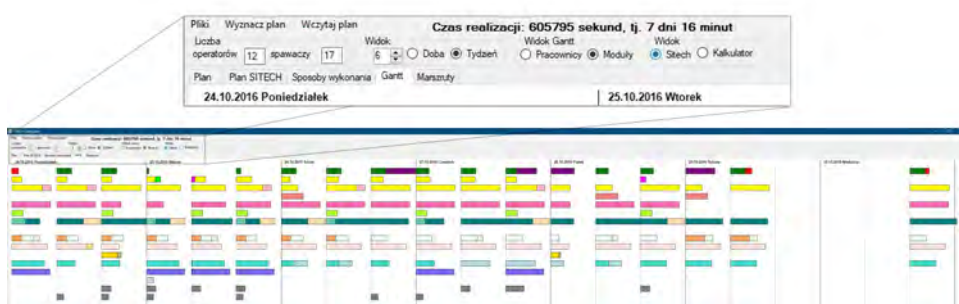
Przy zadanych danych obejmujących 27 produktów i tygodniowy plan pracy na trzy zmiany obliczenie planu produkcji trwa około 10 sekund przy użyciu średniej klasy komputera. Daje to możliwość szybkiej symulacji wykorzystania różnych zasobów ludzkich oraz natychmiastowego wygenerowania nowego planu w przypadku nieplanowej zmiany składu pracowników.



Rysunek 8.7: Aplikacja SITECH-kalkulator, obciążenie modułów produkcyjnych w ujęciu tygodniowym



Rysunek 8.8: Aplikacja SITECH-kalkulator, obciążenie modułów produkcyjnych w ujęciu dziennym



Rysunek 8.9: Aplikacja SITECH-kalkulator, obciążenie modułów produkcyjnych w przedsiębiorstwie

## Rozdział 9

# Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych prac

Wraz z rozwojem przedsiębiorstw oraz produkcji masowej, efektywne zarządzanie pracą personelu staje się coraz istotniejsze i coraz bardziej złożone, a problem harmonogramowania produkcji jest jednym z kluczowych elementów sukcesu. W przedsiębiorstwie, w którym codziennie wykonywanych są tysiące bądź miliony sztuk produktów (te same operacje są wielokrotnie powtarzane), nawet niewielka zmiana w harmonogramie produkcji może przełożyć się na znaczący zysk w skali miesiąca czy roku. Aby efektywnie zrealizować zadanie produkcyjne, przedsiębiorstwo musi wziąć pod uwagę wiele czynników, takich jak: zmienną liczbę pracowników, różne kompetencje, predyspozycje i umiejętności pracowników, potrzebę synchronizacji między poszczególnymi operacjami oraz etapami produkcji, ograniczony dostęp do zasobów produkcyjnych, czynniki ryzyka pojawiające się w systemie produkcyjnym oraz wiele innych zmiennych.

### 9.1 Przedmiot badań

W rozdziale 1 przedstawiona została charakterystyka oraz problemy harmonogramowania produkcji poparte przeglądem literaturowym. Przy aktualnej złożoności procesów produkcyjnych najlepszym znanym sposobem wydajnego harmonogramowania produkcji jest zastosowanie różnego rodzaju metod inteligentnych, mających na celu znalezienie rozwiązania optymalnego bądź bliskiego optymalnemu - wystarczająco dobrego dla rozwiązania danego problemu, uwzględniając założone kryteria.

W rozdziale 2 przedstawione zostały wybrane metody inteligentne, ich klasyfikacja, charakterystyka oraz przykłady zastosowania w inżynierii pro-

dukcji poparte przeglądem literaturowym. Zostało również sporządzone porównanie algorytmów wykorzystywanych w optymalizacji według przyjętych na potrzeby realizacji celu pracy kryteriów (tabela 2.2).

W literaturze, której przegląd zawierają rozdział 1 i rozdział 2 niniejszej pracy, nie znaleziono metody harmonogramowania produkcji, która rozpatrywałaby wielowariantowość wykonania produkcji oraz pozwalałaby na optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich z uwzględnieniem różnych kompetencji pracowników produkcyjnych. W odpowiedzi na zaobserwowaną **lukę badawczą** sformułowano **problem badawczy** jako "opracowanie algorytmu metaheurystycznego pozwalającego na optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich z uwzględnieniem różnych kompetencji pracowników oraz wielowariantowości sposobów wykonania produktów". Matematyczna forma problemu badawczego została przedstawiona w rozdziale 5. Za harmonogram optymalny będzie uważany taki harmonogram, który:

- wykorzystuje minimalną liczbę zasobów każdego typu do realizacji zlecenia produkcyjnego w zadanym okresie czasu,
- czas realizacji wszystkich zadań jest najkrótszy dla zadanej liczby zasobów każdego typu.

Z uwagi na tak postawiony problem badawczy oraz na dużą wagę dla przedsiębiorstw produkcyjnych budowy harmonogramów produkcji w kontekście efektywności wykorzystania zasobów ludzkich i realizacji zleceń produkcyjnych przyjęto następującą **tezę pracy**:

*„Wykorzystanie metaheurystyk w opracowywaniu harmonogramów produkcyjnych pozwala na szybsze i bardziej efektywne, w porównaniu z metodami tradycyjnymi, przyporządkowywanie zasobów ludzkich do realizacji zadań produkcyjnych.”*

Dla tak przyjętej tezy **za cel główny pracy przyjęto**:

*„Opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich opartej na metodach inteligentnych z uwzględnieniem takich kryteriów optymalizacyjnych jak minimalna liczba pracowników lub minimalny czas realizacji zadań produkcyjnych z uwzględnieniem kompetencji pracowników.”*

## 9.2 Wyniki badań

Zaproponowana w rozdziale 4 metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji zasobów ludzkich została zweryfikowana w rozdziale 7.

Najważniejszymi **osiągnięciami naukowymi** niniejszej pracy są:

- przegląd literatury w zakresie:
  - dostępnej wiedzy w obszarze harmonogramowania produkcji i wykorzystania zasobów produkcyjnych w realizacji harmonogramów,
  - algorytmów inteligentnych i możliwości wykorzystania ich w planowaniu i optymalizacji produkcji,
- opracowanie metodyki harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich,
- weryfikacja możliwości zastosowania proponowanej metody.

Najważniejszymi **osiągnięciami utylitarnymi** niniejszej pracy są:

- opracowanie algorytmu optymalizacyjnego Neuro-Tabu Search (NTS), który zostanie wykorzystany w metodyce harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji wykorzystania zasobów ludzkich,
- budowa narzędzia informatycznego (aplikacji) pozwalającego na generowanie harmonogramów produkcji w oparciu o opracowaną metodykę.

Opracowana na potrzeby realizacji celu pracy metodyka pozwala na zmianę sposobu planowania produkcji. Manualne obliczanie zapotrzebowanie na pracowników i zarządzanie nimi może zostać zastąpione przez wygenerowanie dokładnego harmonogramu, wskazującego każdemu pracownikowi jego zadanie w danym czasie i zrezygnowanie z utrzymywania bufora. Dzięki zastosowaniu metodyki możliwa jest realizacja harmonogramu produkcji przy wykorzystaniu mniejszej liczby zasobów ludzkich.

Niższe koszty produkcji przełożą się na obniżenie kosztów jednostkowych wyrobu, a to z kolei da możliwość uzyskania przewagi konkurencyjnej na rynku. Ponadto brygadziści, odpowiadający obecnie za planowanie i realizację harmonogramów w trakcie zmiany produkcyjnej, otrzymają użyteczne narzędzie, pozwalające im na dużo bardziej efektywne wykorzystanie posiadanych zasobów produkcyjnych. Dlatego zakłada się, że opracowana metodyka pozwoli przedsiębiorstwu na zwiększenie efektywności i obniżenie kosztów produkcji, a przez to na uzyskanie przewagi konkurencyjnej.

Odnosząc się do postawionych tez pracy, na podstawie przeprowadzonych badań, można sformułować następujące wnioski:

- metody inteligentne bardzo dobrze sprawdzają się w rozwiązywaniu problemów harmonogramowania produkcji, a przy obecnym poziomie złożoności procesów produkcyjnych wydają się niezbędne jako pomoc w dużych przedsiębiorstwach,



- większość problemów harmonogramowania produkcji to problemy klasy job-shop, a biorąc pod uwagę wszystkie czynniki charakterystyczne, większość problemów jest unikalnych i wymaga indywidualnego podejścia: doboru i dostosowania odpowiedniej metody inteligentnej,
- opracowana metodyka harmonogramowania produkcji w aspekcie optymalizacji zasobów ludzkich spełniła swoje założenia.

Dodatkowymi zaletami harmonogramów wygenerowanych przy pomocy zaproponowanego w pracy algorytmu optymalizującego NTS są:

- a. Duży stopień szczegółowości harmonogramów. Pracownicy posiadający różne kompetencje są bezpośrednio przyporządkowani do realizacji poszczególnych operacji, dla których znane są okresy realizacji (czasy rozpoczęcia i zakończenia), natomiast plany produkcji opracowywane tradycyjnie w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp. z o.o. nie dostarczają informacji dotyczących przyporządkowania operatorów i spawaczy do realizacji poszczególnych operacji oraz okresów, w których są one wykonywane. Czynności te wykonują brygadziści, bezpośrednio w miejscu przeprowadzania procesu. Takie rozwiązanie jest znacznie lepsze z punktu widzenia osób zarządzających realizacją harmonogramów.
- b. Dzięki wykorzystaniu algorytmu optymalizującego NTS uzyskuje się wiele wariantów harmonogramów produkcji. Dzięki temu można wybrać wariant dopasowany do sytuacji panującej podczas przeprowadzania procesu. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wzmożonej absencji pracowników produkcyjnych.
- c. Szybkość działania algorytmu optymalizującego NTS pozwoli przedsiębiorstwu zabezpieczyć realizację planu produkcji w przypadku wystąpienia innych drobnych zakłóceń. Zmiana danych wejściowych i ponowne wygenerowanie nowych wersji harmonogramów jest natychmiastowa. Natomiast tradycyjny sposób budowy harmonogramów jest zadaniem bardzo pracochłonnym.

### 9.3 Kierunki dalszych badań

Niniejsza rozprawa może stanowić inspirację do dalszych badań dotyczących problemów harmonogramowania z uwzględnieniem różnego rodzaju założeń, w tym pracowników posiadających zróżnicowane kompetencje oraz potrzeby. Zarówno małe, średnie, jak i duże przedsiębiorstwa zatrudniają pracowników o różnych kompetencjach, a poprawne ich wykorzystanie jest istotną składową sukcesu finansowego przedsiębiorstwa. Ponadto, zgodnie z zasadą *Garbage in, garbage out (GIGO)* [54] metody inteligentne do

poprawnego działania wymagają dostarczenia dobrych jakościowo danych. W dobie wdrażania IoT (Internet of Things) oraz Industry 4.0 szacuje się, iż przedsiębiorstwa coraz częściej polegać będą na danych z wielu urządzeń pomiarowych, co pozwoli na szybsze wykrycie i ograniczenie zakłóceń oraz da nowe możliwości do rozwoju metod inteligentnych w inżynierii produkcji. W chwili zakończenia prac nad niniejszą rozprawą (styczeń 2023) coraz częściej wdrażana jest praca zdalna oraz technologie pozwalające na zdalne sterowania maszynami i robotami. Możliwość prowadzenia procesu produkcyjnego z wykorzystaniem pracowników pracujących z dowolnego miejsca na świecie wiąże się z wieloma możliwościami oraz wyzwaniem dla harmonogramowania produkcji. Szacuje się, iż obszar ten będzie w najbliższych latach mocno eksplorowany, a użycie odpowiednio dobranych metod inteligentnych będzie niezbędne.

# Bibliografia

- [1] Od industry 4.0 do smart factory. <https://publikacje.siemens-info.com/pdf/76/> (marzec, 2021).
- [2] ABDELSALAM, A. M., AND EL-SHORBAGY, M. Optimization of wind turbines siting in a wind farm using genetic algorithm based local search. *Renewable energy* 123 (2018), 748–755.
- [3] AGHA, M. E., AND ENG, B. *Simulation of Production scheduling in Manufacturing Systems*. PhD thesis, Dublin City University. School of Mechanical and Manufacturing Engineering, 1993.
- [4] AHN, S., YOON, K., AND PARK, J. A best-first branch and bound algorithm for the pallet-loading problem. *International Journal of Production Research* 53, 3 (2015), 835–849.
- [5] AISSA, J., THOMAS, C., SAWICKI, L., CASPERS, J., KRÖPIL, P., ANTOCH, G., AND BOOS, J. Iterative metal artefact reduction in ct: can dedicated algorithms improve image quality after spinal instrumentation? *Clinical radiology* 72, 5 (2017), 428–e7.
- [6] AKBARI, R., MOHAMMADI, A., AND ZIARATI, K. A novel bee swarm optimization algorithm for numerical function optimization. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 15, 10 (2010), 3142–3155.
- [7] ALAM, S., DOBBIE, G., KOH, Y. S., AND RIDDLE, P. Web bots detection using particle swarm optimization based clustering. In *2014 IEEE congress on evolutionary computation (CEC)* (2014), IEEE, pp. 2955–2962.
- [8] ALCANTAR, V., ACEVES, S., LEDESMA, E., LEDESMA, S., AND AGUILERA, E. Optimization of type 4 composite pressure vessels using genetic algorithms and simulated annealing. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 24 (2017), 15770–15781.

- [9] ALCANTAR, V., LEDESMA, S., ACEVES, S., LEDESMA, E., AND SALDANA, A. Optimization of type iii pressure vessels using genetic algorithm and simulated annealing. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 31 (2017), 20125–20132.
- [10] ALVAREZ-VALDES, R., MARTINEZ, A., AND TAMARIT, J. A branch & bound algorithm for cutting and packing irregularly shaped pieces. *International Journal of Production Economics* 145, 2 (2013), 463–477.
- [11] ANDRESEN, M., BRÄSEL, H., ENGELHARDT, F., AND WERNER, F. *LiSA-a Library of Scheduling Algorithms: Handbook for Version 3.0*. Citeseer, 2010.
- [12] ARBIB, C., MARINELLI, F., AND PEZZELLA, F. An lp-based tabu search for batch scheduling in a cutting process with finite buffers. *International Journal of Production Economics* 136, 2 (2012), 287–296.
- [13] ART, L., AND MAUCH, H. *Dynamic Programming: A Computational Tool*. Springer, 2007.
- [14] ASKARZADEH, A., AND REZAZADEH, A. Artificial bee swarm optimization algorithm for parameters identification of solar cell models. *Applied Energy* 102 (2013), 943–949.
- [15] BANASZAK, Z., GATTNER, D., MAZUR-ŁUKOMSKA, K., AND MUSZYŃSKI, W. *Zarządzanie operacjami*. PZ, 1997.
- [16] BEAUSOLEIL, R. P. “moss” multiobjective scatter search applied to non-linear multiple criteria optimization. *European Journal of Operational Research* 169, 2 (2006), 426–449.
- [17] BEHESHTI, Z., AND SHAMSUDDIN, S. M. H. A review of population-based meta-heuristic algorithms. *Int. J. Adv. Soft Comput. Appl* 5, 1 (2013), 1–35.
- [18] BELLMAN, R. On the theory of dynamic programming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 38, 8 (aug 1952), 716–719.
- [19] BERGH, J. V. D., BELIËN, J., BRUECKER, P. D., DEMEULEMEESTER, E., AND BOECK, L. D. Personnel scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research* 226, 3 (may 2013), 367–385.

- [20] BILLAUT, J.-C., MOUKRIM, A., AND SANLAVILLE, E. *Flexibility and robustness in scheduling*. John Wiley & Sons, 2013.
- [21] BŁAŻEWICZ, J., ECKER, K. H., PESCH, E., SCHMIDT, G., AND WĘGLARZ, J. Scheduling in flexible manufacturing systems. In *Scheduling Computer and Manufacturing Processes*. Springer Berlin Heidelberg, 2001, pp. 367–419.
- [22] BOUAJAJA, S., AND DRIDI, N. A survey on human resource allocation problem and its applications. *Operational Research 17*, 2 (2017), 339–369.
- [23] BOX, G. E. P. Evolutionary operation: A method for increasing industrial productivity. *Applied Statistics 6*, 2 (jun 1957), 81.
- [24] BOŻEJKO, W., BURDUK, A., MUSIAŁ, K., AND PEMPERA, J. Neuro-tabu search approach to scheduling in automotive manufacturing. *Neurocomputing 452* (2021), 435–442.
- [25] BOZEJKO, W., BURDUK, A., PEMPERA, J., AND WODECKI, M. Optimization of production process for resource utilization. *Archives of Civil and Mechanical Engineering 19*, 4 (Dec 2019), 1251–1258.
- [26] BOŻEJKO, W., GNATOWSKI, A., PEMPERA, J., AND WODECKI, M. Parallel tabu search for the cyclic job shop scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering 113* (2017), 512–524.
- [27] BOŻEJKO, W., AND JAROSŁAW, P. Optymalizacja dyskretna w informatyce, automatyce i robotyce. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław* (2012).
- [28] BOŻEJKO, W., PEMPERA, J., AND WODECKI, M. Parallel simulated annealing algorithm for cyclic flexible job shop scheduling problem. In *International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing* (2015), Springer, pp. 603–612.
- [29] BRÄSEL, H., DORNHEIM, L., KUTZ, S., MÖRIG, M., AND RÖSSLING, I. *LiSA-A Library of Scheduling Algorithms*. Otto-von-Guericke Universität at Magdeburg, 2006.
- [30] BRUSCO, M. J., AND STAHL, S. *Branch-and-bound applications in combinatorial data analysis*. Springer Science & Business Media, 2006.

- [31] BRZEZIŃSKI, M. *Sterowanie produkcją: materiały do ćwiczeń i projektowania: opracowanie zbiorowe*. Wydawnictwa Uczelniane, 2001.
- [32] BRZEZIŃSKI, M. *Organizacja i sterowanie produkcją: projektowanie systemów produkcyjnych i procesów sterowania produkcją*. Placet, 2002.
- [33] BURDUK, A. *Modelowanie systemów narzędziem oceny stabilności procesów produkcyjnych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2013.
- [34] BURDUK, A., BOŻEJKO, W., PEMPERA, J., AND MUSIAŁ, K. On the simulated annealing adaptation for tasks transportation optimization. *Logic Journal of the IGPL* 26, 6 (2018), 581–592.
- [35] BURDUK, A., AND MUSIAŁ, K. Genetic algorithm adoption to transport task optimization. In *International Joint Conference SOCO'16-CISIS'16-ICEUTE'16* (2016), Springer, pp. 366–375.
- [36] CAI, Y., GUAN, W., WU, Y., XIE, C., CHEN, Y., AND FANG, L. Indoor high precision three-dimensional positioning system based on visible light communication using particle swarm optimization. *IEEE Photonics Journal* 9, 6 (2017), 1–20.
- [37] ÇALIŞ, B., AND BULKAN, S. A research survey: review of ai solution strategies of job shop scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing* 26, 5 (2015), 961–973.
- [38] CHANG, R.-S., CHANG, J.-S., AND LIN, P.-S. An ant algorithm for balanced job scheduling in grids. *Future Generation Computer Systems* 25, 1 (2009), 20–27.
- [39] CHEN, C., AND TIONG, L. K. Using queuing theory and simulated annealing to design the facility layout in an agv-based modular manufacturing system. *International Journal of Production Research* 57, 17 (2019), 5538–5555.
- [40] CHEN, J. C., WU, C.-C., CHEN, C.-W., AND CHEN, K.-H. Flexible job shop scheduling with parallel machines using genetic algorithm and grouping genetic algorithm. *Expert Systems with Applications* 39, 11 (2012), 10016–10021.
- [41] CHEN, X., AND ZOU, S. Improved wi-fi indoor positioning based on particle swarm optimization. *IEEE Sensors Journal* 17, 21 (2017), 7143–7148.

- [42] CHENG, F., Ettl, M., LU, Y., AND YAO, D. D. A production–inventory model for a push–pull manufacturing system with capacity and service level constraints. *Production and Operations Management* 21, 4 (2012), 668–681.
- [43] CHENG, S., LU, H., LEI, X., AND SHI, Y. A quarter century of particle swarm optimization. *Complex & Intelligent Systems* 4, 3 (2018), 227–239.
- [44] CONWAY, R. W. An experimental investigation of priority assignment in a job shop. Tech. rep., RAND CORP SANTA MONICA CALIF, 1964.
- [45] DAMM, R. B., RESENDE, M. G., AND RONCONI, D. P. A biased random key genetic algorithm for the field technician scheduling problem. *Computers & Operations Research* 75 (2016), 49–63.
- [46] DANCHUK, V., BAKULICH, O., AND SVATKO, V. An improvement in ant algorithm method for optimizing a transport route with regard to traffic flow. *Procedia Engineering* 187 (2017), 425–434.
- [47] DAS, S. An algorithm for binary linear programming. *Journal of Applied Mathematics and Bioinformatics* 4, 3 (2014), 29.
- [48] DIDARI, S., WANG, Y., AND HARRIS, T. A. Modeling of gas diffusion layers with curved fibers using a genetic algorithm. *International Journal of Hydrogen Energy* 42, 36 (2017), 23130–23140.
- [49] DISSANAYAKE, S. T., AND ÖNAL, H. Amenity driven price effects and conservation reserve site selection: A dynamic linear integer programming approach. *Ecological Economics* 70, 12 (2011), 2225–2235.
- [50] DORIGO, M., CARO, G. D., AND GAMBARDELLA, L. M. Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial life* 5, 2 (1999), 137–172.
- [51] DORIGO, M., MANIEZZO, V., COLORNI, A., ET AL. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, man, and cybernetics, Part B: Cybernetics* 26, 1 (1996), 29–41.
- [52] DUNKER, T., RADONS, G., AND WESTKÄMPER, E. A coevolutionary algorithm for a facility layout problem. *International Journal of Production Research* 41, 15 (2003), 3479–3500.

- [53] DURLIK, I. *Inżynieria zarządzania: strategia i projektowanie systemów produkcyjnych. Strategie organizacji produkcji, nowe koncepcje zarządzania*. Wydawnictwo Placet, 2007.
- [54] EDD, L. T. R., AND PHD, K. W. F. Garbage in, garbage out: Having useful data is everything. *Measurement* 9 (10 2011), 222–226.
- [55] ERNST, A. T., JIANG, H., KRISHNAMOORTHY, M., AND SIER, D. Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European journal of operational research* 153, 1 (2004), 3–27.
- [56] FLEURENT, C., GLOVER, F., MICHELON, P., AND VALLI, Z. A scatter search approach for unconstrained continuous optimization. In *Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation* (1996), IEEE, pp. 643–648.
- [57] FRANZIN, A., AND STÜTZLE, T. Revisiting simulated annealing: A component-based analysis. *Computers & operations research* 104 (2019), 191–206.
- [58] FRENCH, S. Sequencing and scheduling. *An Introduction to the Mathematics of the Job-shop* (1982).
- [59] FRIEDBERG, R. M. A learning machine: Part 1. *IBM Journal of Research and Development* 2, 1 (jan 1958), 2–13.
- [60] FU, Z., HUANG, W., AND LÜ, Z. Iterated tabu search for the circular open dimension problem. *European Journal of Operational Research* 225, 2 (2013), 236–243.
- [61] GEORGE, R., AND SAMUEL, P. Fixing class design inconsistencies using self regulating particle swarm optimization. *Information and Software Technology* 99 (2018), 81–92.
- [62] GEYIK, F., AND CEDIMOGLU, I. H. The strategies and parameters of tabu search for job-shop scheduling. *Journal of intelligent manufacturing* 15, 4 (2004), 439–448.
- [63] GLOVER, F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision sciences* 8, 1 (1977), 156–166.
- [64] GLOVER, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research* 13, 5 (jan 1986), 533–549.



- [65] GLOVER, F. Tabu search—part i. *ORSA Journal on Computing* 1, 3 (aug 1989), 190–206.
- [66] GLOVER, F., LAGUNA, M., AND MARTÍ, R. Fundamentals of scatter search and path relinking. *Control and cybernetics* 29, 3 (2000), 653–684.
- [67] GOŁĘBIEWSKI, P. Zastosowanie algorytmu pszczelego do rozwiązania problemu konstruowania rozkładu jazdy pociągów. *Logistyka*, 4 (2014), 1857–1866.
- [68] GOMORY, R. E. Outline of an algorithm for integer solutions to linear programs and an algorithm for the mixed integer problem. In *50 Years of Integer Programming 1958-2008*. Springer, 2010, pp. 77–103.
- [69] GONÇALVES, J. F., AND RESENDE, M. G. A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research* 246, 1 (2015), 86–107.
- [70] GÓRNICKA, D., MARKOWSKI, M., AND BURDUK, A. Optimization of production organization in a packaging company by ant colony algorithm. In *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance* (2017), Springer, pp. 336–346.
- [71] GÜLER, M. G., KESKIN, M. E., DÖYEN, A., AND AKYER, H. On teaching assistant-task assignment problem: A case study. *Computers & Industrial Engineering* 79 (2015), 18–26.
- [72] HAYES-ROTH, F. Review of "adaptation in natural and artificial systems by john h. holland", the u. of michigan press, 1975. *ACM SIGART Bulletin*, 53 (aug 1975), 15–15.
- [73] HERTZ, A., ULDRY, M., AND WIDMER, M. Integer linear programming models for a cement delivery problem. *European Journal of Operational Research* 222, 3 (2012), 623–631.
- [74] HONG, G. Bulding robust schedules using temporal potection—an emipirical study of constraint based scheduling under machine failure uncertainty. *Toronto, Ontario* (1996).
- [75] HUFFMAN, D. A method for the construction of minimum-redundancy codes. *Proceedings of the IRE* 40, 9 (sep 1952), 1098–1101.

- [76] HULETT, M., DAMODARAN, P., AND AMOUIE, M. Scheduling non-identical parallel batch processing machines to minimize total weighted tardiness using particle swarm optimization. *Computers & Industrial Engineering* 113 (2017), 425–436.
- [77] JI, Z., SU, J., LIU, C., WANG, H., HUANG, D., AND ZHOU, X. Integrating genomics and proteomics data to predict drug effects using binary linear programming. *PloS one* 9, 7 (2014).
- [78] JIANG, Y. *Linear integer programming for power system recovery following outages*. Washington State University, 2016.
- [79] JU, Q. *Planning and scheduling optimization of job-shop in intelligent manufacturing system (pp. 1–97)*. PhD thesis, Doctoral dissertation of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics . . . , 2007.
- [80] KACHITVICHYANUKUL, V., AND SITHITHAM, S. A two-stage genetic algorithm for multi-objective job shop scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing* 22, 3 (2011), 355–365.
- [81] KALINOWSKI, K. *Harmonogramowanie dyskretnych procesów produkcyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2013.
- [82] KALINOWSKI, K., AND KNOSALA, R. Harmonogramowanie produkcji w warunkach zakłóceń, wspomagane systemem eksperckim. *Zarządzanie przedsiębiorstwem* 6, 1 (2003), 12–23.
- [83] KALINOWSKI, K., KRENCZYK, D., AND GRABOWIK, C. Predictive-reactive strategy for real time scheduling of manufacturing systems. In *Applied Mechanics and Materials* (2013), vol. 307, Trans Tech Publ, pp. 470–473.
- [84] KAMMLER, M., JANKE, S. M., KANDRATSENKA, A., AND WODTKE, A. M. Genetic algorithm approach to global optimization of the full-dimensional potential energy surface for hydrogen atom at fcc-metal surfaces. *Chemical Physics Letters* 683 (2017), 286–290.
- [85] KARABOGA, D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, technical report - tr06. *Technical Report, Erciyes University* (01 2005).
- [86] KARABOGA, D., AND BASTURK, B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (abc) algorithm. *Journal of global optimization* 39, 3 (2007), 459–471.

- [87] KENNEDY, J., AND EBERHART, R. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (1995), vol. 4, pp. 1942–1948 vol.4.
- [88] KERGOSIEN, Y., LENTE, C., PITON, D., AND BILLAUT, J.-C. A tabu search heuristic for the dynamic transportation of patients between care units. *European Journal of Operational Research* 214, 2 (2011), 442–452.
- [89] KHANIZAD, R., AND MONTAZER, G. Optimal allocation of human resources based on operational performance of organizational units using fuzzy game theory. *Cogent Engineering* 5, 1 (2018).
- [90] KIRANYAZ, S., INCE, T., AND GABBOUJ, M. *Multidimensional particle swarm optimization for machine learning and pattern recognition*. Springer, 2014.
- [91] KNIGHT, H. New algorithm can dramatically streamline solutions to the ‘max flow’ problem. *MIT News* 4 (2014), 21–26.
- [92] KNOSALA, R., AND ĆWIKŁA, G. *Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2002.
- [93] KOCHAŃSKA, J., MUSIAL, K., AND BURDUK, A. Rationalization of decision-making process in selection of suppliers with use of the greedy and tabu search algorithms. In *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance* (2018), Springer, pp. 275–284.
- [94] KRAMER, O. *Genetic algorithm essentials*, vol. 679. Springer, 2017.
- [95] KU, M.-Y., HU, M. H., AND WANG, M.-J. Simulated annealing based parallel genetic algorithm for facility layout problem. *International journal of production research* 49, 6 (2011), 1801–1812.
- [96] KYRIKLIDIS, C., VASSILIADIS, V., KIRYTOPOULOS, K., AND DOUNIAS, G. Hybrid nature-inspired intelligence for the resource leveling problem. *Operational Research* 14, 3 (2014), 387–407.
- [97] LAGUNA, M., BARNES, J. W., AND GLOVER, F. W. Tabu search methods for a single machine scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2, 2 (1991), 63–73.

- [98] LAGUNA, M., AND MARTI, R. *Scatter search: methodology and implementations in C*, vol. 24. Springer Science & Business Media, 2012.
- [99] ŁAMPIKA, Ł., MUSIAŁ, K., AND BURDUK, A. Case study of production planning optimization with use of the greedy and tabu search algorithms. In *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance* (2018), Springer, pp. 66–75.
- [100] ŁAMPIKA, Ł., MUSIAŁ, K., AND BURDUK, A. Case study of production planning optimization with use of the greedy and tabu search algorithms. In *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance* (2018), Springer, pp. 66–75.
- [101] LAND, A. H., AND DOIG, A. G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica* 28, 3 (jul 1960), 497.
- [102] LANZARONE, E., AND MATTA, A. Robust nurse-to-patient assignment in home care services to minimize overtimes under continuity of care. *Operations Research for Health Care* 3, 2 (2014), 48–58.
- [103] LI, L., CHANG, Q., NI, J., AND BILLER, S. Real time production improvement through bottleneck control. *International Journal of Production Research* 47, 21 (2009), 6145–6158.
- [104] LI, Y., AND MA, L. A hybrid ant algorithm for the vehicle routing problem. In *Applied Mechanics and Materials* (2012), vol. 182, Trans Tech Publ, pp. 2118–2122.
- [105] LIN, L., HAO, X.-C., GEN, M., AND JO, J.-B. Network modeling and evolutionary optimization for scheduling in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing* 23, 6 (2012), 2237–2253.
- [106] LIS, S. *Podstawy projektowania systemu rytmicznej produkcji*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1974.
- [107] LIU, F. A greedy algorithm for solving ordinary transportation problem with capacity constraints. *Operations Research Letters* 45, 4 (2017), 388–391.
- [108] LIU, X., NI, Z., AND QIU, X. Application of ant colony optimization algorithm in integrated process planning and scheduling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 84, 1-4 (2016), 393–404.

- [109] LU, H., CHEN, X., AND LIU, J. Parallel test task scheduling with constraints based on hybrid particle swarm optimization and taboo search. *Chinese Journal of Electronics* 21, 4 (2012), 615–618.
- [110] MAKUCHOWSKI, M., AND TYŃSKI, A. Automatyczna mutacja w algorytmach ewolucyjnych. *Automatyka/Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie* 13, 2 (2009), 443–452.
- [111] MANDERICK, B., AND MOYSON, F. *The Collective behaviour of Ants: An Example of Self-Organisation in Massive Parallelism*. Technical Report: AI-memo 1988-7., 1988. Technical Report: AI-memo 1988-7.
- [112] MARTINOVIC, J., AND SCHEITHAUER, G. Integer linear programming models for the skiving stock problem. *European Journal of Operational Research* 251, 2 (2016), 356–368.
- [113] MATAI, R., SINGH, S., AND MITTAL, M. Modified simulated annealing based approach for multi objective facility layout problem. *International Journal of Production Research* 51, 14 (2013), 4273–4288.
- [114] MCGARVEY, R. G., RIEKSTS, B. Q., VENTURA, J. A., AND AHN, N. Binary linear programming models for robust broadcasting in communication networks. *Discrete Applied Mathematics* 204 (2016), 173–184.
- [115] MELO, M., NICKEL, S., AND SALDANHA-DA GAMA, F. A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon. *International Journal of Production Economics* 136, 1 (2012), 218–230.
- [116] MURAKAMI, K., TASAN, S. O., GEN, M., AND OYABU, T. A case study of human resource allocation for effective hotel management. *Industrial Engineering and Management Systems* 10, 1 (2011), 54–64.
- [117] MUSIAŁ, K., GÓRNICKA, D., AND BURDUK, A. Improvement of production process scheduling with the use of heuristic methods. In *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance* (2018), Springer, pp. 195–204.
- [118] MUSIAŁ, K., GÓRNICKA, D., AND BURDUK, A. Improvement of production process scheduling with the use of heuristic methods. In *International Conference on Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance* (2018), Springer, pp. 195–204.

- [119] MUSIAŁ, K., KOCHAŃSKA, J., AND BURDUK, A. Rationalization of production order execution with use of the greedy and tabu search algorithms. In *The 13th International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications* (2018), Springer, pp. 251–259.
- [120] MUSIAŁ, K., KOTOWSKA, J., GÓRNICKA, D., AND BURDUK, A. Tabu search and greedy algorithm adaptation to logistic task. In *IFIP International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management* (2017), Springer, pp. 39–49.
- [121] MUSIAŁ, K., KOTOWSKA, J., GÓRNICKA, D., AND BURDUK, A. Tabu search and greedy algorithm adaptation to logistic task. In *IFIP International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management* (2017), Springer, pp. 39–49.
- [122] NADERI, B., AND RUIZ, R. A scatter search algorithm for the distributed permutation flowshop scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 239, 2 (2014), 323–334.
- [123] NEMBHARD, D. A., AND BENTEFOUET, F. Selection, grouping and assignment policies with learning-by-doing and knowledge transfer. *Computers & Industrial Engineering* 79 (2015), 175–187.
- [124] NGUYEN, P. K., CRAINIC, T. G., AND TOULOUSE, M. A tabu search for time-dependent multi-zone multi-trip vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research* 231, 1 (2013), 43–56.
- [125] NOURI, M., BEKRAR, A., JEMAI, A., TRENTESAUX, D., AMMARI, A. C., AND NIAR, S. Two stage particle swarm optimization to solve the flexible job shop predictive scheduling problem considering possible machine breakdowns. *Computers & Industrial Engineering* 112 (2017), 595–606.
- [126] NOUY, A. Generalized spectral decomposition method for solving stochastic finite element equations: invariant subspace problem and dedicated algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 197, 51-52 (2008), 4718–4736.
- [127] NOWICKI, E., AND SMUTNICKI, C. Some aspects of scatter search in the flow-shop problem. *European Journal of Operational Research* 169, 2 (2006), 654–666.

- [128] PAES, F. G., PESSOA, A. A., AND VIDAL, T. A hybrid genetic algorithm with decomposition phases for the unequal area facility layout problem. *European Journal of Operational Research* 256, 3 (2017), 742–756.
- [129] PAJAŁ, E. Doświadczenia w zakresie wdrażania koncepcji lean manufacturing w małych firmach produkcyjnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją*, 6 (2007), 111–118.
- [130] PAJAŁ, E. *Zarządzanie produkcją: produkt, technologia, organizacja*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2007.
- [131] PAN, Q.-K., AND RUIZ, R. An effective iterated greedy algorithm for the mixed no-idle permutation flowshop scheduling problem. *Omega* 44 (2014), 41–50.
- [132] PAWLAK, M. *Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.
- [133] PHILIP, D., ET AL. *Robust schedules and disruption management for job shops*. PhD thesis, Montana State University-Bozeman, College of Engineering, 2008.
- [134] PRIETO, I. M., AND PILAR PÉREZ SANTANA, M. Building ambidexterity: The role of human resource practices in the performance of firms from Spain. *Human Resource Management* 51, 2 (2012), 189–211.
- [135] RATTANATAMRONG, P., AND FORTES, J. A. Real-time scheduling of mixture-of-experts systems with limited resources. In *Proceedings of the 13th ACM international conference on Hybrid systems: computation and control - HSCC '10* (2010), ACM Press.
- [136] RIAHI, V., KHORRAMIZADEH, M., NEWTON, M. H., AND SATTAR, A. Scatter search for mixed blocking flowshop scheduling. *Expert Systems with Applications* 79 (2017), 20–32.
- [137] ROSHANI, A., AND GIGLIO, D. Simulated annealing algorithms for the multi-manned assembly line balancing problem: minimising cycle time. *International Journal of Production Research* 55, 10 (2017), 2731–2751.

- [138] RUDY, J., AND ŻELAZNY, D. Gaco: a parallel evolutionary approach to multi-objective scheduling. In *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization* (2015), Springer, pp. 307–320.
- [139] SAHU, A., AND TAPADAR, R. Solving the assignment problem using genetic algorithm and simulated annealing. In *IMECS* (2006), pp. 762–765.
- [140] SAHU, A., AND TAPADAR, R. Solving the assignment problem using genetic algorithm and simulated annealing. In *IMECS* (2006), pp. 762–765.
- [141] SALIH, Y. Revisiting dynamic programming for precedence-constrained traveling salesman problem and its time-dependent generalization. *European Journal of Operational Research* 272, 1 (2019), 32–42.
- [142] SAMANTA, S., AND CHAKRABORTY, S. Parametric optimization of some non-traditional machining processes using artificial bee colony algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 24, 6 (2011), 946–957.
- [143] SCHNEIDER, J., AND KIRKPATRICK, S. *Stochastic optimization*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [144] SERRA, D. Implementing turf analysis through binary linear programming. *Food quality and preference* 28, 1 (2013), 382–388.
- [145] SHAHABINEJAD, H., AND VOSOUGHI, N. Analysis of complex gamma-ray spectra using particle swarm optimization. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 911 (2018), 123–130.
- [146] SINGH, M. R., AND MAHAPATRA, S. S. A quantum behaved particle swarm optimization for flexible job shop scheduling. *Computers & Industrial Engineering* 93 (2016), 36–44.
- [147] SKOŁUD, B. *Planowanie wieloasortymentowej produkcji rytmicznej*. Wydawn. Politechniki Śląskiej, 2000.
- [148] SKOŁUD, B. *Zarządzanie operacyjne: produkcja w małych i średnich przedsiębiorstwach*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.



- [149] SOBASZEK, Ł. *Metoda projektowania harmonogramów odpornych z wykorzystaniem narzędzi predykcji*. PhD thesis, Politechnika Lubelska, 2019.
- [150] SOBASZEK, L., AND GOLA, A. Survival analysis method as a tool for predicting machine failures. 421–428.
- [151] SOBASZEK, Ł., GOLA, A., AND KOZŁOWSKI, E. Application of survival function in robust scheduling of production jobs. In *2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)* (2017), IEEE, pp. 575–578.
- [152] SOBASZEK, Ł., ŚWIĆ, A., AND GOLA, A. Koncepcja zastosowania narzędzi predykcji w projektowaniu harmonogramów odpornych. *Zarządzanie przedsiębiorstwem* 19, 2 (2016).
- [153] SP.Z.O.O., B. S. Produkty produkowane w przedsiębiorstwie Sitech Sp. z o.o. <http://www.sitech.com.pl> (maj, 2020).
- [154] SP.Z.O.O., B. S. Sitech Sp zoo. w strukturze Volkswagen. <http://www.brose-sitech.com/csr/RaportCSR2018-2019.pdf> (year:2018-2019).
- [155] STANZANI, A. D. L., PUREZA, V., MORABITO, R., SILVA, B. J. V. D., YAMASHITA, D., AND RIBAS, P. C. Optimizing multiship routing and scheduling with constraints on inventory levels in a brazilian oil company. *International Transactions in Operational Research* 25, 4 (2018), 1163–1198.
- [156] SUN, W., WANG, C., AND ZHANG, C. Factor analysis and forecasting of co2 emissions in hebei, using extreme learning machine based on particle swarm optimization. *Journal of cleaner production* 162 (2017), 1095–1101.
- [157] TALBI, E.-G. *Metaheuristics: from design to implementation*, vol. 74. John Wiley & Sons, 2009.
- [158] TOFFOLO, T. A., WAUTERS, T., VAN MALDEREN, S., AND BERGHE, G. V. Branch-and-bound with decomposition-based lower bounds for the traveling umpire problem. *European Journal of Operational Research* 250, 3 (2016), 737–744.

- [159] TRAFALIS, T., AND KASAP, S. An affine scaling scatter search approach for continuous global optimization problems. *Intelligent Engineering Systems Through Artificial Neural Networks 6* (1996), 1027–1032.
- [160] TZENG, G.-H., AND HUANG, J.-J. *Multiple attribute decision making: methods and applications*. Chapman and Hall/CRC, 2011.
- [161] UTKINA, I. E., BATSYN, M. V., AND BATSYNA, E. K. A branch-and-bound algorithm for the cell formation problem. *International Journal of Production Research 56*, 9 (2018), 3262–3273.
- [162] VANDENHEEDE, L., VANHOUCKE, M., AND MAENHOUT, B. A scatter search for the extended resource renting problem. *International Journal of Production Research 54*, 16 (2016), 4723–4743.
- [163] VENDITTI, L., PACCIARELLI, D., AND MELONI, C. A tabu search algorithm for scheduling pharmaceutical packaging operations. *European Journal of Operational Research 202*, 2 (2010), 538–546.
- [164] WANG, K.-J., AND CHEN, M.-J. Cooperative capacity planning and resource allocation by mutual outsourcing using ant algorithm in a decentralized supply chain. *Expert Systems with Applications 36*, 2 (2009), 2831–2842.
- [165] WANG, S., LIU, M., AND CHU, C. A branch-and-bound algorithm for two-stage no-wait hybrid flow-shop scheduling. *International Journal of Production Research 53*, 4 (2015), 1143–1167.
- [166] WANG, Y. Improving artificial bee colony and particle swarm optimization to solve tsp problem. In *2018 International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems (ICVRIS)* (2018), IEEE, pp. 179–182.
- [167] WIĘCEK, M. I. P. *Zastosowanie narzędzia sztucznej inteligencji w sterowaniu zapasami towarów w warunkach niepewności*. PhD thesis, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, 2017.
- [168] WONG, L.-P., PUAN, C. Y., LOW, M. Y. H., AND CHONG, C. S. Bee colony optimization algorithm with big valley landscape exploitation for job shop scheduling problems. In *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation* (2008), Winter Simulation Conference, pp. 2050–2058.

- [169] WU, W., WEI, J., GUAN, X., AND SHI, L. A hybrid nested partitions algorithm for scheduling flexible resource in flow shop problem. *International Journal of Production Research* 50, 10 (2012), 2555–2569.
- [170] YOSHIKAWA, H. T. Y., ET AL. Scatter search for a real-life heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows and split deliveries in brazil. *European Journal of Operational Research* 199, 3 (2009), 750–758.
- [171] ZEGORDI, S., AND NIA, M. B. A multi-population genetic algorithm for transportation scheduling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45, 6 (2009), 946–959.
- [172] ZHANG, H., XIE, J., GE, J., ZHANG, Z., AND ZONG, B. A hybrid adaptively genetic algorithm for task scheduling problem in the phased array radar. *European Journal of Operational Research* 272, 3 (2019), 868–878.
- [173] ZHANG, J., DING, G., ZOU, Y., QIN, S., AND FU, J. Review of job shop scheduling research and its new perspectives under industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing* 30, 4 (2019), 1809–1830.
- [174] ZHANG, R., ONG, S., AND NEE, A. Y. A simulation-based genetic algorithm approach for remanufacturing process planning and scheduling. *Applied Soft Computing* 37 (2015), 521–532.
- [175] ZHENG, Y., XIAO, Y., AND SEO, Y. A tabu search algorithm for simultaneous machine/agv scheduling problem. *International Journal of Production Research* 52, 19 (2014), 5748–5763.
- [176] ŽULJ, I., KRAMER, S., AND SCHNEIDER, M. A hybrid of adaptive large neighborhood search and tabu search for the order-batching problem. *European Journal of Operational Research* 264, 2 (2018), 653–664.
- [177] ZWOLIŃSKA, B., GRZYBOWSKA, K., ET AL. Shaping production change variability in relation to the utilized technology. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, icpr (2017).

# Spis tabel

1	Liczba artykułów w poszczególnych kategoriach w latach 2014-2020 . . . . .	3
2.1	Podejścia w definiowaniu algorytmu, heurystyki oraz meta-heurystyki . . . . .	28
2.2	Podsumowanie wybranych algorytmów w inżynierii produkcji	46
2.3	Podsumowanie wybranych algorytmów w inżynierii produkcji - cd . . . . .	47
5.1	Parametry zadań . . . . .	67
5.2	Harmonogram wykonania zadań . . . . .	67
5.3	Wyniki obliczeń . . . . .	76
6.1	Wykorzystanie poszczególnych wyrobów grupy DOPEL w modułach produkcyjnych . . . . .	88
6.2	Wykaz operacji technologicznych dla wyrobu DOPEL LL_V1	89
6.4	Wykaz operacji technologicznych dla wyrobu DOPEL RL_V2	89
6.3	Wykaz wszystkich operacji technologicznych dla wyrobów grupy DOPEL . . . . .	90
6.5	Wykaz operacji technologicznych dla wyrobu DOPEL RL_V1	91
6.6	Wykaz operacji technologicznych dla wyrobu DOPEL LL_V2	94
7.1	Wydajność produkcyjna oraz zapotrzebowanie na pracowników	106
7.2	Sposoby produkcji wybranych wyrobów grupy Dopel . . . . .	107
7.3	Program produkcji wybranych wyrobów grupy Dopel - kontynuacja . . . . .	108
7.4	Zamówienie produkcyjne i sposoby wykonania . . . . .	109
7.5	Czas realizacji wszystkich zadań [sec] . . . . .	110
7.6	Odchylenie względne czasu realizacji zadań [%] . . . . .	110
7.7	Plan produkcyjny . . . . .	115
7.8	Liczba operatorów i spawaczy w poszczególnych dniach oraz wskaźnik WZP w [%] . . . . .	117

# Spis rysunków

1	Wynik wyszukania haseł "metaheuristic" AND "algorithm" AND "optimization" w bazach Scopus oraz Web of Science w poszczególnych latach 2014 – 2020 . . . . .	4
2	Wynik wyszukań haseł "metaheuristic" OR "algorithm" OR "optimization" w bazach Scopus oraz Web of Science w latach 2014 – 2020 . . . . .	5
3	Wynik wyszukań hasła "production scheduling", w bazach Scopus oraz Web of Science w latach 2014 – 2020 . . . . .	5
4	Wynik wyszukań haseł "production scheduling" AND ("metaheuristic" OR "algorithm" OR "metaheuristic") w bazach Scopus oraz Web of Science w latach 2014 – 2020 . . . . .	6
1.1	Schemat planowania produkcji w przedsiębiorstwie . . . . .	10
1.2	Schemat układu sterowania produkcją . . . . .	11
1.3	Schemat funkcjonowania systemu pchającego [33] . . . . .	13
1.4	Schemat funkcjonowania systemu ssącego [32] . . . . .	13
1.5	Schemat funkcjonowania systemu wyciskającego [32] . . . . .	14
1.6	Schemat cyklu szeregowego dla 3 operacji [32] . . . . .	17
1.7	Schemat cyklu równoległego [32] . . . . .	18
1.8	Schemat przebiegu cyklu szeregowo-równoległego [32] . . . . .	18
2.1	Klasyfikacja metod inteligentnych według Beheshti i Shamsuddin [17] . . . . .	29
2.2	Klasyfikacja metod inteligentnych w optymalizacji produkcji	30
2.3	Schemat działania algorytmu Tabu Search . . . . .	36
2.4	Schemat funkcjonowania algorytmu Scatter Search . . . . .	37
2.5	Schemat działania algorytmu symulowanego wyżarzania . . . . .	38
2.6	Przykładowa reprezentacja problemu dla algorytmu mrówkowego . . . . .	39
2.7	Ogólny schemat działania algorytmu ewolucyjnego . . . . .	40
2.8	Schemat działania algorytmu zachłannego . . . . .	41

2.9	Schemat działania algorytmu poszukiwanie rojem cząstek . . . . .	42
2.10	Schemat działania algorytmu przeszukiwanie rojem pszczół . . . . .	43
4.1	Metodyka harmonogramowania produkcji w oparciu o optymalizację wykorzystania zasobów ludzkich . . . . .	57
4.2	Schemat struktury produkcyjno-administracyjnej . . . . .	58
4.3	Programy produkcyjne dla poszczególnych wyrobów . . . . .	61
4.4	Przykładowe warianty przyporządkowania sposobów wykonania do zadań . . . . .	62
5.1	Wygenerowany harmonogram pracy pracowników . . . . .	68
5.2	Struktura sieci neuronowej . . . . .	72
6.1	Produkty produkowane w przedsiębiorstwie Brose Sitech Sp. z o.o. [153] . . . . .	79
6.2	Główne etapy procesu produkcyjnego w Zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach . . . . .	80
6.3	Zdjęcie produkowanego wyrobu na hali III (Tłocznia) [153] . . . . .	80
6.4	Zdjęcie operacji spawania ręcznego wyrobu w zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach [153] . . . . .	81
6.5	Zdjęcie systemu kołowo-karuzelowego po lakierni na hali nr I (KTL) w zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach [153] . . . . .	82
6.6	Zdjęcie przykładowej operacji montażu w zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach [154] . . . . .	82
6.7	Projekty i grupy produktów produkowanych w zakładzie Brose Sitech Sp. z o.o. w Polkowicach [154] . . . . .	84
6.8	Części potrzebne dla wyrobu Doppel RL_V1 . . . . .	86
6.9	Schemat wyrobu DOPEL RL_V1 . . . . .	86
6.10	Wnętrze siedzenia samochodowego oraz siedzenie ze stelażem (skrzynią) DOPEL RL_V1 . . . . .	87
6.11	Fragment hali produkcyjnej II na którym produkowana jest grupa wyrobów DOPEL . . . . .	88
6.12	Layout i schemat przepływu materiałów pomiędzy stanowiskami dla wyrobów grupy DOPEL . . . . .	92
6.13	Schemat planowania produkcji w przedsiębiorstwie . . . . .	93
7.1	Harmonogram pracy modułu produkcyjnego [s] . . . . .	105
7.2	Harmonogram pracy modułu produkcyjnego . . . . .	111
7.3	Harmonogram dla 12 operatorów i 17 spawaczy . . . . .	111
7.4	Harmonogram dla 11 operatorów i 18 spawaczy . . . . .	112
7.5	Harmonogram dla 10 operatorów i 19 spawaczy . . . . .	113

7.6	Plan produkcyjny firmy Brose Sitech . . . . .	116
8.1	Aplikacja SITECH-kalkulator, marsztury . . . . .	121
8.2	Aplikacja SITECH-kalkulator, programy produkcyjne . . . .	122
8.3	Aplikacja SITECH-kalkulator, tygodniowy plan produkcyjny przedsiębiorstwa Brose Sitech . . . . .	123
8.4	Aplikacja SITECH-kalkulator, przyporządkowanie pracow- ników do produktów . . . . .	124
8.5	Aplikacja SITECH-kalkulator, legenda dla produkowanych wyrobów . . . . .	124
8.6	Aplikacja SITECH-kalkulator, plan produkcyjny . . . . .	125
8.7	Aplikacja SITECH-kalkulator, obciążenie modułów produk- cyjnych w ujęciu tygodniowym . . . . .	126
8.8	Aplikacja SITECH-kalkulator, obciążenie modułów produk- cyjnych w ujęciu dziennym . . . . .	126
8.9	Aplikacja SITECH-kalkulator, obciążenie modułów produk- cyjnych w przedsiębiorstwie . . . . .	126