

Politechnika Wroclawska
Wydział Informatyki i Zarządzania
Instytut Informatyki

Rozprawa doktorska

ZASTOSOWANIE METOD ROZPOZNAWANIA
W HARMONOGRAMOWANIU PRODUKCJI ZE
ZMIENNYM STRUMIENIEM ZAMÓWIEŃ

Krzysztof Kujawski

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Świątek

Wrocław 2011

*Składam wyrazy wdzięczności profesorowi Jerzemu Świątkowi
za nadanie kierunku oraz pomoc w pracy naukowej.
Darii Szremskiej dziękuję za cierpliwość i wsparcie.
Pracę dedykuję rodzicom Alicji i Wojciechowi.*

ROZDZIAŁ 1. ZASTOSOWANIE METOD ROZPOZNAWANIA W HARMONOGRAMOWANIU PRODUKCJI ZE ZMIENNYM STRUMIENIEM ZAMÓWIEŃ – POJĘCIA PODSTAWOWE	5
1.1. WPROWADZENIE	5
1.2. PROBLEMY HARMONOGRAMOWANIA	6
1.2.1. <i>Klasyfikacja problemów harmonogramowania</i>	10
1.2.2. <i>Cykliczna organizacja zamówień</i>	17
1.2.3. <i>Organizacja ze zmiennym strumieniem zamówień</i>	18
1.3. CHARAKTERYSTYKA LINII GALWANOTECHNICZNYCH	22
1.4. ZADANIE ROZPOZNAWANIA.....	31
1.5. AKTUALNY STAN BADAŃ	35
1.5.1. <i>Organizacja cykliczna</i>	35
1.5.2. <i>Organizacja ze zmiennym strumieniem zamówień</i>	43
1.6. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY.....	47
ROZDZIAŁ 2. ALGORYTMY HARMONOGRAMOWANIA ZE ZMIENNYM STRUMIENIEM ZAMÓWIEŃ	49
2.1. ZADANIE HARMONOGRAMOWANIA W CZASIE RZECZYWISTYM.....	49
2.2. ZADANIE HARMONOGRAMOWANIA	52
2.2.1. <i>Parametry zadania harmonogramowania</i>	52
2.2.2. <i>Zmienne decyzyjne</i>	55
2.2.3. <i>Kryterium</i>	57
2.2.4. <i>Ograniczenia</i>	57
2.2.5. <i>Harmonogram kolejki produktów</i>	64
2.3. ZADANIE CYKLICZNEGO HARMONOGRAMOWANIA DŹWIGÓW	64
2.3.1. <i>Parametry cyklicznego zadania harmonogramowania</i>	64
2.3.2. <i>Zmienne decyzyjne</i>	65
2.3.3. <i>Kryterium</i>	67
2.3.4. <i>Ograniczenia</i>	67
2.3.5. <i>Rozwijanie cyklogramu</i>	71
2.4. PODZIAŁ ZAMÓWIENIA NA SEGMENTY	73
2.5. WYKORZYSTANIE METOD ROZPOZNAWANIA DO SELEKCJI SCENARIUSZA	73
2.5.1. <i>Problem wyboru scenariusza</i>	74
2.5.2. <i>Przygotowanie zbioru scenariuszy</i>	76
2.5.3. <i>Przygotowanie ciągu uczącego</i>	77
2.6. DOPASOWANIE SEGMENTÓW HARMONOGRAMU	80
2.7. UKŁADANIE BEZKOLIZYJNEJ MARSZRTY DŹWIGÓW	83
2.7.1. <i>Detekcja kolizji</i>	84
2.7.2. <i>Schemat układania marszrut dźwigów</i>	86
2.7.3. <i>Strategie układania tras</i>	87
2.8. SCHEMAT ALGORYTMU HARMONOGRAMOWANIA	89
2.8.1. <i>Pseudokod algorytmu harmonogramowania</i>	90
2.9. ANALIZA ZŁOŻONOŚCI ALGORYTMU HARMONOGRAMOWANIA	91
2.10. CECHY SYSTEMU HARMONOGRAMOWANIA	94
ROZDZIAŁ 3. BADANIA SYMULACYJNE.....	97
3.1. PLAN I ZAKRES BADAŃ SYMULACYJNYCH	97
3.2. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ NUMERYCZNYCH.....	98
3.2.1. <i>Wyniki związane z pracą w czasie rzeczywistym</i>	98
3.2.1.1 <i>Badanie wpływu maksymalnej liczby etapów procesu technologicznego na czas obliczeń</i>	98
3.2.1.2 <i>Badanie wpływu czasu trwania procesu technologicznego na czas obliczeń</i>	100

3.2.1.3	<i>Badanie wpływu wielkości zamówienia na czas obliczeń</i>	102
3.2.2.	<i>Wyniki związane z oceną jakości harmonogramów</i>	104
3.2.2.1	<i>Współczynnik zrównoleglenia systemu produkcyjnego</i>	105
3.2.2.2	<i>Dolne ograniczenie wartości kryterium</i>	105
3.2.2.3	<i>Wyniki dotyczące jakości harmonogramów dla przykładów testowych z literatury</i>	108
3.2.2.4	<i>Wyniki badań symulacyjnych związane z porównaniem organizacji cyklicznej do organizacji ze zmiennym strumieniem zamówień</i>	113
3.2.3.	<i>Pozostałe wyniki</i>	115
3.2.3.1	<i>Wpływ zastosowania metod rozpoznawania na jakość uzyskanych harmonogramów</i>	115
3.2.3.2	<i>Badania pracy algorytmu w czasie rzeczywistym dla testu Linia galwanotechniczna-1</i>	116
3.3.	OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ SYMULACYJNYCH	119
3.4.	GRAFICZNY I TEKSTOWY OPIS HARMONOGRAMÓW	122
3.5.	PARAMETRY PROBLEMÓW TESTOWYCH	124
3.5.1.	<i>PhU-1</i>	125
3.5.2.	<i>Matile-1</i>	126
3.5.3.	<i>Jiyin-1</i>	129
3.5.4.	<i>Che-1</i>	131
3.5.5.	<i>Jegou-1</i>	134
3.5.6.	<i>Kopfer-1</i>	136
3.5.7.	<i>DEGEM-1</i>	139
3.5.8.	<i>Copper</i>	140
3.5.9.	<i>BlackOxide-1</i>	142
3.5.10.	<i>Linia galwanotechniczna-1</i>	144
ROZDZIAŁ 4. BADANIA SYMULACYJNE RZECZYWISTEJ LINII PRODUKCYJNEJ		149
4.1.	PARAMETRY SYSTEMU PRODUKCYJNEGO	149
4.2.	PRZYGOTOWANIE SYSTEMU HARMONOGRAMOWANIA	151
4.3.	WYNIKI	152
4.4.	OMÓWIENIE PRAKTYCZNEGO PRZYKŁADU	159
ROZDZIAŁ 5. PODSUMOWANIE		160
5.1.	PLAN DALSZYCH BADAŃ	161
SPIS NAJWAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ		163
SPIS ILUSTRACJI		164
SPIS TABEL		165
BIBLIOGRAFIA		167

Rozdział 1. Zastosowanie metod rozpoznawania w harmonogramowaniu produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień – pojęcia podstawowe

1.1. Wprowadzenie

Harmonogramowanie produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień jest zagadnieniem, spotykanym m. in. w przypadku galwanotechnicznych linii produkcyjnych. Na takich liniach produkty poddawane są obróbce poprzez reakcje chemiczne. Przetwarzane są głównie elementy metalowe. Poddawane są one czynnościom mającym na celu zmianę właściwości materiału lub przygotowanie przedmiotu do reakcji chemicznych. W szczególności są to reakcje galwanizacji. Przedmioty poddawane są ekspozycji elektrolitowi w stanowiskach roboczych, gdzie odkłada się na nich warstwa metalu. Linie mogą przetwarzać wiele typów produktów. Każdy typ produktu charakteryzuje się indywidualnie zdefiniowanym procesem technologicznym – przepisem, który określa jakiej obróbce ma zostać poddany przedmiot danego typu.

W ramach procesu technologicznego, definiuje się jakościowe wymagania odnośnie czasów ekspozycji produktu w poszczególnych etapach produkcji. Najczęściej wymagania są podane w postaci minimalnego i maksymalnego czasu ekspozycji. Jeśli przedmiot będzie poddany procesowi zbyt krótko, przedmiot nie osiągnie wymaganych własności, np. warstwa metalu będzie zbyt cienka, czyszczenie nie będzie wystarczająco dokładne, etc., zbyt długa ekspozycja może doprowadzić do zniszczenia przedmiotu, np. przez kwas, lub utratę pożądaných własności.

Przetwarzanie odbywa się bez udziału człowieka, dla którego etapy przetwarzania mogą być groźne ze względu na towarzyszące reakcjom opary, możliwość kontaktu z chemikaliami etc. Jest to możliwe dzięki automatom pracującym na linii. W uproszczeniu, udział człowieka sprowadza się do zaprogramowania automatów, kontroli samej produkcji oraz dostarczaniu i odbieraniu produktów.

Niniejsza rozprawa dotyczy części problemu, związanej z odpowiednim zaprogramowaniem automatów. Dokładniej, ze sposobem tworzenia szczegółowego planu produkcji – harmonogramu, czyli ustaleniu zadań poszczególnych automatów w trakcie produkcji. Dotyczy to głównie automatów związanych z transportem produktów między stanowiskami roboczymi – dźwigów (*ang. hoist*). Harmonogram określa zadania dźwigów tak, aby nie kolidowały one ze

sobą, a jednocześnie przenosiły produkty zgodnie z założonym przez człowieka procesem technologicznym.

W pracy rozważany jest przypadek organizacji produkcji, gdzie produkuje się wiele typów produktów jednocześnie, ale nie jest znana z góry ich liczba i kolejność, w której będą przetwarzane. To oznacza, że mamy do czynienia z tak zwanym zmiennym strumieniem zamówień. W takiej sytuacji harmonogram pracy automatów na linii musi być tworzony na bieżąco, wraz z pojawianiem się nowych zamówień. Sedno problemu tkwi w tym, że nie można zatrzymać pracy linii, aby móc ułożyć harmonogram, ponieważ produkty mogą ulec zniszczeniu, jeśli pozostaną zbyt długo w stanowiskach roboczych. Możliwość zniszczenia produktów wynika z chemicznego charakteru przetwarzania. Sposób tworzenia harmonogramu musi pogodzić wymaganie, aby linia pracowała wydajnie z wymaganiem, aby żaden przedmiot nie został zniszczony w trakcie produkcji.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów. Dalsza część rozdziału pierwszego opisuje charakterystykę tematu. Opisano podstawowe pojęcia potrzebne do zdefiniowania problemu. Rozdział zawiera również podstawowe informacje na temat systemów produkcyjnych, które są sferą zainteresowań rozprawy oraz przegląd literatury w celu przedstawienia aktualnego stanu badań. Podsumowanie pierwszego rozdziału zawiera cel, tezę oraz zakres rozprawy. Rozdział drugi zawiera formalny opis problemu oraz szczegółowy opis poszczególnych etapów proponowanego rozwiązania, zgodnie z postawioną tezą. Wykonano analizę złożoności obliczeniowej algorytmu oraz podsumowanie cech proponowanego rozwiązania. Rozdział trzeci poświęcony jest badaniom symulacyjnym, mającym na celu zweryfikowanie założeń oraz tezy rozprawy. Zbadana została również rzeczywista złożoność obliczeniowa proponowanego rozwiązania przy użyciu jego implementacji w systemie badawczym. Rozdział czwarty przedstawia działanie systemu badawczego dla rzeczywistego obiektu harmonogramowania, galwanotechnicznej linii produkcyjnej znajdującej się we Wrocławiu. Rozdział piąty podsumowuje przedstawione w rozprawie obserwacje i formułuje wnioski dotyczące opisanego w rozprawie rozwiązania. Przedstawione są możliwe rozszerzenia i możliwe dalsze kierunki badań.

1.2. Problemy harmonogramowania

Planowanie i harmonogramowanie produkcji to proces podejmowania decyzji w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Proces ten ma na celu alokację ograniczonych zasobów systemu produkcyjnego w taki sposób, aby optymalnie wykonywało swoją pracę i osiągnęło zamierzone cele [67].

Podstawowe pojęcia związane z harmonogramowaniem działania systemów produkcyjnych:

- produkt (ang. *job*) – często nazywane również, zawieszka, detalem – zasób, który jest przetwarzany przez system produkcyjny. Każdy produkt ma powiązany ze sobą proces technologiczny – definiujący zestaw operacji, które mają być na tym produkcie wykonane. Oznaczmy \mathcal{N} jako zbiór procesów technologicznych wykonywanych przez system produkcyjny:

$$n \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\} \quad (1.1)$$

gdzie N jest liczbą znanych procesów technologicznych, które mogą być realizowane w systemie produkcyjnym. Z punktu widzenia systemu produkcyjnego, N jest liczbą typów produktów przetwarzanych w tym systemie.

- stanowisko robocze – składnik systemu produkcyjnego. Miejsce, gdzie produkt jest przetwarzany w ramach przewidzianego dla niego procesu technologicznego. Maszyna, automat, stanowisko pracy, które realizuje pewien etap procesu technologicznego. Oznaczmy \mathcal{L} jako zbiór etykiet stanowisk roboczych dostępnych w systemie produkcyjnym:

$$l \in \mathcal{L} = \{1, \dots, L\} \quad (1.2)$$

gdzie L jest liczbą stanowisk roboczych dostępnych w systemie produkcyjnym.

- proces technologiczny – zdefiniowane zachowanie się systemu produkcyjnego dla każdego przetwarzanego produktu. Najczęściej składa się z etapów, gdzie każdy etap ma swoją charakterystykę produkcyjną – stanowisko robocze zdolne do wykonania tego etapu, czas przetwarzania, etc. Mając zbiór zdefiniowanych w systemie produkcyjnym procesów technologicznych \mathcal{N} , n -ty proces technologiczny można zapisać jako wektor:

$$O_n = (o_{n,1}, o_{n,2}, \dots, o_{n,i(n)}, \dots, o_{n,I^n}) \quad (1.3)$$

gdzie $\mathcal{I}(n)$ to zbiór indeksów etapów procesu technologicznego n :

$$i(n) \in \mathcal{I}^n = \{1, \dots, I^n\} \quad (1.4)$$

gdzie $i(n)$ jest indeksem zbioru \mathcal{S}^n , a I^n jest liczbą etapów n -tego procesu technologicznego. Każdy etap $o_{n,i(n)}$ wskazuje na etykietę stanowiska roboczego realizującego dany etap:

$$o_{n,i(n)} \in \mathcal{L} \quad (1.5)$$

- plan produkcji – podział złożonego zadania na operacje elementarne. Operacje elementarne to takie, które mogą być bezpośrednio zrealizowane przez zasób dostępny w systemie produkcyjnym – np. w przypadku systemów produkcyjnych: etap procesu technologicznego, operacja transportowa, wprowadzenie produktu do systemu, wyładowanie gotowego produktu z systemu. Plan tworzy się, gdy mamy do czynienia ze złożonym zadaniem, takim jak realizacja procesu technologicznego. Plan określa zależności między poszczególnymi operacjami elementarnymi, które odzwierciedlają charakterystykę procesu technologicznego.
- harmonogram – instrukcja działania systemu produkcyjnego, lista operacji do wykonania z określonymi czasami wykonania. Harmonogram jest zbiorem decyzji, według których ma postępować system produkcyjny. Harmonogram można traktować jako uszczegółowienie planu. Przypisuje operacje elementarne zasobom systemu produkcyjnego oraz decyduje o momencie i długości wykonywania zadania. Celem harmonogramu jest zapis podjętych decyzji odnośnie pracy systemu produkcyjnego w formie zrozumiałej dla odbiorcy. W zależności od odbiorcy harmonogramu, może przybierać różne formy – od wykresu Gantta, przez marszruty robotów, do skryptu napisanego w języku interpretowanym przez automaty.
- minimalny czas przetwarzania ($m_{n,i}$) – czas przetwarzania n -tego typu produktu w i -tym etapie procesu technologicznego.
- maksymalny czas przetwarzania ($M_{n,i}$) – n -tego typu produktu w i -tym etapie procesu technologicznego. W niektórych problemach harmonogramowania występuje potrzeba określenia czasu maksymalnego przetwarzania. Czas maksymalny dla danego etapu i produktu jest większy niż czas minimalny dla tego etapu i produktu. Czas maksymalny definiuje się wtedy, gdy po upływie czasu $M_{n,i}$, stanowisko robocze doprowadza do zniszczenia produktu lub wystarczająco znaczącej zmiany w produkcji powodującej bezpowrotnie zepsucie produktu.

- czas wprowadzenia (r_j) – jest to czas, kiedy j -ty produkt jest gotowy do przetworzenia przez system produkcyjny. Jeśli czasy wprowadzenia dla wszystkich produktów równe są zero, oznacza to wtedy, że wszystkie produkty dostępne są do wprowadzenia ich do systemu produkcyjnego jeszcze przed rozpoczęciem produkcji. Produkty mogą być oddawane do produkcji pojedynczo lub w partiach. Najczęściej jest to wynikiem nowego zamówienia.
- termin zakończenia (e_j) – jest to czas, kiedy przetwarzanie j -tego produktu powinno zostać ukończone. W niektórych problemach harmonogramowania nie określa się terminu zakończenia e_j . Jest on określony z reguły, gdy jakość harmonogramu definiuje się, jako brak opóźnień względem określonych terminów, np. gdy obiecano klientowi produkt w określonym terminie.

Planowanie produkcji, obejmuje szerokie spektrum zagadnień z wielu dyscyplin [68]. Można wydzielić następujące generalne etapy planowania [65]:

- planowanie programu produkcyjnego: estymacja wielkości produkcji na podstawie prognoz oraz zamówień klientów, prognozowanie wyrównanych czasowo potrzeb stanów magazynowych, estymacja możliwości produkcyjnych;
- planowanie produkcji – harmonogramowanie ogólne: określenie średnio i długoterminowych dat rozpoczęcia i zakończenia realizacji zamówień wynikających z przyjętej wielkości produkcji oraz bilansu zdolności produkcyjnych;
- planowanie potrzeb materiałowych: określenie potrzeb materiałowych z punktu widzenia rodzaju ilości i terminów dostaw. Często dotyczy półproduktów trudnych w zarządzaniu, tj. opakowań lub elementów wykonywanych przez poddostawców;
- harmonogramowanie produkcji: podział na partie, określenie kolejności zamówień, alokacja zadań zasobom w czasie;

Dalsza część rozprawy będzie dotyczyła zagadnienia harmonogramowania produkcji. Harmonogramowanie ma na celu stworzenie harmonogramu maszyn pracujących w systemie produkcyjnym. Harmonogram przypisuje każdej maszynie biorącej udział w produkcji czynność, jaką ma ona wykonywać w danej chwili w trakcie całej produkcji.

1.2.1. Klasyfikacja problemów harmonogramowania

Problemy harmonogramowania są przedmiotem rozważań teoretycznych. Doprowadziło to do wydzielenia się pewnych rodzajów problemów harmonogramowania, mających podobne charakterystyki. Problemy harmonogramowania możemy podzielić:

- według możliwości zmian systemu w czasie – dynamiczne, statyczne,
- deterministyczne i probabilistyczne,
- teoretyczne i praktyczne,
- według organizacji zamówień – jednokrotne, cykliczne, ze strumieniem zamówień,
- według rodzaju rozpatrywanego problemu.

Jeśli w trakcie produkcji dopuszcza się wystąpienie niezaplanowanych zmian parametrów systemu produkcyjnego – np. na skutek awarii, pojawienia się zamówienia zupełnie nowego typu produktu o nieznanym dotychczas procesie technologicznym, degradacji elementów systemu produkcyjnego – a mimo wystąpienia tych zmian kontynuuje się harmonogramowanie, wtedy mamy do czynienia z dynamicznym problemem harmonogramowania. W przeciwnym wypadku mamy do czynienia ze problemem statycznym.

Rozważa się również tzw. systemy masowej obsługi, gdzie niektóre parametry produkcji są zmiennymi losowymi. Jest to wtedy probabilistyczny problem harmonogramowania. Jeśli parametry nie mają charakteru losowego, problem harmonogramowania jest deterministyczny.

W literaturze rozpatruje się problemy, które zarówno występują w rzeczywistych systemach produkcyjnych jak i teoretyczne. W systemach teoretycznych bada się ich cechy charakterystyczne, porównuje z innymi problemami, służą jako pole testów różnych metod obliczeniowych, eksplorują potencjalne ulepszenia, etc. Problemy teoretyczne są najczęściej badane pod względem skalowalności stosowanych metod rozwiązywania, można je porównać z innymi problemami o podobnej złożoności, często są uproszczone, co ułatwia analizę. Algorytmy stosowane do rozwiązania nie są specjalizowane do danego problemu, najczęściej są to metody ogólne. Ze względu na swój charakter mają nikłe możliwości do zastosowania w praktyce. Większość problemów praktycznych ma więcej ograniczeń wynikających z fizycznych własności automatów. Najczęściej dotyczą pewnej ograniczonej, wyspecjalizowanej części problemu oraz nie da się ich łatwo porównać z innymi problemami harmonogramowania. Często do rozwiązania stosuje się specjalizowane heurystyki dostosowane lub wprost bazujące na dodatkowych ograniczeniach wynikających z dziedziny problemu. Podział na problemy

praktyczne i teoretyczne jest umowny. Każdy system produkcyjny może mieć własną charakterystykę powodującą, że sposoby rozwiązania, czyli stosowane algorytmy czy modele problemu, nie będą dla niego odpowiednie.

Można jednak wymienić kilka wspólnych cech problemów harmonogramowania:

- W praktyce dwa etapy procesu technologicznego nie mogą być wykonywane jednocześnie.
- Nie można w danym stanowisku roboczym przetwarzać dwóch produktów jednocześnie.
- Proces technologiczny produktu składa się z liczby etapów nierównej liczbie stanowisk roboczych w systemie produkcyjnym. W praktyce nie opłaca się budować systemu produkcyjnego, który nie posiada redundantnych stanowisk roboczych, lub stanowisk, które są używane w innych procesach technologicznych. W rzeczywistych systemach realizuje się najczęściej wiele procesów technologicznych, a niektóre stanowiska są wielofunkcyjne i mogą realizować więcej niż jeden etap procesu. Jeśli rozwiązanie zakłada, że liczba etapów pokrywa się z liczbą stanowisk to jest to rozwiązanie o charakterze teoretycznym.
- Etapy procesu technologicznego są niepodzielne. W praktyce nie dopuszcza się do sytuacji gdzie przerywa się przetwarzanie etapu procesu technologicznego, rozpoczyna się przetwarzanie innego produktu, a po zwolnieniu się stanowiska kontynuuje się przetwarzanie dla produktu w punkcie przerwania. Z tego typu opróżnianiem można spotkać się w harmonogramowaniu pracy np. procesora, gdzie możliwe jest wyłączenie zadania na rzecz innego o wyższym priorytecie, jednak jest to rzadkie w procesach wytwórczych.
- Produkty mogą oczekiwać na zwolnienie się stanowiska roboczego – poprzez opóźnianie transportu lub składowanie w buforach między etapami. Jest to często zgodne z praktyką, choć nie we wszystkich gałęziach przemysłu.
- Każdy typ maszyny jest reprezentowany przez jedno stanowisko robocze. W praktyce nie obowiązuje. Przeważnie występuje redundancja – stanowiska tych samych typów aranżuje się w grupy np. aby zniwelować wąskie gardło przetwarzania.
- Stanowiska robocze mogą oczekiwać beczynnienie na pojawienie się produktów.

- Maszyny się nie ulegają awariom. Niezgodne z praktyką, ale jeśli awarie są niezwykle rzadkie pomija się taką możliwość w założeniach harmonogramowania, aby uprościć problem. W takim wypadku, jeśli awaria wystąpi, przygotowane są plany awaryjne i nie należy to do procesu harmonogramowania.
- Nie występuje czynnik losowości i wszystkie parametry procesów technologicznych oraz systemu produkcyjnego są znane. W praktyce bardzo rzadko zdarza się, że parametry produkcji zmieniają się częściej, niż między uruchomieniem i wygaszeniem produkcji.

W problemie harmonogramowania dźwigów, rozważa się zamówienia jednokrotne, cykliczne oraz strumień zamówień. Dwa ostatnie sposoby organizacji zamówień są dokładniej opisane w rozdziałach 1.2.2 oraz 1.2.3.

Zamówienie jednokrotne jest to takie zamówienie, gdzie należy ułożyć harmonogram dla pewnego zbioru zamówionych produktów. Najczęściej jest to kolejka produktów, gdzie istotna jest kolejność wprowadzania do systemu produkcyjnego. Czasami algorytm harmonogramowania może dobierać kolejność przetwarzania produktów. Kolejność produktów, jest to w istocie kolejność powiązanych z produktem rodzajów procesów technologicznych, które należy wykonać. W zamówieniu jednokrotnym ułożony harmonogram nie zmienia się i najczęściej układa się go przed uruchomieniem produkcji.

W zamówieniu cyklicznym zakłada się, że produkt z góry określonego typu wprowadzany jest do systemu produkcyjnego co pewien stały interwał czasu. Nie ma z góry ograniczonej liczby produktów, które mają być wyprodukowane. W takiej sytuacji najczęściej opłaca się takie sformułowanie problemu, że harmonogram będący rozwiązaniem ma charakter cykliczny.

Strumień zamówień występuje wtedy, gdy należy w sposób ciągły tworzyć harmonogram dla spływających zamówień. Zamawiane produkty należą do zbioru wcześniej określonych typów, ale nie jest z góry wiadomo kiedy i jakie produkty zostaną zamówione. Harmonogram musi być w takiej sytuacji tworzony bądź uaktualniany w trakcie produkcji, jako odpowiedź na nowe zamówienie.

Rodzaje rozpatrywanego problemu w literaturze [73] przedstawia się za pomocą pięciu parametrów $\alpha^1|\alpha^2|\alpha^3|\alpha^4|\alpha^5$ gdzie:

- α^1 – liczba zadań do przetworzenia przez system produkcyjny, dla których należy ułożyć harmonogram.

- α^2 – liczba stanowisk roboczych, z których składa się system produkcyjny.
- α^3 – określa organizację przepływu produktów. Jeśli $\alpha^2=1$ to α^3 jest puste, w przeciwnym przypadku może oznaczać jeden z typów organizacji produkcji:
- $\alpha^3 = G$ – oznacza problem ogólny (ang. general-shop problem); każde zadanie wykonywane jest według indywidualnej marszruty technologicznej, relacje kolejnościowe pomiędzy operacjami poszczególnych zadań nie są dane. Produkty mogą zarówno odwiedzać dane stanowisko robocze więcej niż raz jak i odwiedzać tylko jedno z wielu stanowisk danego typu w ramach danego etapu procesu technologicznego.
- $\alpha^3 = F$ – problem przepływowy (ang. flow-shop problem); wszystkie produkty przetwarzane są w tej samej kolejności, która pokrywa się z kolejnością ułożenia stanowisk w systemie produkcyjnym oraz według tego samego procesu technologicznego.
- $\alpha^3 = O$ – problem otwartej kolejności (ang. open-shop problem); wszystkie produkty przetwarzane są według tego samego procesu technologicznego, jednak kolejność przetwarzania nie jest zadana.
- $\alpha^3 = J$ – problem gniazdowy (ang. job-shop problem); każde zadanie wykonywane jest według indywidualnej marszruty technologicznej, kolejność przetwarzania produktu jest zadana. Rozróżnia się problem, w którym to samo stanowisko robocze może być odwiedzane tylko raz lub wiele razy.
- α^4 – miara jakości harmonogramu – kryterium optymalizacji procesu harmonogramowania.
- α^5 – dodatkowe cechy zadania harmonogramowania:

Opróżnienia (ang. *pre-emption*) – możliwe jest przerwanie przetwarzania danego etapu procesu technologicznego, przeniesienie produktu poza stanowisko robocze, a następnie powrót i dokończenie etapu bez utraty czasu już spędzonego w tym stanowisku roboczym.

Ograniczenia pierwszeństwa (ang. *precedence constraints*) – rozpoczęcie pewnego etapu przetwarzania produktu na danym stanowisku roboczym jest możliwe jedynie, jeśli wcześniej pewien określony zbiór produktów został już

przetworzony w tym stanowisku. Ograniczenia mogą przybierać różną formę, np. łańcucha zależności, drzewa wejściowego lub wyjściowego.

Technologicznie zależne czasy inicjalizacji ($s_{i,j,k}$) (ang. *sequence dependent setup times*) – występują, gdy system produkcyjny musi wykonać jakąś dodatkową pracę inicjalizacyjną (sprzątanie, ponowna kalibracja, etc.) na skutek kolejności produktów. Jeśli $s_{i,j,k}$ nie jest zerem to oznacza, że stanowisko i -te wymaga $s_{i,j,k}$ czasu przerwy, gdy po produkcie j -tym następuje przetwarzanie produktu k -tego.

Awarie (ang. *brakedowns*) – rozważa się możliwość awarii stanowisk roboczych, lub innych zasobów w trakcie produkcji. W przypadku awarii maszyna jest niedostępna i nie może przetwarzać.

Bufor stanowisk roboczych (ang. *buffers*) – stanowiska robocze mogą przechowywać pewną liczbę produktów zanim będą one przetwarzane. W przypadku braku buforu może dochodzić do blokowania.

Blokowanie (ang. *blocking*) – jeśli stanowiska robocze nie mogą lub mają ograniczoną zdolność przechowywania produktów, może dochodzić do blokowania. Jeśli mamy do czynienia z przetwarzaniem przepływowym (*flow-shop*) to może zdarzyć się tak, że poprzednie stanowisko robocze będzie musiało czekać z ukończeniem przetwarzanego właśnie elementu do czasu końca blokowania.

Brak postojów (ang. *no-wait*) – produkty po ukończeniu danego etapu przetwarzania muszą trafić do następnego stanowiska roboczego bez zbędnej zwłoki.

Recyrkulacja (ang. *recirculation*) – produkty mogą odwiedzać to samo stanowisko więcej niż raz w trakcie ich procesu technologicznego.

W zależności od wymagań, kryterium optymalizacji harmonogramu może być określone w różny sposób. Oznaczmy C_{ij} jako czas opuszczenia stanowiska roboczego j -tego produktu, w i -tym etapie procesu technologicznego, a C_j jako czas opuszczenia ostatniego etapu procesu technologicznego j -tego produktu, co jest jednoznaczne z opuszczeniem systemu produkcyjnego

i końcem przetwarzania tego produktu. Opóźnienie (ang. *lateness*) produktu j -tego określa się jako:

$$L_j = C_j - e_j \quad (1.6)$$

Oprócz opóźnienia stosuje się również spóźnienie (ang. *tardiness*), które można zapisać jako:

$$T_j = \max(L_j, 0) \quad (1.7)$$

Oznaczmy czas przepływu:

$$F_j = C_j \quad (1.8)$$

Kryteria jakości harmonogramu najczęściej określa się jako bazujące na czasie wykonania lub wymaganych terminach zakończenia. Dla kryteriów bazujących na czasie wykonania używa się:

- Minimalizacja całkowitego czasu produkcji (C_{\max}) określanego, jako

$$C_{\max} = \max(C_1, C_2, \dots, C_J) \quad (1.9)$$

gdzie J jest liczbą produktów przetworzonych w trakcie całej produkcji. Takie kryterium utrzymuje wysoki współczynnik zużycia zasobów.

- Minimalizacja średniego czasu produkcji – średnia czasów końców produkcji.
- Minimalizacja maksymalnego czasu przepływu (J_{\max}) określanego, jako

$$J_{\max} = \max(J_1, J_2, \dots, J_J) \quad (1.10)$$

gdzie J jest liczbą produktów przetworzonych w trakcie całej produkcji. Może zmniejszać współbieżność przetwarzania wielu zasobów, minimalizuje czas oczekiwania produktu na dostęp do stanowisk roboczych.

- Minimalizacja średniego czasu przepływu – średnia czasów przepływów dla wszystkich produktów.

Kryteria bazowane na wymaganych terminach zakończenia:

- Minimalizacja maksymalnego opóźnienia (L_{\max}) określanego, jako:

$$L_{\max} = \max(L_1, L_2, \dots, L_J) \quad (1.11)$$

gdzie J jest liczbą produktów przetworzonych w trakcie całej produkcji. Karze się tutaj jakiegokolwiek opóźnienie względem założonych terminów.

- Minimalizacja średniego opóźnienia – średnia z opóźnień względem założonych terminów, premiowane jest przedterminowe kończenie przetwarzania produktu.
- Minimalizacja maksymalnego spóźnienia (T_{\max}) określanego, jako

$$T_{\max} = \max(T_1, T_2, \dots, T_J) \quad (1.12)$$

gdzie J jest liczbą produktów przetworzonych w trakcie całej produkcji. Karze się tutaj jakiegokolwiek opóźnienie względem założonych terminów, nie premiuje się wcześniejszego ukończenia przetwarzania

- Minimalizacja średniego czasu przepływu – średnia ze spóźnień względem założonych terminów, nie jest premiowane przedterminowe kończenie przetwarzania produktu

W kontekście wcześniej opisanych cech różnych problemów harmonogramowania, rozwiązywany w niniejszej rozprawie problem harmonogramowania można zaklasyfikować następująco:

- statyczny, deterministyczny,
- wprowadza się jak najmniej założeń, które przeszkadzałyby praktycznemu zastosowaniu proponowanego algorytmu harmonogramowania,
- system produkcyjny przetwarza strumień zamówień,
- $\alpha^1 \geq 1$ – harmonogram może obejmować przetwarzanie więcej niż jednego produktu,
- $\alpha^2 > 1$ – system produkcyjny składa się z wielu stanowisk roboczych,
- $\alpha^3 = J$ – produkty (typy produktów) mogą mieć zdefiniowane różne procesy technologiczne, każdy z procesów ma indywidualną sekwencję przetwarzania w stanowiskach roboczych, a stanowiska mogą być odwiedzane wielokrotnie,
- $\alpha^4 = C_{\max}$ – kryterium optymalizacji jest równe minimum czasu trwania produkcji,

- α^5 – brak możliwości opróżnienia, nie występują ograniczenia pierwszeństwa, nie występują czasy inicjalizacji zależne od sekwencji produktów, zakłada się brak awarii w trakcie produkcji (awaria oznacza przerwanie produkcji), brak buforów stanowisk roboczych, blokowanie, brak postojów – nie przechowuje się produktów między etapami procesu technologicznego, recyrkulacja.

1.2.2. Cykliczna organizacja zamówień

W systemach produkcyjnych takich jak linie galwanotechniczne najczęściej stosowaną organizacją produkcji jest praca cykliczna – produkty wprowadzane są do systemu z pewną stałą częstotliwością.

Najczęściej tego typu organizację stosuje się w produkcjach wieloseryjnych, gdzie wykonuje się ciągle ten sam proces technologiczny dla produktów tego samego typu. Przebrojenia na inny proces są stosunkowo rzadkie. Cykliczna organizacja produkcji najlepiej się sprawdza, gdy wprowadza się tylko jeden typ produktu. Mimo, iż niektóre rozwiązania spotykane w literaturze [78] rozważają cykliczną produkcję, gdzie co pewien interwał wprowadzanych jest kilka produktów o różnych procesach technologicznych, to nie zdobyły one popularności ani nie okazały się konkurencyjne [85] w stosunku do cyklogramów realizujących jeden proces technologiczny.. W dalszej części rozprawy będziemy zakładać, że cykliczna organizacja zamówień dotyczy produkcji gdzie wszystkie produkty poddawane są temu samemu procesowi technologicznemu. Oczywiście nie wyklucza to możliwości realizacji wielu procesów technologicznych przez system produkcyjny. W produkcji cyklicznej w danym czasie przetwarza się tylko jeden rodzaj produktów, ale system można przebroić – zmienić harmonogram na taki, który realizuje inny proces technologiczny.

Produkty wprowadzane są do systemu przez człowieka lub automatyczny podajnik. Po wprowadzeniu produkt jest przetwarzany przez system produkcyjny. Cykliczność pracy systemu produkcyjnego wynika z faktu, że możliwa częstotliwość wprowadzania produktów jest zdecydowanie większa niż jego przepustowość.

Różnica między zamówieniem jednokrotnym a cyklicznym polega na innym wyniku rozwiązania. W przypadku zamówień jednokrotnych, harmonogram będący wynikiem harmonogramowania, zawiera wszystkie operacje systemu produkcyjnego potrzebne do przetworzenia zamówionych produktów. Dane są: czas rozpoczęcia przetwarzania, czas przetwarzania dla wszystkich etapów oraz inne dane potrzebne do działania systemu produkcyjnego. W przypadku cyklicznym stosuje się specjalny rodzaj harmonogramu – cyklogram.

Cyklogram jest to taki harmonogram, który zawiera operacje potrzebne do wykonania tylko jednego produktu oraz jest skonstruowany w taki sposób, że można go powtarzać wielokrotnie bez ryzyka zniszczenia przetwarzanych produktów. Cyklogram ma określony czas trwania – długość cyklu. Można go powtarzać poprzez przesunięcie wszystkich operacji o wielokrotność długości cyklu. Oznaczmy \mathcal{V}^n jako zbiór cyklogramów dla produktu typu n :

$$v_{n,v} \in \mathcal{V}^n = \{v_{n,1}, v_{n,2}, \dots, v_{n,V^n}\} \quad (1.13)$$

gdzie V^n jest liczbą znanych cyklogramów dla produktów typu n . Cyklogram charakteryzują dwie główne cechy: długość cyklu oraz ładowność. Długość cyklogramu, czyli takt oznaczamy jako:

$$T: \mathcal{V}^n \rightarrow \mathbb{R} \quad (1.14)$$

czyli $T(v_{n,v})$ to długość v -tego cyklogramu dla produktu typu n -tego w sekundach. Ładowność cyklogramu jest to liczba cykli – powtórzeń cyklogramu, którą należy wykonać, aby system produkcyjny osiągnął pełne załadowanie. Gdy system produkcyjny jest całkowicie załadowany, każdy cykl wykonany według cyklogramu, powoduje wykonanie kolejnego produktu. Zanim system produkcyjny osiągnie całkowite załadowanie, produkty są jedynie wprowadzane do systemu i przetwarzane zgodnie z wytycznymi cyklogramu. Podobna sytuacja ma miejsce, gdy zaprzestanie się wprowadzania produktów do systemu. Należy wykonać tyle cykli cyklogramu ile wynosi ładowność, aby zakończyć pracę systemu produkcyjnego. Ładowność można zapisać, jako:

$$G: \mathcal{V}^n \rightarrow \mathbb{N} \quad (1.15)$$

czyli $G(v_{n,v})$ to ładowność v -tego cyklogramu dla produktu typu n -tego.

1.2.3. Organizacja ze zmiennym strumieniem zamówień

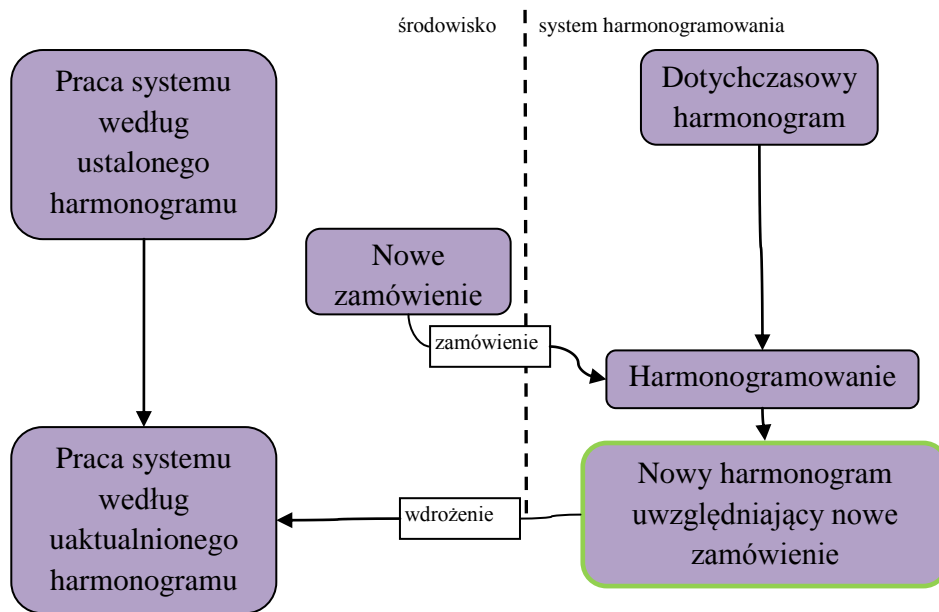
Gdy użytkownikowi systemu produkcyjnego zależy na jego elastyczności, czyli możliwości produkcji szerokiego asortymentu produktów przy częstych zmianach typu produkowanego produktu i stosunkowo krótkich seriach, może się on zdecydować na wprowadzenie produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień. W przeciwieństwie do zamówienia jednokrotnego liczba produktów do przetworzenia nie jest z góry znana. W przeciwieństwie do pracy z zamówieniami cyklicznymi zamawiane produkty mogą być różnych typów i nie muszą być wprowadzane co pewien określony interwał. Produkty oddawane są do przetworzenia na bieżąco w trakcie produkcji. Nowe zamówienia wpływają w czasie

rzeczywistym – w trakcie produkcji. Zamówienia układa się w kolejkę. Produkty z kolejki mogą być wprowadzone do systemu produkcyjnego.

Taka organizacja może być wygodna, gdy produkty przed przetworzeniem wymagają wcześniejszego przygotowania przez ludzi, co trwa zmienną ilość czasu. Powoduje to, że zamówienia spływają z magazynu na bieżąco, a nie w stałych odstępach. Organizacja ze zmiennym strumieniem zamówień jest również użyteczna dla planowania średnioterminowego, bo pozwala na większą swobodę podczas tworzenia zamówień. Praca ze strumieniem zamówień może również prowadzić do lepszego zużycia zasobów a co za tym idzie do zwiększenia wydajności systemu produkcyjnego. Dzieje się tak, ponieważ podczas produkcji różnych typów zadań jednocześnie, mogą one używać pewnego rozłącznego podzbioru stanowisk roboczych. Dzięki temu nie blokują się i są przetwarzane w sposób równoległy. Taka organizacja produkcji pozwala również na łatwą realizację zamówień priorytetowych – gdzie określony termin zakończenia wybranych produktów jest bliski.

Korzyści wynikające z zastosowania tej organizacji zamówień są dostępne kosztem bardziej skomplikowanego procesu harmonogramowania. Tworzenie harmonogramu pracy systemu produkcyjnego musi odbywać się w czasie rzeczywistym. Dlatego potrzebny jest system harmonogramowania, pracujący w czasie rzeczywistym, który będzie aktualizował harmonogram pracy systemu produkcyjnego.

System czasu rzeczywistego [11] można zdefiniować, jako system utrzymujący ciągłą współpracę z asynchronicznym środowiskiem – takim, które postępuje w sposób niezależny, niekooperujący w stosunku do systemu czasu rzeczywistego. System czasu rzeczywistego jest w pełni odpowiedzialny za synchronizację swoich operacji względem środowiska, z którym współpracuje. Odpowiedź systemu nie tylko musi być poprawna, w sensie spełniania ograniczeń harmonogramu, ale również czas odpowiedzi decyduje o poprawności reakcji na zdarzenia środowiska. System czasu rzeczywistego z jednej strony ma szereg wejść, które są obserwacjami środowiska oraz szereg operacji sterujących. W przypadku systemu produkcyjnego obserwowana jest kolejka zamówień, a operacją sterującą jest przesłanie harmonogramu wraz z poleceniem jego wdrożenia. System czasu rzeczywistego ma na celu nadzorowanie, sterowanie lub terminowe reagowanie na zdarzenia zachodzące w środowisku [72].



Rysunek 1.1 Podstawowe operacje systemu harmonogramowania

Na rysunku 1.1 przedstawiono zachowanie się systemu harmonogramowania dla organizacji zamówień ze zmiennym strumieniem zamówień. Z punktu widzenia systemu harmonogramowania istotna jest operacja wdrożenia. Gdy pojawi się nowe zamówienie system produkcyjny jest najczęściej w trakcie przetwarzania. W zależności od rodzaju problemu, możliwe jest albo zatrzymanie produkcji na czas harmonogramowania albo co zdarza się dużo częściej, nie można zatrzymać produkcji lub jest to zbyt kosztowne. Będziemy rozpatrywać przypadek, gdy przerwanie produkcji jest niemożliwe. W takiej sytuacji po pojawieniu się nowego zamówienia, system produkcyjny kontynuuje pracę według dotychczasowego harmonogramu do czasu wdrożenia nowego.

Głównym problemem, który się pojawia i wynika z faktu, że mamy do czynienia z systemem czasu rzeczywistego, jest możliwość spóźnienia się systemu harmonogramowania względem pracy systemu produkcyjnego. System harmonogramowania musi przygotować taki harmonogram, który będzie można wdrożyć do systemu produkcyjnego. Harmonogram można wdrożyć, jeśli w pewnej chwili czasu w przyszłości względem czasu bieżącego dotychczasowy harmonogram oraz nowy harmonogram powiązane są z tym samym stanem systemu produkcyjnego. Ten sam stan systemu produkcyjnego oznacza, że wszystkie produkty znajdują się w tym samym stanie zaawansowania, zasoby linii są w tym samym stanie etc. Innymi słowy nowy harmonogram od pewnego momentu kontynuuje pracę systemu produkcyjnego. Gdyby nowy harmonogram nie był zgodny ze starym, system produkcyjny fizycznie nie jest w stanie wykonać operacji przewidzianych w harmonogramie, a co za tym idzie produkty stają się wadliwe.

Oprócz dodatkowych wymagań nałożonych na harmonogram, mamy do czynienia z wpływem czasu trwania samego procesu harmonogramowania na wynik. Im dłużej trwa wykonywanie algorytmu harmonogramowania, tym więcej czasu mija na produkcji według dotychczasowego harmonogramu. To ogranicza liczbę zgodnych harmonogramów, które można stworzyć. Pogarsza to również wartość kryterium jakości określone w problemie harmonogramowania. W granicznym przypadku system produkcyjny może ukończyć przetwarzanie wszystkich produktów, których produkcja była przewidziana w dotychczasowym harmonogramie, a nowy harmonogram byłby ciągle w trakcie tworzenia. System produkcyjny jest wtedy zmuszony do bezczynnego oczekiwania. Można to traktować, jako marnotrawienie zasobów. W takiej sytuacji wszystkie korzyści z zastosowania organizacji ze zmiennym strumieniem zamówieniem są tracone. Dlatego wydajność algorytmu tworzącego harmonogram jest kluczowa przy takiej organizacji produkcji.

Produkcja ze zmiennym strumieniem zamówień jest tak zwanym miękkim systemem czasu rzeczywistego. W twardych systemach czasu rzeczywistego odpowiedź systemu na zdarzenie w środowisku musi być gotowa przed z góry określonym terminem. W miękkim systemie czasu rzeczywistego dopuszcza się opóźnienie. Może mieć ono negatywny wpływ na jakość wyniku generowanego przez system harmonogramowania, jednak w mniejszym stopniu ogranicza proces decyzyjny.

W trakcie trwania produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień, harmonogram jest aktualizowany wielokrotnie. Podczas poszczególnych aktualizacji nie ma możliwości podejmowania decyzji tak, aby optymalizować harmonogram od uruchomienia do wygaszenia produkcji, ze względu na niepewność związaną z kolejnymi zamówieniami. W pracy [44] pokazano, że dla wielu problemów testowych kryterium minimalizacji długości harmonogramu dla każdej aktualizacji daje najlepsze rezultaty. Kryterium minimalizacji długości harmonogramu przy każdym nowym zamówieniu jest szeroko stosowane w literaturze [33], [64]. Harmonogramowanie w czasie rzeczywistym przy utrzymaniu kryterium minimalizacji długości trwania całego harmonogramu w zasadzie wyklucza możliwość stosowania metod dokładnych do rozwiązywania tego problemu na rzecz metod przybliżonych, heurystycznych. Dzieje się tak z dwóch powodów. Po pierwsze metody dokładne z reguły wymagają więcej czasu. Po drugie przy użyciu dokładnej metody system musi czekać, aż wszystkie zamówienia zostaną dodane i dopiero wtedy można zacząć szukanie. Jest to w istocie zamiana problemu ze zmiennym strumieniem zamówień na problem z zamówieniem jednokrotnym.

Harmonogramowanie ze zmiennym strumieniem zamówień jest, zatem procesem ciągłego uaktualniania harmonogramu, jako reakcja na nowe zamówienia w taki sposób, aby tworzony harmonogram był optymalny oraz spełniał nałożone ograniczenia.

Kolejkę zamówień, do której dodawane są nowe zamówienia można zapisać, jako:

$$\mathcal{X} = (z(1), z(2), \dots, z(k), \dots, z(K)) \quad (1.16)$$

gdzie K to liczba produktów w kolejce, $z(k)$ to k -ty produkt w kolejce. $z(k) \in \mathcal{N}$, czyli kolejka określa dla każdego produktu powiązany z nim znany proces technologiczny. Gdy do kolejki zostaną dodane nowe produkty, kolejkę \mathcal{X} można podzielić na część gdzie znajdują się produkty wcześniej dodane oraz nowe:

$$\mathcal{X} = (z(1), \dots, z(K)) = (d(1), d(2), \dots, d(K_d)) \cup (\delta(1), \delta(2), \dots, \delta(K_\delta)) \quad (1.17)$$

gdzie $d(k) \in \mathcal{N}$ oznacza typ produktu, który do tej pory znajdował się w kolejce, $\delta(k) \in \mathcal{N}$ oznacza typ produktu z nowego zamówienia. K_d jest to liczba produktów w kolejce przed dodaniem nowego zamówienia. K_δ jest to liczba produktów w nowym zamówieniu. Jako konsekwencja tego podziału:

$$K = K_d + K_\delta \quad (1.18)$$

1.3. Charakterystyka linii galwanotechnicznych

W poprzednich rozdziałach opisywane były systemy produkcyjne, które zawierały cechy wspólne wielu różnych typów produkcji. Miały one charakter bardziej teoretyczny, nie zawierały specyfiki żadnego rzeczywistego typu systemu produkcyjnego. Linie galwanotechniczne to systemy produkcyjne, które stosuje się w produkcji elementów metalowych wymagających chromowania, niklowania, cynkowania lub innych procesów elektrolitycznych mających na celu zmianę właściwości produktu poprzez reakcje chemiczne. Część informacji na temat linii galwanotechnicznych została już przedstawiona w rozdziale 1.1.

Galwanotechnika zajmuje się ogółem zadań związanych z wykorzystaniem elektrolizy do nanoszenia powłok metalowych. Obejmuje zadania takie jak przygotowanie kąpeli elektrolitycznych o odpowiednich parametrach oraz przygotowanie odpowiedniego procesu technologicznego. Galwanotechnika dzieli się na galwanostegię (potocznie nazywaną galwanizacją) oraz galwanoplastykę [74]. Galwanostegia zajmuje się pokrywaniem powłoką metalową przedmiotów (zazwyczaj metalowych) w celu nadania im atrakcyjnego wyglądu,

zwiększenia odporności np. na korozję lub nadania im innych pożądaných cech. Galwanoplastyka – elektrolityczne osadzanie metali na powierzchni przedmiotów metalowych lub niemetalowych w celu otrzymania dokładnych metalowych kopii tych przedmiotów. W literaturze linii galwanotechnicznych najczęściej spotyka się z galwanostegią, np. [13], [64] lub [78].

W przypadku linii galwanotechnicznych spotyka się różne stanowiska robocze. Większość jest w istocie wannami wypełnionymi elektrolitem – nazywa się to kąpielą – lub inną substancją np. płynem płuczącym lub kwasem. Poza wannami spotyka się również stanowiska wykonujące procesy pomocnicze np. płukanie, wygładzanie czy suszenie. Procesy pomocnicze mają na celu przygotowanie produktu do zasadniczej części przetwarzania. Ze względu na potrzebę przygotowania produktu, proces technologiczny może być skomplikowany. Część stanowisk używa kwasu, aby usunąć wszelkie zabrudzenia, nieciągłości na powierzchni elementów. Inne stanowiska wykonują etap nazywany płukaniem odzyskowym, gdzie odzyskuje się cenny metal z elektrolitu, który nie zdążył się osadzić. Bardzo często wymagane jest, aby podczas wyciągania produktu z wanny był przewidziany czas okapywania, dzięki czemu w mniejszym stopniu zabrudza się inne kąpiele. Linia galwanotechniczna musi być wyposażona w odpowiednie wyciągi, które wylapują trujące opary będące wynikiem reakcji lub unoszące się z kąpeli. Stanowiska robocze ustawia się w linię, czyli jedno obok drugiego, wyrównane względem pewnej osi. W rozprawie nie będziemy się zajmować zagadnieniem projektowania linii produkcyjnych, choć jest to ważne i niełatwe zagadnienie, a ograniczenia wynikające z technologii mają wpływ na harmonogramowanie.

Produkt w nomenklaturze linii galwanotechnicznych nazywa się również zawieszka. Najczęściej zawieszka składa się z belki nie biorącej udziału w reakcjach oraz z zawieszonych na tej belce detali. Stanowiska robocze mają odpowiednie żłobienia, na których umieszcza się belkę w taki sposób, że znajduje się ona ponad wanną. Zawieszane poniżej detale są zanurzane w kąpeli. Belki krążą na linii a detale zawieszają się przed wprowadzeniem na linię i ściągają po przetworzeniu.

Z punktu widzenia harmonogramowania są dwie główne własności odróżniające linie galwanotechniczne od innych systemów produkcyjnych. Po pierwsze – przetwarzanie chemiczne. Przy przetwarzaniu chemicznym etapy procesu technologicznego mają określone okna czasowe ekspozycji. Produkt musi spędzić w kąpeli wystarczającą ilość czasu, aby osadziła się odpowiedniej grubości warstwa metalu. Potem przez jakiś czas nadal odkłada się metal (lub odłączany jest prąd), ale nie zmienia to charakterystyki produktu. Jeśli jednak produkt przekroczy określony czas maksymalny, zbyt długa ekspozycja powoduje niepożądane zmiany, np. dużą ziarnistość powłoki, rozwarstwienie powłok, etc. Długość faktyczna przetwarzania powinna

mieścić się między określonym czasem minimalnym a maksymalnym. Tego rodzaju systemy produkcyjne często nazywa się elastycznymi [73]. Drugą własność to transport dźwigowy. Ze względu na konieczność zanurzania produktów w wannach do transportu stosuje się poruszające się na podwieszanej ponad stanowiskami szynie dźwigi. Dźwigi mogą poruszać się wzdłuż osi wyznaczonej przez stanowiska robocze. Dźwig ma ramię, chwytak lub zaczep, który może opuścić, aby opuścić produkt do wanny lub podnieść produkt z wanny. Po podniesieniu produktu dźwig może przemieścić się ponad inne stanowisko i opuścić produkt. W ten sposób realizowane są etapy procesu technologicznego. Na linii musi się znajdować co najmniej jeden dźwig. Najczęściej dźwigów jest wiele. Dźwigi w trakcie pracy muszą poruszać się bezkolizyjnie. Dźwigi nie mogą bezpośrednio przekazywać sobie produktów. Mogą co najwyżej opuścić produkt do wanny i pozwolić podnieść ten produkt innemu dźwigowi. Dźwigi nie mogą się wymijać – przemieszczają się na tej samej szynie. Dźwig służy jedynie transportowi produktów w systemie produkcyjnym i nie bierze udziału w przetwarzaniu produktu, jak to ma miejsce w produkcji z ruchomymi realizatorami [6].

Oznaczmy zbiór dźwigów dostępny na linii jako:

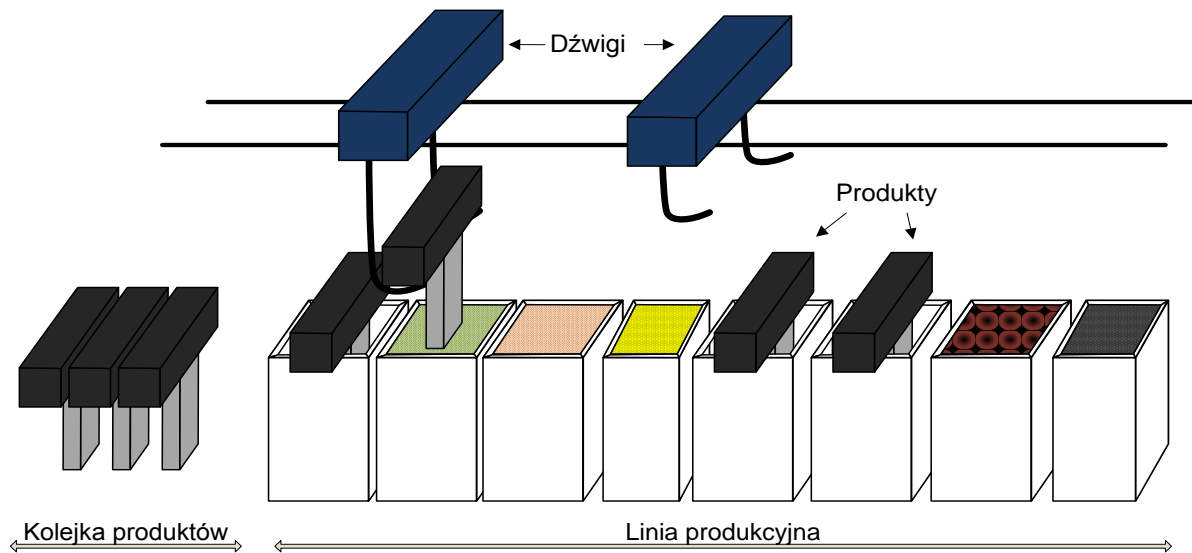
$$h \in \mathcal{H} = \{1, \dots, H\} \quad (1.19)$$

gdzie H to liczba dźwigów na linii. W rozprawie zakłada się, że dźwigi są homogeniczne – wszystkie mają takie same parametry, choć w niektórych pracach poświęconych liniom galwanotechnicznym, teoretycznie rozważa się możliwość heterogenicznych dźwigów [33]. Jako b będziemy oznaczać szerokość strefy kolizyjnej dźwigów w metrach. Środki dwóch dźwigów nie mogą się do siebie zbliżyć bliżej niż na odległość b . Natomiast, jako v będziemy oznaczać maksymalną prędkość dźwigów w metrach na sekundę.

Dźwigi przemieszczają się z niewielkimi prędkościami, a czas trwania operacji transportowych jest porównywalnego rzędu, co czas przetwarzania etapów procesu technologicznego. Dlatego też dźwigi są kluczowym zasobem na linii. Podobnie jak stanowisko robocze dźwig może być obciążony na tyle, że postęp przetwarzania produktów będzie hamowany przez niedostępność dźwigu, który mógłby wykonać operację transportową. Sprawę komplikuje również fakt, że dźwigi wpływają wzajemnie na swoją dostępność, ze względu na przymus unikania kolizji.

Dźwigi podnoszą i opuszczają zawieszki do stanowisk roboczych. Czas trwania tych operacji jest powiązana z operacją wykonywaną w danym stanowisku. Oznaczmy jako $\bar{t}_{n,i}$ czas podnoszenia podczas i -tego etapu n -tego typu produktu oraz $\underline{t}_{n,i}$ jako czas opuszczania podczas i -tego etapu n -tego typu produktu. W rzeczywistości czas podnoszenia może być odpowiednio dłuższy, jeżeli

wymagane jest okapywanie produktu z kąpielii zanim dźwig odjedzie z nad stanowiska. Czas opuszczania również musi być dobrany tak, aby nie dochodziło do chlustania kąpielą podczas opuszczania produktu. Na transport produktu ze stanowiska do stanowiska składa się czas potrzebny do podniesienia produktu, przejazdu dźwigu z produktem do stanowiska docelowego oraz opuszczenia produktu.



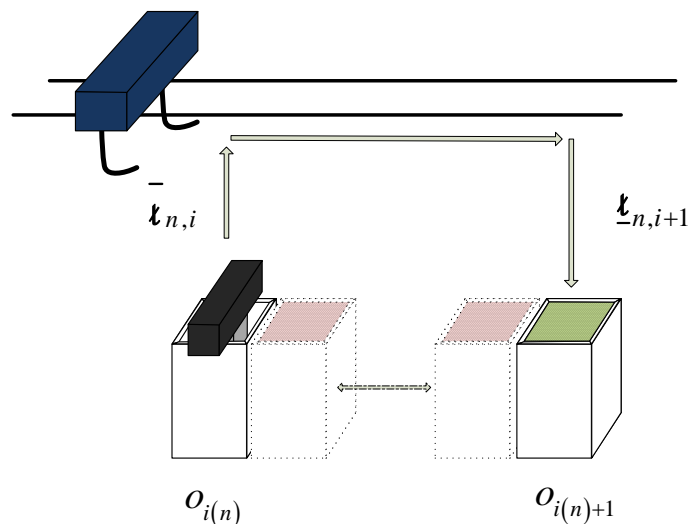
Rysunek 1.2 Widok linii produkcyjnej

Na rysunku 1.2 przedstawiono szkic najważniejszych elementów typowej galwanotechnicznej linii produkcyjnej. Na rysunku znajdują się dwa dźwigi. Jeden z dźwigów podnosi lub opuszcza produkt do stanowiska produkcyjnego. Rysunek przedstawia osiem stanowisk produkcyjnych, cztery produkty w trakcie przetwarzania oraz trzy oczekujące w kolejce produkcji. W rzeczywistych liniach wyznacza się najczęściej specjalne stanowisko załadowcze oraz stanowisko rozładowcze. Stanowiska te ułatwiają pracę dźwigom. Dzięki temu, dźwig nie musi być przystosowany do podnoszenia produktów bezpośrednio z magazynu. Obsługa linii, bądź automatyczny podajnik wprowadza surowy produkt, który ma być przetworzony, do stanowiska załadowczego. Ze stanowiska rozładowczego odbiera się gotowy produkt. Proces technologiczny przygotowuje się tak, aby rozpoczął się w stanowisku załadowczym a kończył na rozładowczym. Czasami stanowisko załadowcze i rozładowcze jest tym samym a proces technologiczny musi być ułożony tak, aby możliwy był powrót do początkowego stanowiska.

Z punktu widzenia dźwigów, proces technologiczny jest ciągiem zadań transportowych. Zadanie transportowe dla $i(n)$ -tego etapu procesu technologicznego n , jest to operacja wykonywana przez dźwig i składa się z następujących czynności:

1. Podniesienie w pewnej chwili produktu ze stanowiska lub jednego ze stanowisk grupy $o_{i(n)}$. Podniesienie produktu trwa $\bar{\ell}_{n,i}$.
2. Przejazd dźwigu z produktem do kolejnego stanowiska roboczego. Dźwig musi przejechać do grupy $o_{i(n)+1}$ spełniając ograniczenia wynikające z prędkości maksymalnej oraz omijając inne dźwigi, aby nie doprowadzić do kolizji.
3. Opuszczenie w pewnej chwili produktu do stanowiska lub jednego ze stanowisk grupy $o_{i(n)+1}$. Opuszczenie trwa $\underline{\ell}_{n,i+1}$.

Operacje podniesienia, przejazdu oraz opuszczenia prezentuje rysunek 1.3.



Rysunek 1.3 Operacja transportowa dźwigu

W przypadku linii galwanotechnicznych stosuje się otwarty proces technologiczny. Nie ma zatem ograniczeń, co do sekwencji odwiedzania stanowisk roboczych. Po ukończeniu przetwarzania w danym stanowisku, produkty mogą być przenoszone do sąsiedniego stanowiska, ale również do dowolnego stanowiska na linii. Produkty mogą odwiedzać więcej niż raz to samo stanowisko podczas produkcji oraz nie muszą odwiedzać wszystkich stanowisk. Stanowiska, które są odwiedzane więcej niż raz podczas danego procesu technologicznego, nazywa się również wielofunkcyjnymi. Mogą one w rzeczywistości realizować dwa różne procesy. W innych wypadkach realizują tę samą czynność, ale jest ona wykonana wielokrotnie podczas procesu technologicznego.

Na niektórych liniach galwanotechnicznych występują grupy wanien. Z grupą wanien mamy do czynienia wtedy, gdy kilka stanowisk realizujących ten sam określony proces jest ustawione obok

siebie. Z punktu widzenia procesu technologicznego, traktuje się je, jako pojedyncze stanowisko. Jeżeli w ramach procesu technologicznego jeden z etapów ma być wykonany w stanowisku, które należy do grupy, oznacza się wtedy, że ten etap realizuje grupa. Dany produkt może być przetworzony w dowolnym ze stanowisk należących do grupy. W pracy cyklicznej najczęściej stosuje się tutaj procedurę kolejki FIFO (ang. *First-In-First-Out*) o ograniczonej długości. Produkty wkłada się do grupy aż kolejka jest zapelniona. Wyjmuje się je poczynając od produktu, który najdłużej czeka. Dla uproszczenia zapisu będziemy nadal stosować oznaczenie, że \mathcal{L} jest zbiorem wszystkich stanowisk dostępnych w systemie produkcyjnym. Z tym zastrzeżeniem, że grupa jako całość będzie traktowana jako równoważne stanowisko należące do \mathcal{L} zamiast stanowisk, z których składa się grupa. Dla rozróżnienia położenia poszczególnych stanowisk w ramach grupy, niech:

$$P_{l,y} \in \mathbb{R}, l \in \mathcal{L}, y \in \{1, \dots, G_l\}, G_l \in \mathbb{N} \quad (1.20)$$

gdzie $P_{l,y}$ jest położeniem y -tego stanowiska roboczego w l -tej grupie wani. l -ta grupa wani składa się z G_l stanowisk. Położenie stanowiska roboczego jest mierzone w metrach od umownego początku linii produkcyjnej.

Podobnie jak w innych typach systemów produkcyjnych, występuje problem układania marszrut [62] elementów odpowiedzialnych za transport produktów. Praca na liniach galwanotechnicznych charakteryzuje się modelem ruchu dźwigów oraz modelem kolizji, ze względu na ułożenie stanowisk roboczych w jednej osi. W zależności od stosowanych rozwiązań technologicznych oraz uproszczeń, harmonogramowanie wykonuje się zgodnie z odpowiednim modelem kolizji i ruchu dźwigów. Znając prędkość maksymalną dźwigu, model ruchu dźwigu, położenia grup można wyznaczyć minimalny czas przejazdów między wszystkimi stanowiskami. W rozprawie będzie stosowany głównie uproszczony model ruchu. Uproszczony model ruchu zakłada, że dźwig porusza się zawsze ruchem jednostajnym z dowolną prędkością nie większą niż maksymalna. Jest to nierzeczywisty model ruchu, gdyż pomija przyśpieszenia i hamowania automatu, które występują w rzeczywistości. Poza tym pozycja automatów często ustalana jest przy pomocy silników krokowych, które przemieszczają dźwig tylko z określonymi prędkościami. Mimo to jest to wystarczająco dokładny model ruchu podczas układania harmonogramu. Uproszczony model ruchu jest najczęściej stosowanym modelem ruchu w literaturze np. w pracach [16], [30], [48], [53], [88]. Stosuje się go również w praktyce, gdyż ułatwia odczyt harmonogramu przez człowieka. Parametry dźwigu (szerokość strefy kolizyjnej oraz prędkość maksymalna) są tak dobrane, że potem przy przekształcaniu harmonogramu na sterownik

automatu pozostaje wystarczający zapas miejsca dla automatu poruszającego się w rzeczywistym środowisku.

W literaturze rozpatruje się prosty – strefowy (ang. *Disjoint Zones*) oraz zaawansowany – bazujący na analizie kolizji (ang. *Collision Based*) model kolizji dźwigów. Prosty model kolizji zakłada, że dźwigi kolidują jedynie, gdy znajdują się na tym samym stanowisku w tym samym czasie. Model zaawansowany uwzględnia położenie dźwigu w trakcie przemieszczania, pozycje stanowisk (również w ramach grupy) oraz szerokość strefy kolizyjnej b do określenia czy dźwigi w danej chwili kolidują. Przy prostym modelu znalezienie rozwiązania może być łatwiejsze, ale istnieje duże ryzyko, że w rzeczywistości dźwigi będą kolidować i podczas konwersji harmonogramu na program sterujący automatem nie będzie można go poprawić. Zaawansowany model kolizji jest bliższy rzeczywistości. Dźwig jest z reguły automatem o dużych gabarytach i na niektórych liniach może zaistnieć sytuacja, w której dwa dźwigi nie mogą znajdować się ponad dwoma sąsiednimi stanowiskami, bo doszłoby do kolizji. Tego typu sytuacji nie uwzględnia model prosty.

Niektóre linie galwanotechniczne, z powodów projektowych, układa się w kolumny – równoległe ułożone do siebie szeregi maszyn połączone transportem poprzecznym. Każda kolumna jest jak osobna linia galwanotechniczna. Poszczególne dźwigi pracują jedynie w ramach jednej kolumny, do której są przypisane i nie mogą przemieszczać się między kolumnami. Kolizje możliwe są jedynie między dźwigami na tej samej kolumnie. Transport poprzeczny ma najczęściej charakter taśmociągu, który przemieszcza produkt między kolumnami. Transport poprzeczny nie jest dźwigiem. Jest traktowany raczej jako etap procesu technologicznego, gdzie czasem minimalnym procesu jest czas trwania transportu poprzecznego. Różnica polega na tym, że po włożeniu produktu w stanowisko początkowe transportu poprzecznego, wyciąga się produkt ze stanowiska końcowego. Każda kolumna musi mieć przynajmniej jeden dźwig. Kolumny będziemy oznaczać jako:

$$c \in \mathcal{C} = \{1, \dots, C\} \quad (1.21)$$

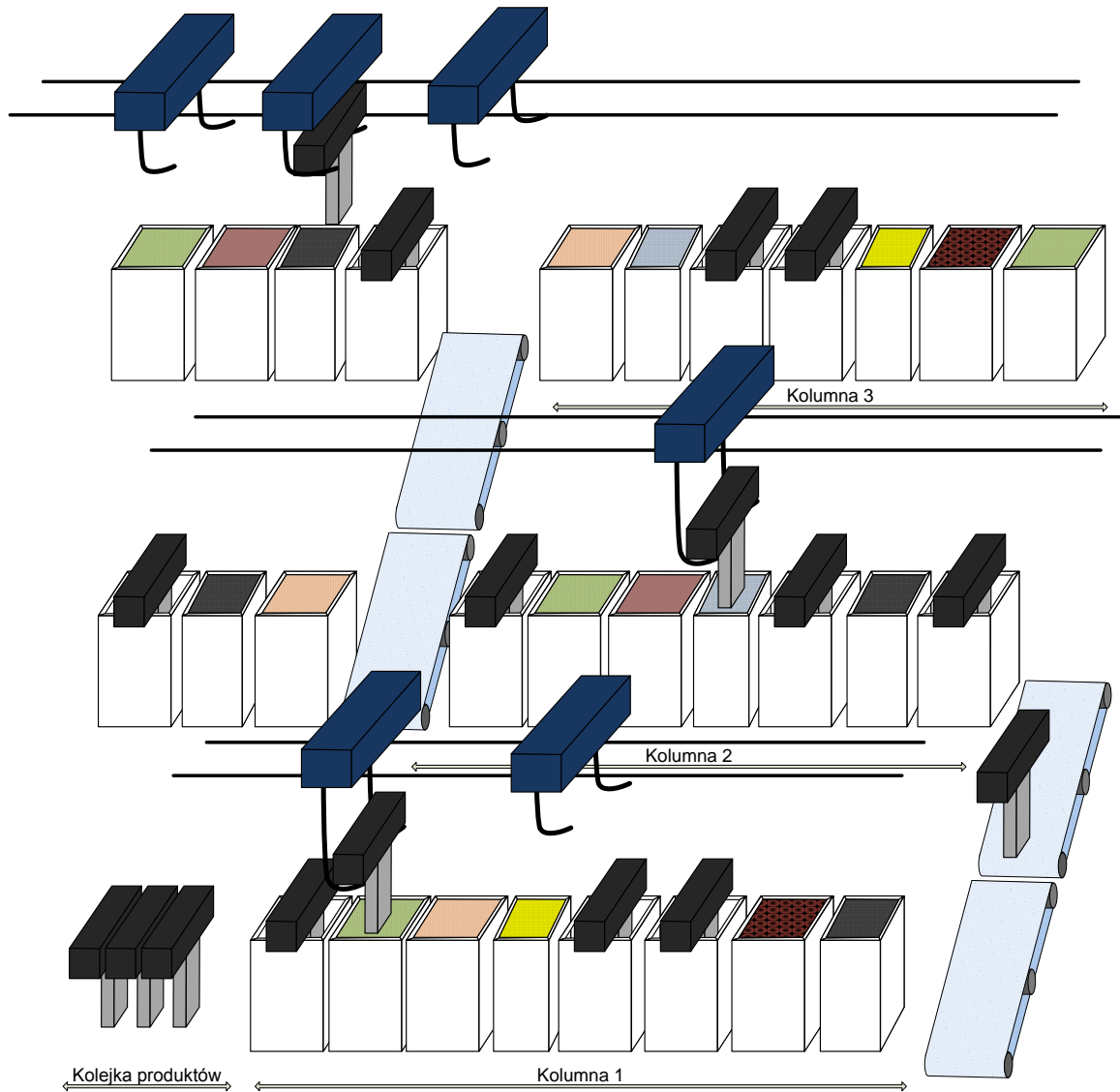
Gdzie \mathcal{C} jest zbiorem kolumn, C liczbą kolumn zdefiniowanych na linii. Można określić funkcję przynależności dźwigów do kolumn:

$$C^H : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{C} \quad (1.22)$$

Funkcja przynależności stanowisk roboczych do kolumn:

$$C^L : \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{C} \quad (1.23)$$

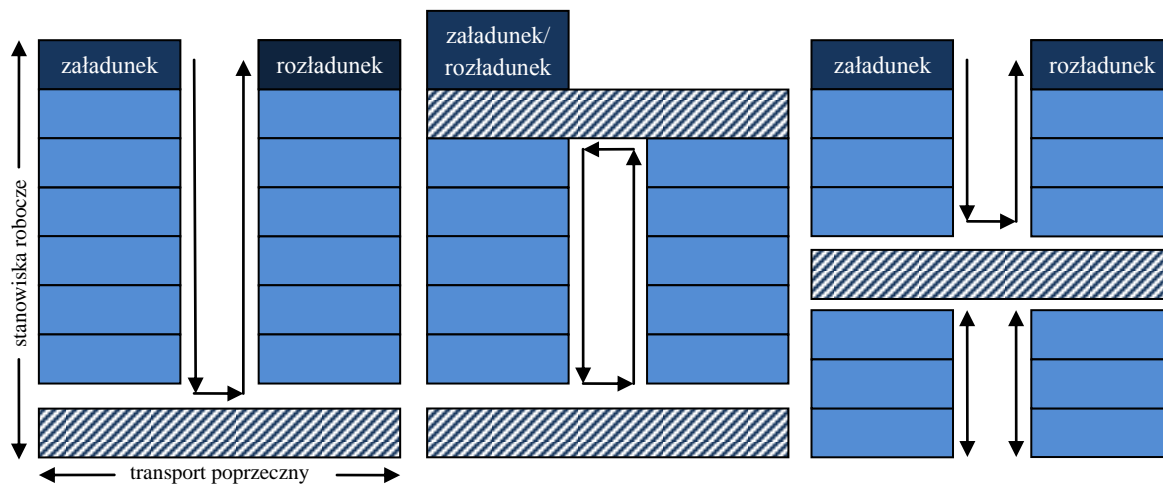
Dzięki kolumnom harmonogramowanie może być łatwiejsze ze względu na mniejszą szansę na kolizje dźwigów. Jednakże w literaturze praktycznie brak przykładów gdzie przy opisie problemu wprowadza się kolumny. W pracy [78] typowa linia produkcyjna jest przedstawiona na rysunku z wieloma kolumnami, choć autorzy w publikacji nie odnoszą się do tego faktu. Rozprawa doktorska [54] również omawia możliwość występowania wielu kolumn, jednak notacja problemu, proponowane algorytmy harmonogramowania oraz przykłady nie uwzględniają wielu kolumn.



Rysunek 1.4 Linia produkcyjna z wieloma kolumnami

Na rysunku 1.4 widać schemat linii z trzema kolumnami, na której pracuje w sumie sześć dźwigów, dwa transporty poprzeczne, dwadzieścia dziewięć stanowisk roboczych. Jedna z zawieszek jest w trakcie transportu z kolumny pierwszej do drugiej. Inna zawieszka na dźwigu drugim od lewej w kolumnie trzeciej jest w trakcie przenoszenia.

Organizacja linii w kolumny pozwala na różne układy procesów technologicznych. Przykładowo procesy typu „U”, „H” oraz „O” pokazane na rysunku 1.5.



Rysunek 1.5 Różne układy procesów technologicznych dla linii wielokolumnowych

Dźwigi pracujące w różnych kolumnach mogą się przemieszczać według osi wytyczonej przez stanowiska robocze. Najczęściej mamy do czynienia z sytuacją, że w trakcie produkcji dźwigi mogą poruszać się jedynie między brzegowymi stanowiskami danej kolumny. Przejazdy poza obszar zajęty przez stanowiska można wykorzystać do ułatwienia bezkolizyjnej pracy dźwigów. Jednak w rzeczywistych systemach produkcyjnych jest to traktowane jako marnotrawstwo miejsca i stwarza zagrożenie dla obsługi systemu produkcyjnego.

Harmonogramy budowane dla linii galwanotechnicznych są z reguły nastawione na decyzje dotyczące zachowania się dźwigów. Dzieje się tak, dlatego że stanowisko robocze zaczyna przetwarzanie w chwili, gdy dźwig ukończy opuszczanie zawieszki, a kończy przetwarzanie, gdy dźwig rozpocznie podnoszenie. Harmonogram pracy stanowisk roboczych jest zatem pochodną harmonogramu dźwigów. Dlatego, gdy mowa o harmonogramie pracy linii produkcyjnej mowa o harmonogramie dźwigów.

Charakterystyka pracy linii galwanotechnicznych jest również spotykana w innych rodzajach linii produkcyjnych. Przykładem może być produkcja płytek drukowanych PCB [17], [53] lub niektóre linie przetwórstwa spożywczego [64] oraz inne zastosowania [8]. Występują cechy wspólne, tzn. transport dźwigowy, interwały produkcyjne dla etapów procesu technologicznego, etc.

Opisane cechy charakterystyczne linii galwanotechnicznych powodują, że problem harmonogramowania produkcji w tych systemach produkcyjnych jest znacząco różny od innych problemów typu gniazdowego. Dlatego też nie sprawdzają się metody sprawdzone w pracy typu

job-shop a wymagane są metody dedykowane dla problemu. W literaturze ten problem opisuje się, jako problem harmonogramowania dźwigów (ang. *Hoist Scheduling Problem*). Przegląd różnych problemów harmonogramowania dźwigów oraz publikacji związanych z tym problemem można znaleźć w pracy [10] oraz [56].

Z tych powodów dalsza część pracy będzie dotyczyć harmonogramowania na liniach galwanotechnicznych, gdzie:

- pracuje wiele dźwigów, które transportują produkty,
- pracuje wiele stanowisk roboczych – wanien,
- stanowiska robocze mogą być ułożone w kolumny z transportami poprzecznymi,
- występują grupy wanien wykonujących ten sam etap procesu technologicznego,
- dźwigi muszą unikać kolizji,
- etapy procesu technologicznego mają określony czas minimalny oraz maksymalny przetwarzania.

1.4. Zadanie rozpoznawania

W harmonogramowaniu produkcji zostaną wykorzystane metody rozpoznawania. Rozpoznawanie jest problemem decyzyjnym. Polega na określaniu przynależności pewnych obiektów lub zjawisk do pewnych klas. Oznaczmy, jako \mathcal{D} zbiór obiektów lub zjawisk poddawanych procesowi rozpoznawania. Można założyć, że na zbiorze \mathcal{D} jest zdefiniowana relacja klasyfikacji $\mathcal{K} \subset \mathcal{D} \times \mathcal{D}$, będąca relacją równoważności. Relacja \mathcal{K} określa rozbitcie zbioru \mathcal{D} na zbiór klas równoważności $\{\mathcal{D}^i\}$ odpowiadających podziałowi elementów zbioru \mathcal{D} na podzbiory odpowiadające poszczególnym klasom. Jako I oznaczmy liczbę klas generowanych przez relację \mathcal{K} , oraz \mathcal{I} jako zbiór indeksów klas. Można wówczas zapisać własności relacji \mathcal{K} :

$$\mathcal{D} = \bigcup_{i \in \mathcal{I}} \mathcal{D}^i \quad (1.24)$$

$$\forall_{\mu, \nu \in \mathcal{I}} \left[\mathcal{D}^\mu \cap \mathcal{D}^\nu = \emptyset \right] \quad (1.25)$$

$$\forall_{d^\mu, d^\nu \in \mathcal{D}} \left[\langle d^\mu, d^\nu \rangle \in \mathcal{K} \Rightarrow \exists_{i \in \mathcal{I}} (d^\mu \in \mathcal{D}^i) \wedge (d^\nu \in \mathcal{D}^i) \right] \quad (1.26)$$

Relacja \mathcal{K} definiuje partycjonowanie zbioru \mathcal{D} na klasy, jednak pozwala na arbitralne przypisanie indeksu klasy ze zbioru \mathcal{S} . Na podstawie własności relacji \mathcal{K} można wprowadzić następujące odwzorowanie:

$$A: \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{S} \quad (1.27)$$

Odwzorowanie A zmniejsza liczbę stopni swobody rozpoznawania poprzez przypisanie \mathcal{D}^i konkretnej etykietce klasy identyfikowanej przez indeks ze zbiorów indeksów \mathcal{S} . To znaczy, że odwzorowanie A ma następującą własność:

$$\forall_{d \in \mathcal{D}} [A(d) = i \equiv d \in D^i] \quad (1.28)$$

Zadanie rozpoznawania polega na skonstruowaniu algorytmu, który pozwoli na realizację odwzorowania:

$$A: \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{S} \cup \{i_0\} \quad (1.29)$$

tak aby pewna miara jakości $Q^{A'}(A, A')$ nazywana *miarą jakości odwzorowania rozpoznawania* była minimalna. Jako A' oznaczamy algorytm rozpoznawania. Wprowadzony element $\{i_0\}$ jest odpowiednikiem braku możliwości jednoznacznego rozpoznania obiektu ze zbioru \mathcal{D} . W praktyce może być bardzo trudno stworzyć algorytm pozwalający w pełni poprawnie rozpoznawać obiekty, dlatego dopuszcza się brak wyboru klasy dla nierozpoznanych obiektów. Miara $Q^{A'}$ natomiast pozwala określić stopień w jakim algorytm rozpoznawania realizuje odwzorowanie A . Algorytm A' można opisać jako:

$$A': \mathcal{D} \rightarrow 2^{\mathcal{S}} \quad (1.30)$$

gdzie $2^{\mathcal{S}}$ jest zbiorem wszystkich podzbiorów zbioru \mathcal{S} . Brak decyzji może w tym przypadku oznaczać podanie przez algorytm A' , jako rozwiązanie zarówno zbioru pustego \emptyset jak i całego zbioru \mathcal{S} .

Odwzorowanie A realizuje się jako złożenie trzech odwzorowań:

$$A = B \cdot C \cdot D \quad (1.31)$$

Gdzie D nazywa się recepcją, odwzorowaniem obiektu lub zjawiska $d \in \mathcal{D}$ na przestrzeń cech \mathcal{X} , które go opisują:

$$D: \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{X} \quad (1.32)$$

Przestrzeń cech \mathcal{X} jest wektorem o X wymiarach:

$$\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_X) \in \mathcal{X} \quad (1.33)$$

W rozprawie przyjmujemy, że elementy x_x wektora przestrzeni cech \mathcal{X} mają dziedziny numeryczne, mogą zarówno należeć do zbioru liczb rzeczywistych \mathbb{R} jak i do dziedzin dyskretnych charakteryzujących określone cechy w sposób dyskretny.

Odwzorowanie C nazywa się ustalaniem miary podobieństwa:

$$C: \mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}^I \quad (1.34)$$

Dla danego obiektu $d \in \mathcal{D}$, dla każdej z klas $i \in \mathcal{S}$ ustala się liczbowo pewną miarę podobieństwa do tej klasy. Jest I klas, więc docelowym zbiorem w odwzorowaniu jest \mathbb{R}^I . Odwzorowanie C można generalnie zapisać, jako obliczenie wartości tzw. funkcji przynależności $C^i(\underline{x})$, $i=1,2,\dots,I$ na podstawie wektora wartości cech obiektu \underline{x} . Aby algorytm rozpoznawania działał w sposób poprawny, musi spełniać własność, aby dla konkretnego obiektu d^k należącego do pewnej klasy o numerze i^k oraz zmierzonych wartościach cech \underline{x}^k wartość funkcji przynależności $C^{i^k}(\underline{x}^k)$ była większa niż wartości funkcji przynależności innych klas $C^j(\underline{x}^k)$ dla $j \neq i^k$.

Odwzorowanie B oznacza podejmowanie decyzji o rozpoznaniu na podstawie miary podobieństwa:

$$B: \mathbb{R}^I \rightarrow 2^{\mathcal{S}} \quad (1.35)$$

Do podjęcia decyzji co do klasy rozpoznawanego obiektu lub zjawiska, najczęściej stosuje się zasadę *zwycięzca bierze wszystko* (ang. *winner takes all*), którą można opisać następująco:

$$\forall_{\underline{x} \in \mathcal{X}} \left[\left[F(C^1(\underline{x}), C^2(\underline{x}), \dots, C^I(\underline{x})) = i \right] \equiv \forall_{\substack{\mu \in \mathcal{S} \\ \mu \neq i}} \left[C^\mu(\underline{x}) < C^i(\underline{x}) \right] \right] \quad (1.36)$$

Opracowano wiele algorytmów rozpoznawania (wiele z nich opisano w pracach [36], [9], [79]). Różnią się one między innymi sposobem realizacji złożenia recepcji, miary podobieństwa i podejmowania decyzji. Algorytmy mają wspólną własność, pozwalającą zaliczyć je do metod maszynowego uczenia, korzystają z ciągu uczącego. Zazwyczaj relacja \mathcal{K} nie jest znana, podobnie jak informacje charakteryzujące odwzorowanie A . Dostępne informacje na temat nich organizuje się w ciągu uczącym:

$$U = \{ \langle \underline{x}^w, i^w \rangle, w=1, 2, \dots, W \} \quad (1.37)$$

czyli jest to zbiór par – wzorców – o liczności W gdzie pierwszym elementem pary jest wektor cech pewnego obiektu lub zjawiska:

$$\underline{x}^w = D(d^w) \wedge d^w \in \mathcal{D} \quad (1.38)$$

a drugim elementem pary jest indeks klasy, do której należy ten obiekt:

$$i^w = A(d^w) \wedge i^w \in \mathcal{I} \quad (1.39)$$

Ciąg uczący przygotowuje się na podstawie obiektów, których klasy znamy – przedstawicieli swoich klas. Dla niektórych problemów rozpoznawania ciąg uczący można wygenerować, dzięki czemu można zapewnić większą reprezentatywność obiektów. Ciąg uczący można podzielić na I podzbiorów $U^i, i=1, 2, \dots, I$ w taki sposób, że w i -tym podzbiorze znajdują się tylko wzorce należące tylko do i -tej klasy.

$$U = \bigcup_{i \in \mathcal{I}} U^i \quad (1.40)$$

$$U^i = \{ \langle \underline{x}^{i, w_i}, w_i=1, 2, \dots, W^i \} \quad (1.41)$$

$$\forall_{i \in \mathcal{I}} \left[\langle \underline{x}^{i, v} \in U^i \equiv \langle \underline{x}^\mu, i^\mu \rangle \in U \wedge \underline{x}^\mu = \underline{x}^{i, v} \wedge i^\mu = i \right] \quad (1.42)$$

gdzie W^i jest liczbą wzorców reprezentujących klasę i w ciągu uczącym.

Jest wiele zastosowań metod rozpoznawania. Z punktu widzenia problemów harmonogramowania metody rozpoznawania są wykorzystywane do klasyfikacji powtarzających się zamówień, sytuacji w systemie produkcyjnym, zmniejszenia złożoności i skracania procesu decyzyjnego związanego z harmonogramowaniem. Przykładem może być praca [2], [4] oraz [83], gdzie wykorzystuje się sieci neuronowe do klasyfikacji zadań produkcyjnych w celu ułożenia ich w sekwencji przetwarzania. Przegląd prac poświęconych wykorzystaniem metod rozpoznawania w problemach harmonogramowania można znaleźć w pracy [3], a ogólniej problemów planowania w pracy [71]. Oprócz metod rozpoznawania, w harmonogramowaniu stosuje się również inne metody maszynowego uczenia, np. systemy ekspertowe [24].

1.5. Aktualny stan badań

Systemy produkcyjne z transportem dźwigowym oraz przetwarzaniem chemicznym znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle galwanotechnicznym [66], produkcji płytek drukowanych [48] oraz innych gałęziach przemysłu [78]. Problem harmonogramowania galwanotechnicznych linii produkcyjnych doczekał się pokaźnej liczby publikacji naukowych. Problem ten znany jest w literaturze jako HSP – ang. *Hoist Scheduling Problem*. W niniejszym rozdziale, opisane będą wybrane wyniki prac zarówno dla problemów z cykliczną organizacją zamówień (określanych jako CHSP – ang. *Cyclic Hoist Scheduling Problem*) jak i ze zmiennym strumieniem zamówień (określanych jako DHSP – ang. *Dynamic Hoist Scheduling Problem*). Oprócz krótkiego opisu poszczególnych publikacji oraz proponowanych w nich sposobów rozwiązywania problemu harmonogramowania dźwigów, zaznaczone zostaną problemy testowe opisywane przez autorów. Szczegółowe dane odnośnie procesów technologicznych, parametrów linii znajdują się w rozdziale 3.5 „Parametry problemów testowych”.

1.5.1. Organizacja cykliczna

Problem po raz pierwszy został opisany prawie 35 lat temu w pracy [66]. Początkowo opisywany problem był mocno uproszczony – harmonogramowano jeden dźwig, prostą kolejność procesową, cykliczną organizację produkcji, brak kolumn, grup wanień itp. Prosta kolejność procesowa występuje wtedy, gdy rozwiązanie zakłada, że kolejne etapy procesu technologicznego są zawsze przetwarzane w sąsiednich stanowiskach, tzn. kolejność procesowa jest identyczna z kolejnością ustawienia stanowisk roboczych. Do rozwiązania zastosowano programowanie całkowitoliczbowe do ustalenia długości cyklu, a następnie algorytm min-max wraz z heurystykami do znalezienia instancji harmonogramu o tej długości. W pracy [66] zdefiniowany jest problem testowy oznaczony, jako PhU–1 (patrz rozdział 3.5.1).

Nowsze prace rozwijają problem i proponują rozwiązanie dla mniej ograniczonego zakresu. Jedną z pierwszych prac dotyczących harmonogramowania więcej niż jednego dźwigu jest praca [47]. Opisuje ona problem cykliczny dla dokładnie dwóch dźwigów. Rozwiązanie jednak oparte jest w dużej mierze na założeniu, że kolejność technologiczna zgodna jest z sekwencją stanowisk roboczych. Analizowane jest $L-1$ ciągłych (zawierających stanowiska robocze jedno po drugim) stref dźwigów pod kątem estymowanego czasu cyklu tak, aby dwa dźwigi miały podobny czas cyklu. Następnie dla zgodnego podziału stref analizowane są permutacje odwiedzania stanowisk przez dźwigi. Proponowane rozwiązanie generowania cyklogramów ma złożoność $O(L \cdot (L-1)!)$. Autorzy nie opisują w szczególności sposobu unikania kolizji.

Z czasem, oprócz poszerzania zakresu problemu zaczęto również publikować prace gdzie stosowano metody programowania logicznego z ograniczeniami (ang. *Constraint Logic Programming*) – [7]. Praca dotyczy uproszczonego problemu z jednym dźwigiem. Rozwiązanie polega na stworzeniu modelu problemu w języku Prolog, czyli określenia parametrów, zmiennych decyzyjnych, ich dziedzin oraz co najważniejsze, ograniczeń nałożonych na poprawne rozwiązanie. Autorzy wprowadzają kilka ograniczeń wynikających z charakteru problemu harmonogramowania dźwigów. Program znajduje rozwiązanie na zasadzie propagacji ograniczeń na dziedzinie zmiennych decyzyjnych. Gdy ograniczeń nie da się już dalej propagować stosuje się dwie procedury: procedurę tzw. nawrotów (ang. *Backtracking*) oraz procedurę enumeracji. W procedurze nawrotów, dla jednej ze zmiennych decyzyjnych wybierana jest wartość należąca do dziedziny, a następnie ograniczenia propagowane są dalej. Jeśli nie znajdzie się rozwiązania wraca się i wybiera inną wartość zmiennej. Procedura enumeracji sprawdza wszystkie kombinacje wartości zmiennych. Autorzy wprowadzają dodatkową heurystykę – dodatkowe ograniczenie w modelu, które ma na celu przyspieszyć znalezienie rozwiązania. Polega ona na założeniu, że dźwig powinien rozpocząć przemieszczanie jedynie w czasie, gdy któryś z etapów osiągnął czas minimalny a nie przekroczył maksymalnego. Podobny model zaproponowano w pracy [80], gdzie dodatkowo rozważa się możliwość doboru kolejności stanowisk roboczych.

Praca [81] przedstawia modyfikację problemu dla jednego dźwigu – cyklogramy wyższych stopni. Czyli takie harmonogramy, gdzie kilka produktów tego samego typu jest wprowadzanych do systemu produkcyjnego w ramach jednego cyklu. Niestety poczyniono założenie, które wyklucza praktyczne wykorzystanie tej metody, opartej na zachłannej heurystyce. Czas przemieszczania się dźwigu bez zawieszki jest zawsze równy zero. Inną pracą rozważającą cyklogramy wyższych rzędów jest [23] gdzie stosowane są sieci Petriego do ustalania sekwencji odwiedzin stanowisk roboczych przez pojedynczy dźwig. Prace [27] oraz [27] poświęcone są problemom eliminacji kolizji dźwigów w warunkach cyklicznej organizacji produkcji, gdzie również wykorzystywane są sieci Petriego.

Do rozwiązywania problemu harmonogramowania dźwigów, w produkcji płytek drukowanych (PCB – ang. *Printed Circuit Boards*), próbowano również zastosować reprezentację grafową i algorytmy związane ze znajdowaniem ścieżek w grafach, które spełniają określone ograniczenia. Opisują to prace [27] oraz [27]. [28] jest również jedną z pierwszych prac, która proponuje rozwiązanie dla wielu typów produktów. Przy założeniu, że całe zamówienie jest z góry znane (zamówienie jednokrotne). Jedną z pierwszych prac, która uwzględnia w opisie problemu grupy wieloliczne jest praca [19], również odnosząca się do produkcji płytek drukowanych. Autorzy jednak nie przedstawiają badań związanych z grupami stanowisk.

Praca [31] proponuje algorytm o złożoności $O(L^3)$ (czynione jest założenie, że liczba etapów procesu technologicznego jest równa liczbie grup stanowisk roboczych), który znajdzie najkrótszy cyklogram dla danej permutacji odwiedzin stanowisk roboczych przez dźwig. Nadal problemem jest to, że należałoby sprawdzić $L!$ możliwych permutacji. Można jednak wykorzystać zaproponowaną metodę, aby sprawdzić czy rozwiązania wygenerowane przez inne metody są chociaż lokalnie optymalne. Niestety metoda odnosi się do najprostszej wersji problemu z jednym dźwigiem, bez grup wanien, itp.

Wcześniej opisane metody programowania całkowitoliczbowego oraz CLP zostały połączone w pracy [19]. Praca rozważa problem dwóch dźwigów. Autorzy utrzymują, że wygenerowane przez nich wyniki dla testu PhU-1 dla dwóch dźwigów są optymalne, jednak w literaturze można znaleźć rozwiązania lepsze, więc albo rozwiązania nie są globalnie optymalne albo założenia testu są inne. Harmonogramowanie dwóch dźwigów nie uwzględnia strefy kolizyjnej dźwigów. Problem kolizji uproszczono do tego, że dźwigi nie mogą się wymijać. To oznacza, że dźwigi są punktami w przestrzeni, zamiast fizycznych obiektów w przestrzeni. Proponowane rozwiązanie należy do rozwiązań problemów teoretycznych ze względu na nierealistyczne uproszczenie kolizji. Autorzy [63] nie ustrzegli się błędu w zaproponowanym modelu, wykrytym w pracy [50]. Model pozwala na odłożenie produktu do stanowiska, na którym aktualnie znajduje się inny produkt. Praca [70] również używa rozwiązania hybrydy programowania całkowitoliczbowego i CLP. Praca ta proponuje rozwiązanie dla problemu przy cyklicznych zamówieniach niemal bez uproszczeń w stosunku do opisanych w rozdziale 1.3 możliwości linii galwanotechnicznych. Obsługiwane są linie z wieloma dźwigami, grupami stanowisk roboczych, stanowiskami wielofunkcyjnymi, dopuszczalna jest dowolna sekwencja procesu technologicznego. Brakuje jedynie kolumn oraz zaawansowanego modelu kolizji. Niestety autorzy nie ustrzegli się błędów podczas badań, lub również ich model ograniczeń problemu jest niepoprawny. Wyniki podane dla problemu testowego DEGEM-1 są bez wątpienia błędne. Jednym z etapów przykładu DEGEM-1 jest trawienie kwasem fosforowym (opisy różnorodnych etapów procesów technologicznych można znaleźć w pracy [70]) trwające minimum 300 sekund. Szereg rezultatów w pracy [69] podaje, że długość cyklu to 250 sekund. Jest to niemożliwe w rozwiązaniu spełniającym ograniczenia, nawet jeśli rozważane są cyklogramy r -produktowe. Nie ma możliwości wprowadzania produktów do systemu produkcyjnego szybciej niż raz na czas minimalny dowolnego etapu. Innym problemem związanym z omawianą pracą jest stosowanie prostego modelu kolizji przy braku założenia, że sekwencja etapów procesu technologicznego jest identyczna z sekwencją stanowisk roboczych. Może zdarzyć się tak, że dźwig musi przenieść produkt dalej niż do sąsiedniego stanowiska co powoduje przejazd dźwigu w głąb strefy innych

dźwigów co może spowodować kolizję. Możliwe zatem, że autorzy niejawnie zakładają prostą kolejność procesową. Kolejnym ulepszeniem modelu z pracy [69] o grupy wieloliczne, jest model ograniczeń zdefiniowany w pracy [74].

Praca [69] wprowadza r -produktowe cyklogramy dla problemu z cyklicznymi zamówieniami. r -produktowy cyklogram wprowadza zbiór r produktów co pewien interwał. Podczas tego interwału kończy również r -elementowy zbiór (niekoniecznie tych samych produktów). Autorzy utrzymują, że dla większości testowanych przez nich przypadków r -produktowy cyklogram ma lepszą wydajność niż 1-produktowy. Proponowana heurystyka bazuje na analizie wykluczonych interwałów generowanych przez operacje dźwigu. Istotną różnicą stosowanej heurystyki, w stosunku do innych rozwiązań jest to, że nie analizuje ona możliwych permutacji operacji dźwigu, ale analizuje różne interwały przetwarzania w stanowiskach roboczych. To znaczy sprawdza w osi czasu różne momenty i czas trwania etapów procesu technologicznego, w różnych wzajemnych układach. Dzięki temu algorytm ma złożoność wielomianową dla zadanej liczby produktów w cyklogramie – $O(rL^3(TB_n)^r)$ gdzie r – liczba produktów w cyklu, TB_n – minimalny czas trwania całego n -tego procesu technologicznego:

$$TB_n = \sum_{i \in \mathcal{C}^n} (m_{n,i}) + \sum_{0 \leq i \leq I(n)-1} \left(\left\lceil \frac{P_{o(i),0} - P_{o(i+1),0}}{v} \right\rceil + \bar{\ell}_{n,i} \right) + \sum_{1 \leq i \leq I(n)} (\ell_{n,i}) \quad (1.43)$$

Trudno porównać złożoność tej metody z innymi. Jest mniej skalowalna z punktu widzenia samego procesu technologicznego. Wystarczy wydłużyć czas trwania dowolnego procesu technologicznego a czas trwania rozwiązywania potrwa proporcjonalnie dłużej. Praca [66] proponuje wykorzystanie algorytmu podziału i ograniczeń dla przypadku gdzie nie ma interwałów przetwarzania, lecz produkt musi być wyciągnięty z wanny dokładnie po upływie określonego czasu. Rozwiązanie również ma złożoność wielomianową zależną od czasu trwania procesów. Jednak ze względu na brak elastyczności, algorytm trwa krócej, choć znalezione rozwiązania mają mniejszą wydajność.

Do rozwiązywania problemu harmonogramowania dźwigów stosuje się również metody sztucznej inteligencji np. w pracach [87], [37], [1], [57]. Praca [61] prezentuje użycie algorytmu genetycznego, dla problemu z jednym dźwigiem. Każdy osobnik reprezentuje pewien cyklogram. Poprzez zastosowanie odpowiednich operatorów, generowane są kolejne cyklogramy. Dodatkowo stosowana jest heurystyczna procedura do "naprawiania" cyklogramów, które nie spełniają ograniczeń. Jednak autorzy nie ujawniają sposobu postępowania tej procedury. W pracy zdefiniowany jest przypadek testowy Matile-1 (patrz rozdział 3.5.2).

Jedną z niewielu prac poświęconych problemowi harmonogramowania dźwigów w warunkach niedeterministycznych są prace [58] oraz [33]. Zakłada się, że czas trwania przejazdu dźwigu nie jest stałą wartością, a zmienną losową. Początkowo buduje się taki harmonogram, który będzie minimalizował kryterium przy dodatkowym założeniu, że ryzyko popsucia produktu przez zdarzenie losowe będzie utrzymane na określonym poziomie. Natomiast w trakcie produkcji system decyzyjny dokonuje korekt w sytuacji gdzie mimo podjętych środków może dojść do popsucia produktu.

Praca [61] proponuje rozszerzenie modelu programowania całkowitoliczbowego z pracy [29] o grupy stanowisk roboczych i stanowiska wielofunkcyjne, dla jednego dźwigu. W pracy zdefiniowany jest przykład testowy Jiyin-1 (patrz rozdział 3.5.3).

Jedną z modyfikacji problemów, którą wprowadzają autorzy w celu redukcji złożoności obliczeniowej jest eliminacja elastyczności procesu technologicznego, podobnie jak w omówionej już pracy [51]. Zakłada się, że czas trwania etapu procesu technologicznego musi trwać dokładną liczbę sekund. Dzięki temu redukuje się dziedziny zmiennych decyzyjnych. Liczba dostępnych kombinacji spełniających ograniczenia, które trzeba przeanalizować jest wtedy wielomianowo zależna od wielkości problemu. Algorytm dla jednego dźwigu, grup wielolicznych, stanowisk wielofunkcyjnych ma złożoność $O(I(n)^6 \cdot L)$. Tego typu zmiana w problemie z jednej strony pozwala generowanie rozwiązań przy małej złożoności obliczeniowej kosztem wydajności produkcji. Autorzy rozwijają przedstawiony model w pracy [35] o prosty model kolizji wielu dźwigów, utrzymując złożoność algorytmu. Autorzy rozwijają swój pomysł również dla wielu dźwigów przy zaawansowanym modelu kolizji (przy $b=0$) oraz dla cykli r -produktowych w pracy [66]. Podobny model ograniczeń oraz algorytm rozwiązania zastosowano również do przypadku z jednym dźwigiem w pracy [1].

Jedną z niewielu prac, które podejmują się problemu zaawansowanego modelu kolizji jest praca [15]. Praca definiuje nowe ograniczenia, które mają wykluczyć rozwiązania z powodującymi kolizje przejazdami. Autorzy stosują strategię min-max oraz programowanie liniowe z relaksacją ograniczeń do estymacji dolnego progu czasu cyklu. Niestety praca ma charakter teoretyczny ze względu na założenie, że szerokość strefy kolizyjnej dźwigu $b=0$, czyli gwarantuje jedynie tyle, że dźwigi nie zderzą się swoimi środkami, i nie przetną swoich tras. Podobna metoda eliminacji kolizji została zastosowana w pracy [18], dla przypadku bez elastyczności procesu technologicznego.

W pracy [82] zastosowano prosty model kolizji dźwigów. Jednak autorzy biorą pod uwagę fakt, że dźwig musi odpowiednio wcześniej opuścić stanowisko aby znaleźć się co najmniej na

sąsiednim stanowisku, gdy inny dźwig ma wykonać operację na zajmowanym przez niego stanowisku. Praca definiuje przypadek testowy Che-1 (patrz rozdział 3.5.4).

Rozwiązaniem problemu kolizji może być również założenie, że dźwigi pracują na osobnych szynach (ang. *multiple tracks*) w ramach tej samej kolumny, ale mogą się wymijać i nie kolidują. Nie mogą jedynie jednocześnie wkładać i wyjmować produktu do stanowiska w tym samym momencie. Jest to relaksacja problemu kolizji dźwigu, która dla rozwiązań teoretycznych pozwala na uzyskanie lepszych wyników ze względu na lepszą dostępność dźwigów przy braku ograniczeń kolizyjnych. Rozwiązanie tego typu problemu harmonogramowania dźwigów proponuje praca [48] oraz [49].

Praca magisterska [38] opisuje heurystyczną metodę harmonogramowania wielu dźwigów, z zaawansowanym modelem kolizji, grupami wanien, stanowiskami wielofunkcyjnymi oraz kolumnami. Sposób znajdowania cyklogramów, opisany w pracy [38] dzieli się na kilka etapów. Na początku ustalane są zbiory operacji, wykonywanych przez poszczególne dźwigi. Zbiory te ustala się na podstawie heurystycznej oceny możliwych przyporządkowań operacji dźwigom. Każde przyporządkowanie wyznacza dla każdego dźwigu strefę stanowisk, które jest przez niego obsługiwane. Ocena obliczana jest na podstawie liczby i głębokości penetracji stref innych dźwigów oraz równomierności otrzymanych zadań. Chodzi o to, aby dźwigi nie przeszkadzały sobie w pracy – dzięki czemu łatwiej znaleźć rozwiązanie bezkolizyjne oraz o to, aby miały podobną liczbę obsługiwanych etapów. Następnie wedle oceny analizowane są kolejne przypisania etapów dźwigom od najlepszej do najgorszej oceny. Kolejnym etapem jest sprawdzenie dla każdego dźwigu pewnej liczby różnych sekwencji operacji podniesienia produktu z przypisanych stref. Dodawane są tylko takie sekwencje, dla których możliwe jest znalezienie cyklu spełniającego ograniczenia. Jednocześnie minimalizowana jest długość tych cykli poprzez wstawianie opóźnień dźwigu. Gdy dla każdego dźwigu znaleziony jest zbiór częściowo poprawnych cykli, przechodzi się do etapu dostosowania cykli różnych dźwigów. Dla wybranej sekwencji dźwigu szuka się sekwencji dźwigu sąsiedniego, którą da się dostosować pod względem długości cyklu. Ostatnim etapem jest eliminacja kolizji. Kolizje eliminuje się poprzez sukcesywną rotację cykli kolejnych dźwigów. Rotacja jest operacją przesuwania o pewną ilość czasu wszystkich operacji w cyklu danego dźwigu. Operacje, które w wyniku rotacji przesunięte zostaną poza długość cyklu przenoszone są na początek cyklu. Dla każdego przesunięcia wykonuje się algorytm generowania marszruty dźwigów. Marszruta generowana jest dla wszystkich części harmonogramu, gdzie dźwig nie wykonuje podnoszenia lub opuszczania produktu. Poprzez heurystyczne zasady zjazdów, śledzenia sąsiadujących dźwigów próbuje się

znaleźć bezkolizyjną marszrutę dźwigu. W przypadku niepowodzenia któregoś z etapów następuje nawrót i kolejne próby dla innych cykli oraz przypisać operacji dźwigom.

Inną pracą, która z wyjątkiem wielu kolumn proponuje rozwiązanie problemu cyklicznego harmonogramowania z zaawansowanym modelem kolizji dźwigów, grupami stanowisk oraz stanowiskami wielofunkcyjnymi jest praca doktorska [55]. Jest ona w języku francuskim, jednak opisane w niej problemy testowe są cytowane w wielu innych pracach. Autorka rozprawy [55] jako perspektywiczne rozwinięcie tematu, traktuje między innymi poszerzenie zaproponowanego modelu problemu o wiele kolumn. Praca definiuje przypadki testowe Copper oraz BlackOxide (patrz rozdziały 3.5.7 oraz 3.5.9).

Zainteresowaniem również cieszy się aspekt drugorzędnych kryteriów optymalizacji. O ile kryterium wydajności produkcji jest poruszane niemal we wszystkich pracach dotyczących problemu harmonogramowania dźwigów, to w pracy [38] proponuje się podejście wielostopniowe. Ma to sens głównie w przypadku cyklicznej organizacji produkcji. W pierwszym etapie stosuje się kryterium maksymalnej wydajności - system produkcyjny ma wyprodukować najwięcej produktów na jednostkę czasu. W drugim etapie, dla założonego czasu cyklu zadaniem jest manipulacja innymi zmiennymi decyzyjnymi tak aby czasy przetwarzania były jak najdłuższe a nadal spełniały ograniczenia. Autorzy utrzymują, że dzięki takiemu kryterium dla etapów płukania doprowadza to do mniejszego zużycia wody bieżącej oraz mniejszego zużycia kąpieli ze względu na mniejszą ilość wypływu substancji. Nie jest to podejście nowe, w pracy [55] wykonuje się ponowne przetwarzanie rozwiązań pod kątem minimalizacji sumy czasów przejazdów dźwigów, co ma redukować zużycie prądu elektrycznego i zmniejszyć amortyzację dźwigu.

Praca [86] jako jedna z niewielu proponuje rozwiązanie dla zaawansowanego modelu kolizji, ze strefą kolizyjną. Proponowany algorytm, początkowo wyznacza interwał możliwych czasów cyklu. Po nałożeniu na ten interwał ograniczeń pozostaje zbiór m całkowitoliczbowych długości cyklu do analizy. Następnie dla każdej z długości cyklu, wyszukiwane jest rozwiązanie spełniające ograniczenia, o ile takie istnieje. Procedura ma złożoność $O(m \cdot L^6)$. Kolizje eliminowane są poprzez nałożone ograniczenia. Autorzy analizują wszystkie kombinacje możliwych sytuacji, w których dźwigi mogą kolidować i dla każdej z tych sytuacji wprowadzają ograniczenia utrzymujące odległość dźwigów, co najmniej wynoszącą co najmniej tyle, co szerokość strefy kolizyjnej b .

Innym rozwiązaniem problemu kolizji dźwigów jest propozycja opisana w pracy [43], gdzie eliminuje się kolizje jedynie podczas podnoszenia i opuszczania oraz transportu produktu ze

stanowiska do następnego stanowiska. W pozostałym czasie zakłada się, że dźwigi nie będą kolidować. Są to rozważania teoretyczne, ponieważ dźwigi czasami muszą rozpocząć przemieszczanie się zanim nastąpi kolizja, więc sprawdzanie kolizji w wybranych okresach czasu może się nie sprawdzić.

Zamówienia cykliczne są również punktem zainteresowań prac związanych z bardziej ogólnymi problemami *job-shop*. W pracy [60] autorzy tworzą grafową reprezentację ograniczeń związanych z problemami cyklicznymi oraz algorytm, znajdujący harmonogram bazując na tym grafie. Nie jest rozpatrywany problem transportu oraz innych charakterystycznych cech linii galwanotechnicznych, lecz podobnie jak w problemie harmonogramowania dźwigów organizacja zamówień cyklicznych pozwala na tworzenie harmonogramów dla dowolnej liczby produktów. Podobny problem cyklicznego problemu *job-shop* jest rozwiązywany w pracy [57], lecz za pomocą metod programowania genetycznego. Podobne problemy opisywane są w pracach [30], [12], [34] oraz [20].

Autorzy pracy [22] analizują w jakim stopniu elastyczność poszczególnych etapów procesu technologicznego, ma wpływ na ostateczną wydajność pracy systemu produkcyjnego. Praca [60] oraz [84] opisują podobny problem, gdzie występuje harmonogramowanie w sposób cykliczny ramienia chwytneho.

Podsumowując, prace odnoszące się do problemu harmonogramowania dźwigów z zamówieniami cyklicznymi są liczne, najczęściej rozwiązują problem uproszczony. Nowsze prace proponują rozwiązania dla coraz szerszego zakresu cech galwanotechnicznych linii produkcyjnych. Większość rozwiązań bazuje na zapisaniu zmiennych decyzyjnych problemu oraz jak największej liczby ograniczeń. Niektóre analizowane zmienne decyzyjne oraz wprowadzane ograniczenia wynikają z opisywanej charakterystyki linii produkcyjnych i nie wykluczają znalezienia rozwiązania globalnie optymalnego. Dodatkowe ograniczenia, lub uproszczenia zmiennych decyzyjnych mają charakter heurystyk. Mają one ułatwić znalezienie rozwiązania, kosztem ewentualnego wykluczenia rozwiązania optymalnego. Harmonogram znajduje się najczęściej dwustopniowo. Najpierw poprzez algorytm podziału i ograniczeń ustala się zbiór obiecujących długości cyklogramu, na podstawie ograniczeń. Następnie stosuje się metody programowania całkowitoliczbowego do rozwiązania układu nierówności utworzonego z ograniczeń nałożonych na rozwiązanie. Stosuje się również metody CLP oraz sztucznej inteligencji.

Niewiele prac uwzględnia zaawansowany model kolizji dla wielu dźwigów. Zaawansowany model kolizji wymaga rozszerzenia problemu o liczne zmienne decyzyjne związane z marszrutami dźwigów. Budowa modelu ograniczeń jest wtedy bardzo trudna, przez co niemal

wszystkie prace, które rozważają zaawansowany model kolizji proponują rozwiązania heurystyczne specjalizowane do harmonogramowania dźwigów. Stanowiska robocze połączone poprzecznym transportem w kolumny, analizowane są jedynie w pracach, [25], [76], [77] oraz [5], która jako jedyna proponuje algorytm uwzględniający kolumny podczas harmonogramowania.

1.5.2. Organizacja ze zmiennym strumieniem zamówień

Stosunkowo niewiele prac zostało poświęconych problemowi harmonogramowania dźwigów ze zmiennym strumieniem zamówień. Opisane zostaną tutaj również prace, które nie rozważają harmonogramowania w czasie rzeczywistym – zakładają, że w trakcie produkcji można zatrzymać czas, obliczyć harmonogram i dalej produkować według nowego harmonogramu.

Jedną z pierwszych prac poświęconych harmonogramowaniu ze zmiennym strumieniem zamówień jest [54]. Autorzy rozważają problem gdzie należy znaleźć aktualizację harmonogramu w sytuacji, gdy nowe produkty zostały dodane do kolejki zadań, a inne są w trakcie przetwarzania. Aspekt czasu rzeczywistego nie jest poruszany. Rozważane jest wiele typów produktów, jeden dźwig, brak wielu kolumn, stanowisk wielofunkcyjnych oraz grup wani. Rozwiązanie opiera się o programowanie liniowe dla nierówności będących ograniczeniami poprawnego rozwiązania. Poprawne rozwiązanie przede wszystkim musi kontynuować pracę produktów już będących w przetwarzaniu. Poza tym spełnia ograniczenia chemiczne etapów procesu technologicznego, a dźwigi i stanowiska nie mogą obsługiwać więcej niż jednego produktu na raz. Ograniczenia dotyczące dźwigów oraz stanowisk mają charakter alternatywy (ang. *disjunction*), pozostałe są równościami i nierównościami liniowymi z całkowitoliczbowymi dziedzinami niektórych zmiennych. Dla ograniczeń liniowych przeszukuje się przestrzeń rozwiązań przez algorytm podziału i ograniczeń. Następnie buduje się zbiór konfliktów wynikający z ograniczeń o charakterze alternatywy. Dla każdego z konfliktów procedura bada dostępne alternatywy. Gdy nie udaje się znaleźć poprawnego rozwiązania następuje nawrót do poprzedniego podziału. W pracy autorzy skupiają się nad problemem wyboru kryterium lokalnego, które w najlepszy sposób będzie optymalizować harmonogram dla całej kolejki produkcji. Poddane analizie są trzy kryteria:

1. minimalizacja długości całkowitej harmonogramu po każdej aktualizacji
2. minimalizacja sumy czasów ukończenia poszczególnych produktów w kolejce
3. minimalizacja sumy kryteriów 1 i 2.

Okazuje się, że kryterium pierwsze sprawdza się najlepiej. Większość prac poświęconych problematyce harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień stosuje to kryterium.

Praca [38] jest rozwinięciem metody z pracy [78]. Autorzy rozwijają procedurę nawrotów. Drzewo poszukiwań nie składa się z pojedynczych konfliktów, ale zbiorów konfliktowych (określanych jako „*nogood*”). Zbiór konfliktowy jest zbiorem ograniczeń, które ograniczają przestrzeń rozwiązań do zbioru pustego, a usunięcie dowolnego z nich powoduje, że co najmniej jeden punkt przestrzeni rozwiązań spełnia ograniczenia. Dzięki zbiorom konfliktowym drzewo poszukiwań jest mniej zagłębione, co pozwala na szybsze znalezienie rozwiązania. Rozwiązanie z pracy [44] i [45] zostaje rozwinięte do obsługi wielu dźwigów w pracy [46]. Autorzy wprowadzają zaawansowany model kolizji, gdzie dźwigi mogą znajdować się, co najmniej w odległości b od siebie. Jedynym ograniczeniem problemu jest założenie, że każdy z dźwigów ma „bezpieczną strefę”, czyli obszar na linii, na który żaden inny dźwig nie wjeżdża. Nie jest to zbyt wielkie ograniczenie względem dowolnej kolejności procesowej, więc można uznać, że proponowana metoda nadaje się do większości zastosowań praktycznych. Do obsługi modelu kolizji autorzy przedstawiają 10 możliwych sytuacji kolizyjnych dźwigów. Wprowadzają pomocnicze zmienne decyzyjne oraz dodatkowe ograniczenia, które mają zapewnić brak kolizji. Autorzy nie wprowadzają do modelu kolumn, grup wielolicznych oraz stanowisk wielofunkcyjnych. Autorzy podają jak powinna wyglądać procedura aktualizacji harmonogramu na skutek pojawienia się nowego zamówienia, jednak aspekt czasu rzeczywistego nie jest analizowany. Zakłada się, że obliczenie harmonogramu trwa wystarczająco krótko, aby było można go było wdrożyć. Kolejnym rozszerzeniem metody jest wprowadzenie zamiast ograniczeń czasu minimalnego i maksymalnego, ograniczenia rozmyte w postaci funkcji oceny. Tego typu modyfikacja jest rozpatrywana w pracy [44]. Funkcja oceny danego procesu pokazuje w stopniu jakościowym, na ile dany etap procesu technologicznego został wykonany. Dzięki temu dla różnych rodzajów operacji można ustawić innego rodzaju rozmyte ograniczenia. Technolog może określić, że jakość produktu mocno spada, jeśli przekroczony zostanie optymalny czas trawienia, ale jednocześnie jakość niewiele się obniża w przypadku zbyt długiego płukania. Połączenie kryterium wydajności oraz jakości produktu również jest podane w postaci rozmytej, jako funkcja łącząca czynnik jakościowy z wydajnościowym.

Praca [45] opisuje problem ułożenia harmonogramu dla jednokrotnego zamówienia pewnego zbioru produktów, gdzie każdy z produktów ma tą samą prostą kolejność procesową z zastrzeżeniem, że niektóre wanny mogą być ominięte. Czasy minimalne i maksymalne etapów procesu technologicznego mogą się różnić między zadaniami. Rozwiązanie obsługuje jedynie jeden dźwig i nie wspiera kolumn, stanowisk wielolicznych i wielofunkcyjnych. Rozwiązanie bazuje na metodach CLP. W związku z wykorzystaniem języka programowania Prolog, gdzie stosuje się rachunek predykatów pierwszego rzędu, autorzy używają wcześniej sprawdzonych

w innych problemach planowania ograniczeń. Przykładowo, $wykonaj_przed(x, y)$ gdzie x i y to etapy procesu technologicznego, a ograniczenie oznacza, że zarówno czas początku i końca etapu x ma być mniejszy niż etapu y .

Kolejną pracą, która rozpatruje produkcję wielu typów produktów jest [46]. Proponowana metoda daje możliwość stworzenia harmonogramu dla zamówienia jednokrotnego, gdzie produkty mogą mieć dowolną kolejność procesową. Wprowadzone zostaje również pojęcie rodziny procesów technologicznych. Z rodziną procesów technologicznych mamy do czynienia, gdy produkty mają być poddane zasadniczo temu samemu procesowi technologicznemu, lecz ze względu na różnice, np. w masie, objętości, nieznacznie różnią się czasami przetwarzania.

Praca [26] podobnie jak poprzednia, rozważa zamówienia jednokrotne (całe zamówienie jest z góry znane), przy prostym procesie technologicznym oraz jednym dźwigu, gdzie produkowane są produkty wielu typów. Tutaj model ograniczeń jest rozwiązywany metodami CLP.

Algorytm w pełni dostosowany do czasu rzeczywistego prezentuje praca [21]. Proponowany system harmonogramowania jest tzw. aukcyjnym systemem agentowym. Oznacza to, że agenci – procedury mające zestaw operacji oraz indywidualny cel, współzawodniczą ze sobą poprzez system aukcyjny. W przypadku linii galwanotechnicznych mamy do czynienia z agentami reprezentującymi dźwigi oraz z agentami reprezentującymi stanowiska robocze. Dźwigi konkurują ze sobą o zadania transportowe, czyli podniesienie produktu z wanny, przeniesienie go nad inną wannę oraz opuszczenie tego produktu. Jest to sposób rozwiązania problemu decyzyjnego, jakim jest odpowiednie przydzielenie w czasie rzeczywistym zadań dźwigom. Agent konkretnego dźwigu estymuje swoją zdolność do wykonania danej operacji transportowej. Ta zdolność jest heurystyczną miarą wprowadzoną przez autorów. Łączy ona kilka czynników takich jak elastyczność dźwigu, czyli ilość czasu, jaką dźwig może poświęcić na operację, najwcześniejszy czas, kiedy będzie można wykonać operację, odległość dźwigu od stanowiska źródłowego, odległość innych dźwigów od stanowiska docelowego etc. Kolejnym systemem aukcyjnym jest aukcjonowanie czasem wprowadzenia produktu na linię. Stanowiska robocze estymują przedziały czasów, kiedy będą zajęte, a kiedy wolne. Na tej podstawie określają najwcześniejszy moment w przyszłości, kiedy nowy produkt może być wprowadzony na linię. Ma to na celu minimalizację liczby zepsutych produktów. Proponowane rozwiązanie obsługuje wiele dźwigów i zaawansowany model kolizji (ale przy $b=0$). Rozwiązanie nie wspiera grup stanowisk roboczych, ani kolumn. Podany przykład produkuje trzy rodzaje produktów, różniących się od siebie jedynie jednym z etapów, co symuluje grupę stanowisk. Przypadek testowy nazywa się Jegou-1 (patrz rozdział 3.5.5). Praca w czasie rzeczywistym polega na tym, że wraz ze zbliżaniem

się czasu ukończenia etapu procesu technologicznego, nowa operacja transportowa jest poddawana aukcjonowaniu. Całość dzieje się na bieżąco, a harmonogramowanie jest rozbite na bardzo nieskomplikowane decyzje lokalne. Dzięki temu dodawanie nowych produktów nie wymaga żadnych złożonych obliczeniowo operacji i możliwa jest praca w czasie rzeczywistym. Dzięki temu teoretycznie można byłoby kontynuować pracę nawet po awarii dźwigu, gdyż inne dźwigi przejęłyby jego zadania. Niestety jednocześnie cechą takiego rozproszenia harmonogramowania jest niska wydajność tworzonych harmonogramów oraz możliwość tworzenia defektów. Na przykład, gdy któraś z decyzji doprowadzi algorytm poszukiwań do miejsca, gdzie należy dokonać nawrotu. Może być to już nie możliwe i produkt przekroczy określony czas maksymalny w danym etapie procesu technologicznego.

W pracy [75] proponowana jest heurystyczna metoda harmonogramowania jednego dźwigu. Algorytm przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie decyduje się o czasie wprowadzenia produktu na linię produkcyjną. W drugim etapie, znajdowana jest odpowiednia permutacja operacji transportowych. Operacje związane z dotychczasowymi produktami pozostają w kolejności oryginalnej względem siebie. Sprawdza się, w jaki sposób wstawić nowe operacje transportowe oraz dobrać interwały etapów produkcji tak, aby tworzyły poprawne rozwiązanie. Praca wprowadza bardzo interesujący przykład testowy Kopfer-1 (patrz rozdział 3.5.6). Nieobsługiwane są, ani stanowiska wieloliczne, ani kolumny. Autorzy nie odnoszą się do problemu harmonogramowania w czasie rzeczywistym. Zakłada się, że aktualizację harmonogramu można obliczyć w momencie pojawienia się nowego zamówienia, lub obliczanie będzie wystarczająco krótkie, aby nowy harmonogram można było wdrożyć.

Podsumowując, liczba prac odnoszących się do problemu harmonogramowania dźwigów ze zmiennym strumieniem zamówień jest niewielka. Jedynie dwie prace opisują metody pozwalające na harmonogramowanie wielu dźwigów. Poza pracą [32], gdzie zakłada się, że w przypadku złych decyzji lub podjęcia błędnych decyzji produkty ulegają zniszczeniu, konsekwencje pracy w czasie rzeczywistej nie są rozważane.

Harmonogramowanie dźwigów ze zmiennym strumieniem zamówień, wiąże się ze wzrostem skomplikowania problemu, w stosunku do standardowych organizacji produkcji. Dotychczasowe metody harmonogramowania nie uwzględniają cech charakterystycznych dla systemów produkcyjnych chemicznego przetwarzania z transportem dźwigowym. Oprócz tego, opisane dotychczas algorytmy nie są przystosowane do pracy w czasie rzeczywistym lub charakteryzują się niską wydajnością i dopuszczają do psucia się produktów w trakcie produkcji. Autorzy zauważają korzyści płynące z harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień, lecz nie opracowano metod generujących harmonogramy o wysokiej wydajności dostosowanych do pracy

w czasie rzeczywistym. Ze stanu badań wynika potrzeba opracowania systemu harmonogramowania, który będzie mógł działać w czasie rzeczywistym, przetwarzane produkty nie będą ulegały zniszczeniu, a jednocześnie nie będzie to skutkowało znacznemu pogorszeniu się wydajności systemu produkcyjnego.

1.6. Teza, cel i zakres pracy

Celem pracy jest opracowanie systemu harmonogramowania zdolnego do pracy w czasie rzeczywistym, który będzie spełniał nałożone ograniczenia procesu technologicznego oraz będzie tworzył harmonogramy nie gorsze niż znane metody harmonogramowania.

W pracy stawiana jest następująca **teza**:

„Wykorzystanie metod rozpoznawania w problemie harmonogramowania dźwigów ze zmiennym strumieniem zamówień, pozwala na opracowanie systemu harmonogramowania w czasie rzeczywistym, uwzględniającego cechy charakterystyczne tego systemu produkcyjnego.”

Zakres pracy stanowią następujące zadania:

1. Sformułowanie problemu harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień z uwzględnieniem wymienionych cech charakterystycznych linii galwanotechnicznych:
 - a. wiele dźwigów, model kolizji ze strefą kolizyjną oraz co najmniej jednostajny model przemieszczania się dźwigów,
 - b. kolumny stanowisk roboczych,
 - c. grupy stanowisk o tej samej funkcji,
 - d. stanowiska wielofunkcyjne,
 - e. dowolną kolejność procesową stanowisk roboczych,
 - f. wiele typów produktów,
 - g. elastyczne czasy przetwarzania – określone czasy minimalne i maksymalne przetwarzania etapów procesu technologicznego.
2. Opracowanie algorytmów harmonogramowania dźwigów ze zmiennym strumieniem zamówień.
3. Opracowanie platformy symulacyjnej systemu produkcyjnego.

4. Przeprowadzenie badań symulacyjnych dla przypadków testowych pozwalających ocenić skuteczność algorytmów harmonogramowania.
5. Przeprowadzenie badań symulacyjnych dla rzeczywistej linii galwanotechnicznej.

Rozdział 2. Algorytmy harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień

W niniejszym rozdziale opisano problem harmonogramowania dźwigów ze zmiennym strumieniem zamówień oraz proponowane rozwiązanie. Problem harmonogramowania w czasie rzeczywistym został podzielony na część odpowiedzialną za monitorowanie środowiska i generowanie odpowiedzi w czasie rzeczywistym, nazywaną systemem harmonogramowania oraz na część odpowiedzialną za ułożenie harmonogramu dla zadanych parametrów. Układanie harmonogramu jest częścią problemu bez nałożonych ograniczeń czasu rzeczywistego i nazywane jest zadaniem harmonogramowania lub problemem lokalnym [33]. Uzasadnieniem takiego podziału jest chęć uproszczenia procedury harmonogramowania. W kolejnych podrozdziałach zostało wprowadzona formalna notacja problemu lokalnego, jako problemu optymalizacji z ograniczeniami, którego dziedziny zmiennych decyzyjnych są zarówno dyskretne jak i ciągłe.

2.1. Zadanie harmonogramowania w czasie rzeczywistym

System harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień musi reagować na nowe zamówienia wpływające w czasie rzeczywistym do systemu produkcyjnego. Każde zamówienie jest sekwencją produktów, które należy przetworzyć. Zamówiony produkt identyfikowany jest poprzez kolejność w kolejce oraz przez typ, czyli powiązany z nim proces technologiczny. Zakładamy, że nowe zamówienia dodawane są na koniec kolejki produktów i nie zmieniają kolejności produkcji produktów dotychczasowych.

Problem, z którym mamy do czynienia w systemie harmonogramowania polega na tym, że w pewnej chwili t zostają zamówione dodatkowe produkty. Dane mamy, zatem t – ilość czasu, która upłynęła od uruchomienia produkcji, dotychczasowy harmonogram, który oznaczmy, jako S oraz kolejkę \mathcal{X} zawierającą dotychczasowo oraz nowo zamówione produkty. Zadaniem systemu harmonogramowania jest stworzenie dopuszczalnego harmonogramu S' dla kolejki produktów \mathcal{X} . S' musi spełniać ograniczenia systemu czasu rzeczywistego. To znaczy, jeśli układanie oraz wdrożenie harmonogramu S' trwa δ to harmonogram S' musi być identyczny z harmonogramem S co najmniej do czasu $t + \delta$. Zmienna δ nie jest z góry znana i w dużym stopniu zależy zarówno od parametrów produkcji, wielkości nowego zamówienia oraz od budowy

samego algorytmu harmonogramowania. Szukany harmonogram S' jest sumą decyzji podejmowanych przez algorytm harmonogramowania. Struktura harmonogramu S zostanie opisana w rozdziale 2.2.

Na zmienną δ mamy wpływ poprzez opracowanie wydajnego algorytmu harmonogramowania. Przy stosowanym kryterium wydajności, δ ma pośredni wpływ na wartość kryterium, ale ma wpływ pośredni. Jeśli jako:

$$d: S \rightarrow \mathbb{R} \quad (2.1)$$

oznaczymy długość harmonogramu S to, gdy:

$$t + \delta \geq d(S) \quad (2.2)$$

to harmonogramowanie trwa na tyle długo, że linia zdąży przetworzyć wszystkie produkty z dotychczasowej kolejki. W takiej sytuacji nie uzyskujemy żadnego zysku pod względem wartości kryterium w porównaniu z pracą cykliczną z przebrojeniami. Im δ mniejsze, tym mniejszą przestrzeń algorytm harmonogramowania może przeszukać, a co za tym idzie zmniejszają się szanse na wysokiej jakości harmonogram. Im δ większe, tym algorytm harmonogramowania może pracować dłużej i znajdować coraz krótsze rozwiązania. Jednak tym bardziej nowe rozwiązanie jest ograniczone, ze względu na wymaganie, że S' musi być identyczne z S co najmniej do czasu $t + \delta$. Ze względu na brak możliwości bezpośredniej manipulacji δ zakładamy, że celem jest stworzenie metody harmonogramowania spełniającej dwa warunki: δ w jak najmniejszym stopniu jest zależne od parametrów problemu oraz δ cechuje się małą wariancją. Są to warunki korzystne z punktu widzenia systemu czasu rzeczywistego, bo pozwala na dość dokładne określenie terminów (ang. *deadline*) harmonogramowania.

Charakter problemu nie wymaga, aby system harmonogramowania był twardym systemem rzeczywistym. Wymaga się jedynie, aby odpowiedzi systemu były zsynchronizowane ze środowiskiem. Warunek ten jest zapewniany między innymi przez wspomniane już ograniczenie, że S' musi być identyczne z S co najmniej do czasu $t + \delta$. Aby móc przejść do opisu problemu harmonogramowania, zostanie opisana część rozwiązania dotycząca systemu harmonogramowania.

trwania harmonogramowania. W kolejnych krokach Δ oblicza się za pomocą następującej formuły, gdzie Δ_{stare} oznacza wartość Δ z poprzedniej iteracji, a Δ_{nowe} z kolejnej:

$$\Delta_{nowe} = \max(\Delta_{stare}, \delta) \cdot 1.5 \quad (2.3)$$

To znaczy, że wybiera się większą wartość z Δ z poprzedniego kroku oraz rzeczywistego czasu harmonogramowania ostatniego zadania harmonogramowania i mnoży razy półtora. Wartość współczynnika mnożenia musi być większa od jedności. Wartość ta została dobrana empirycznie. W ten sposób Δ jest zawsze rosnące i uwzględnia aktualne obciążenie systemu harmonogramowania.

2.2. Zadanie harmonogramowania

Zadanie harmonogramowania może być formalnie zapisane, jako problem optymalizacji. Celem zadania harmonogramowania jest stworzenie harmonogramu na podstawie parametrów zadania, własności linii produkcyjnej, definicji procesów technologicznych, zamówionych produktów oraz początkowego stanu linii. Gdy traktujemy zadanie harmonogramowania jako problem optymalizacji, to znalezienie harmonogramu jest równoważne znalezieniu wartościowania zmiennych decyzyjnych problemu. W taki sposób, że spełnione są nałożone ograniczenia oraz mając na względzie kryterium optymalizacji.

Do opisu problemów będzie używana relacja określająca położenie dźwigów:

$$U: \mathcal{H} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R} \quad (2.4)$$

czyli $U(h, t)$ oznacza położenie h -tego dźwigu w chwili t , w osi stanowisk roboczych kolumny, przy której pracuje dźwig.

W kolejnych rozdziałach zostaną opisane poszczególne elementy proponowanego algorytmu harmonogramowania. Będzie on nazywany w rozprawie harmonogramowaniem z selekcją scenariuszy. Schemat algorytmu można znaleźć w rozdziale 2.8. W skrócie, algorytm polega na podzieleniu nowego zamówienia na części, dla każdej z części wybiera się za pomocą metod rozpoznawania odpowiedni scenariusz. Przy pomocy tego scenariusza tworzy się harmonogram cząstkowy. Harmonogramy cząstkowe dopasowuje się wzajemnie w celu uzyskania harmonogramu wynikowego.

2.2.1. Parametry zadania harmonogramowania

Parametry określają jakiego rodzaju zadanie należy rozwiązać. Tabela 2.1 zawiera wszystkie parametry zadania harmonogramowania, które są potrzebne do rozwiązania problemu.

Tabela 2.1 Parametry rozwiązywanego zadania harmonogramowania

Parametr	Opis parametru
$n \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$	Zbiór zdefiniowanych procesów technologicznych – typów produktów, indeksowany n . N – liczba wszystkich procesów.
$\mathcal{L} = (z(1), z(2), \dots, z(k), \dots, z(K))$	Kolejka produktów do przetworzenia, indeksowana k . K – liczba wszystkich produktów. $z(k) \in \mathcal{N}$ – elementy kolejki wskazują na indeks jednego z typów dostępnych produktów.
$\mathcal{L} = (z(1), \dots, z(K)) = (d(1), \dots, d(d_k), \dots, d(K_s)) \cup (\delta(1), \dots, \delta(\delta_k), \dots, \delta(K_\delta))$	Podział kolejki na produkty nowo zamówione oraz dotychczasowe. K_d – liczba dotychczasowych produktów, K_δ – liczba produktów nowo zamówionych. d_k jest indeksem produktów dotychczasowych, a δ_k indeksem nowo zamówionych. $d(s_k) = z(s_k)$, $\delta(\delta_k) = z(K_d + \delta_k)$.
$l \in \mathcal{L} = \{1, \dots, L\}$	Zbiór stanowisk roboczych dostępnych w systemie produkcyjnym, indeksowany l . L – liczba wszystkich typów stanowisk roboczych.
G_l	Liczba stanowisk w grupie l -tej, określone dla wszystkich L grup roboczych.
$P_{l,y}$	Położenia w osi dźwigów względem początku linii produkcyjnej wszystkich stanowisk dla każdej z L grup roboczych. $y \in \{1, \dots, G_l\}$.
$O_n = (o_{n,1}, o_{n,2}, \dots, o_{n,i(n)}, \dots, o_{n,I^n})$	Sekwencje odwiedzania stanowisk roboczych dla każdego z N typów produktów. Każdy etap procesu $o_{n,i(n)} \in \mathcal{L}$ oznacza stanowisko lub grupę, z której należy podnieść produkt, indeksowane $i(n)$. Każdy z procesów technologicznych składa się z indywidualnej liczby etapów I^n , czyli $i(n) \in \{1, \dots, I^n\}$. Produkcja produktu n rozpoczyna się w stanowisku roboczym numer $o_{n,1}$.

Parametr	Opis parametru
$O_n^p = (p_{n,1}, p_{n,2}, \dots, p_{n,i(n)}, \dots, p_{n,l^n})$	Sekwencje odwiedzania stanowisk roboczych dla każdego z N typów produktów. Każdy etap procesu $p_{n,i(n)} \in \mathcal{L}$ oznacza stanowisko lub grupę, do której należy opuścić produkt, indeksowane $i(n)$. Po rozpoczęciu produkcji produktu n w stanowisku numer $o_{n,1}$ produkt jest przenoszony do stanowiska numer $p_{n,1}$. Produkcja produktu n kończy się w stanowisku numer p_{n,l^n} . Parametry O_n oraz O_n^p wspólnie definiują transporty poprzeczne. Jeśli $o_{n,i} \neq p_{n,i-1}$ oznacza to, że produkt podnoszony jest z innego stanowiska niż został opuszczony.
$m_{n,i}$	Czasy minimalne trwania każdego z etapów dla każdego z procesów technologicznych.
$M_{n,i}$	Czasy maksymalne trwania każdego z etapów dla każdego z procesów technologicznych.
$\bar{t}_{n,i}$	Czasy trwania podnoszenia produktu ze stanowisk roboczych dla każdego z etapów dla każdego z procesów technologicznych.
$\underline{t}_{n,i}$	Czasy trwania opuszczania do stanowisk roboczych dla każdego z etapów dla każdego z procesów technologicznych.
$h \in \mathcal{H} = \{1, \dots, H\}$	Zbiór dźwigów pracujących na linii, indeksowany h . H – liczba wszystkich dźwigów.
v	Prędkość maksymalna dźwigów.
b	Szerokość strefy kolizyjnej dźwigów.
$c \in \mathcal{C} = \{1, \dots, C\}$	Zbiór kolumn stanowisk roboczych, indeksowany c . C – liczba wszystkich kolumn.
$C^H : \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{C}$	Relacja określająca przynależność każdego z dźwigów do odpowiedniej kolumny.
$C^L : \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{C}$	Relacja określająca przynależność każdego stanowiska roboczego do odpowiedniej kolumny
$t + \Delta$	Czas adaptacji. Czas od którego należy stworzyć harmonogram.

Dziedziny parametrów dzielą się na dyskretne, do których należą wszystkie czasy, czas trwania, numery stanowisk, stanowisk w grupach, numery kolumn, etc. oraz ciągłe, do których należą położenia stanowisk roboczych, prędkość maksymalna dźwigów oraz szerokość strefy kolizyjnej.

Czasy dyskretyzowane są do pełnych sekund. Dyskretyzacja czasów wynika po części z ograniczonej rozdzielczości sterowania automatyką. Część parametrów ma charakter stały podczas całego czasu trwania produkcji, np. liczba dźwigów, definicje procesów technologicznych (czasy minimalne, maksymalne, sekwencja odwiedzania stanowisk), prędkość dźwigów, etc. Inne parametry, jak kolejka i parametry opisujące stan linii różnią się między kolejnymi zadaniami harmonogramowania.

Oprócz wartości opisanych wcześniej parametrów, dany jest również stan linii produkcyjnej. Stan linii stanowią wartości początkowe pewnego podzbioru zmiennych decyzyjnych. Wartości początkowe są istotne ze względu na wymaganie, aby nowy harmonogram S' był identyczny z dotychczasowym harmonogramem S aż do czasu adaptacji $t + \Delta$. Każda zmienna decyzyjna związana ze zdarzeniem mającym miejsce przed czasem adaptacji nie może zmienić wartości, aby nowy harmonogram S' był zgodny z dotychczasowym harmonogramem S .

2.2.2. Zmienne decyzyjne

Zmienne decyzyjne odzwierciedlają zakres możliwości decyzyjnych, które mają wpływ na przebieg produkcji. W zagadnieniach planowania najczęściej decyduje się o alokacji zasobów do maszyn oraz o czasach przewidzianych na przetwarzanie. Zmienne decyzyjne zadania harmonogramowania są opisane w tabeli 2.2:

Tabela 2.2 Zmienne decyzyjne zadania harmonogramowania

Zmienna decyzyjna	Opis
$\bar{t}_{k,i(z(k))}$	Moment rozpoczęcia podnoszenia k -tego produktu w $i(z(k))$ -tym etapie procesu technologicznego. Jest to chwila, z którą przetwarzanie w stanowisku roboczym dobiega końca.
$\underline{t}_{k,i(z(k))}$	Moment zakończenia opuszczania k -tego produktu w $i(z(k))$ -tym etapie procesu technologicznego. Jest to chwila, z którą przetwarzanie w stanowisku roboczym się rozpoczyna.
$h_{k,i(z(k))}$	Numer dźwigu, który dokonuje podnoszenia k -tego produktu w $i(z(k))$ -tym etapie procesu technologicznego oraz opuszcza produkt w $i(z(k))+1$ -szym etapie procesu technologicznego. Ten sam dźwig opuszcza k -ty produkt, który go podniósł, ponieważ dźwigi nie mogą przekazywać sobie produktów między sobą.

Zmienna decyzyjna	Opis
$a_{k,i(z(k))}$	Numer stanowiska w grupie, która powiązana jest z wykonywaniem etapu $i(z(k))$ -tego dla produktu k -tego. Jeśli stanowisko jest grupą stanowisk to dźwig może podnieść produkt do jednego z G_i stanowisk, a zmienna $a_{k,i(z(k))}$ wyznacza, z którego stanowiska produkt ma być podniesiony. W przeciwnym wypadku $a_{k,i(z(k))} = 1$.
$U(h, \tau)$	Położenie każdego z dźwigów od czasu adaptacji do czasu opuszczenia ostatniego produktu z linii – końca produkcji. h – indeks dźwigu, τ – czas, który upłynął od uruchomienia produkcji.

gdzie $k \in \{1, \dots, K\}$, $z(k) \in \{1, \dots, N\}$, $i(z(k)) \in \{1, \dots, I^{z(k)}\}$. Oraz $0 < \tau \leq M$, gdzie M jest dużą liczbą naturalną.

Wartości początkowe zmiennych opisujących harmonogram S , czyli dla dotychczasowych produktów: $\bar{t}_{x,i(d(x))}$, $\underline{t}_{x,i(d(x))}$, $h_{x,i(d(x))}$, $a_{x,i(d(x))}$ oraz $U(h, \tau)$ dla $x = s_k = 1, \dots, K_d$, $i(d(x)) = 1, \dots, I^{d(x)}$ $h = 1, \dots, H$ oraz $\tau = 0, \dots, t + \Delta$ oznaczmy odpowiednio, jako $\llbracket \bar{t}_{x,i(d(x))} \rrbracket$, $\llbracket \underline{t}_{x,i(d(x))} \rrbracket$, $\llbracket h_{x,i(d(x))} \rrbracket$, $\llbracket a_{x,i(d(x))} \rrbracket$ oraz $\llbracket U(h, \tau) \rrbracket$.

Oznaczmy jako:

$$\mathcal{Q} = \max(\underline{t}_{1,I^{z(1)}}, \dots, \underline{t}_{k,I^{z(k)}}, \dots, \underline{t}_{K,I^{z(K)}}) \quad (2.5)$$

gdzie \underline{t}_{k,I^k} jest to czas opuszczenia systemu produkcyjnego przez produkt k -ty.

Położenia dźwigów $U(h, \tau)$ istotne są jedynie w zakresie między $t + \Delta$ a \mathcal{Q} , czyli czasem opuszczenia w ramach ostatniego etapu ostatniego produktu w kolejce. Dalej wszelkie zmiany położenia dźwigów są bezcelowe. Dlatego też, aby rozwiązać zadanie harmonogramowania wystarczy określić wartości zmiennych $U(h, \tau)$ dla τ z zakresu $(t + \Delta; \mathcal{Q}]$ oraz $h \in \{1, \dots, H\}$. Pozostałe zmienne opisują zachowanie się systemu produkcyjnego dla nowo zamówionych produktów.

Harmonogram S , dla pewnej kolejki \mathcal{X} definiuje wartościowanie zmiennych decyzyjnych zadania harmonogramowania.

2.2.3. Kryterium

Celem harmonogramowania jest osiągnięcie maksymalnej wydajności systemu produkcyjnego. W rozdziale 1.2.3 opisano problem doboru kryterium problemu lokalnego (zadania harmonogramowania) pod kątem optymalizacji globalnego kryterium – minimalizacji długości harmonogramu dla całej produkcji. Im krótszy harmonogram tym większą ma wydajność. Zakładamy, że kryterium minimalizujące długość harmonogramu w trakcie zadania harmonogramowania, prowadzi do minimalizacji długości całego harmonogramu produkcji.

Zatem kryterium optymalizacji można określić jako:

$$Q = \arg \min(\mathcal{Q}) \quad (2.6)$$

gdzie \mathcal{Q} zostało określone w równaniu (2.5) jako czas opuszczenia systemu produkcyjnego przez ostatni produkt.

2.2.4. Ograniczenia

Tylko poprawny harmonogram może zostać wykorzystany do sterowania systemem produkcyjnym. Dlatego też rozwiązania zadania harmonogramowania są obwarowane licznymi ograniczeniami. Fizyczne oraz procesowe własności systemu produkcyjnego implikują ograniczenia na wartościowanie zmiennych decyzyjnych. Mamy do czynienia z dwoma grupami ograniczeń. Ograniczenia należące do pierwszej grupy dotyczą jedynie parametrów zadania harmonogramowania. Określają one, jakie zadania są możliwe do rozwiązania. Ograniczenia należące do drugiej grupy dotyczą zmiennych decyzyjnych w relacji do innych zmiennych decyzyjnych lub parametrów zadania harmonogramowania. Pozwalają one na sprawdzenie czy dane rozwiązanie jest poprawne. W ramach działającego systemu harmonogramowania ograniczenia pierwszego typu są zawsze spełnione. Ograniczenia te mają znaczenie jedynie podczas definiowania systemu produkcyjnego, procesów technologicznych, czyli na długo przed uruchomieniem produkcji. Ograniczenia typu drugiego mają znaczenie podczas rozwiązywania zadania harmonogramowania.

Do ograniczeń pierwszego typu należą:

- Produkcja może działać jedynie, jeśli istnieją jakiegokolwiek dźwigi, stanowiska, kolumny, zdefiniowane procesy technologiczne. To oznacza, że $\mathcal{H} \neq \emptyset$, $\mathcal{L} \neq \emptyset$, $\mathcal{E} \neq \emptyset$, $\mathcal{A} \neq \emptyset$.

- Określone czasy minimalne i maksymalne trwania etapów procesu technologicznego muszą tworzyć interwał dozwolonych czasów ekspozycji. To oznacza, że:

$$\forall n \in \mathcal{N}, \forall i = 1, \dots, I^n \quad 0 < m_{n,i} \leq M_{n,i} \quad (2.7)$$

- Czasy minimalne i maksymalne są dodatnie

$$m_{n,i} > 0, M_{n,i} > 0 \quad (2.8)$$

- Na każdej z kolumn musi znajdować się, co najmniej jeden dźwig. To oznacza, że:

$$HC: \mathcal{C} \times \mathcal{H} \rightarrow \mathbb{N}: HC(c, h) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } C^H(h) \neq c \\ 1 & \text{gdy } C^H(h) = c \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\forall c \in \mathcal{C}, \sum_{1 \leq h \leq H} (HC(c, h)) \geq 1$$

- Na każdej z kolumn musi znajdować się, choć jedno stanowisko robocze. To oznacza, że:

$$LC: \mathcal{C} \times \mathcal{L} \rightarrow \mathbb{N}: LC(c, l) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } C^L(c) \neq l \\ 1 & \text{gdy } C^L(c) = l \end{cases} \quad (2.10)$$

$$\forall l \in \mathcal{L}, \sum_{1 \leq c \leq C} (LC(c, l)) \geq 1$$

- Maksymalna prędkość dźwigów musi być większa od zera. Szerokość strefy kolizyjnej musi być większa od zera. To oznacza, że $v > 0$ oraz $b > 0$.
- Żadne dwa stanowiska znajdujące się w tej samej kolumnie nie mogą znajdować się w tym samym miejscu. Oznacza to, że:

$$\forall j, g = 1, \dots, L, \forall x = 1, \dots, G_j, w = 1, \dots, G_g, C^L(j) = C^L(g) \Rightarrow P_{j,x} \neq P_{g,w} \quad (2.11)$$

Do harmonogramowania nie potrzebne są wymiary fizyczne stanowisk roboczych, więc ograniczenie (2.11) jest wystarczające.

- Każdy proces technologiczny składa się, co najmniej z dwóch etapów. Jeden etap odpowiada wprowadzeniu produktu, natomiast drugi odpowiada ukończeniu produktu.

$$\forall n \in \mathcal{N}, I^n \geq 2 \quad (2.12)$$

- Następujące po sobie etapy procesu technologicznego muszą być realizowane w różnych grupach stanowisk roboczych:

$$\forall n \in \mathcal{N}, i = 1, \dots, I^n - 1, o_{n,i} \neq o_{n,i+1} \quad (2.13)$$

Do ograniczeń drugiego typu należą:

- Produkt musi być najpierw odłożony do stanowiska, aby mógł być z niego wyjęty. To oznacza, że:

$$\forall k = 1, \dots, K, \forall i = 1, \dots, I^{z(k)} - 1, \underline{t}_{k,i} < \bar{t}_{k,i} \quad (2.14)$$

- Produkt może zostać odłożony do następnego stanowiska w kolejności procesowej jedynie później niż został wyjęty z poprzedzającego stanowiska. To oznacza, że:

$$\forall k = 1, \dots, K, \forall i = 1, \dots, I^{z(k)} - 1, \bar{t}_{k,i} < \underline{t}_{k,i+1} \quad (2.15)$$

- Czas ekspozycji produktu w danym etapie procesu technologicznego musi zawierać się między określonym czasem minimalnym oraz maksymalnym. To oznacza, że:

$$\forall k = 1, \dots, K, \forall i = 2, \dots, I^{z(k)} - 1, m_{z(k),i} \leq \bar{t}_{k,i} - \underline{t}_{k,i} \leq M_{z(k),i} \quad (2.16)$$

- Produkty muszą być wprowadzane na linię w kolejności takiej jak zostały zamówione, czyli w kolejności kolejki \mathcal{L} . To oznacza, że

$$\forall k = 1, \dots, K - 1, \underline{t}_{k,0} < \underline{t}_{k+1,0} \quad (2.17)$$

- Produkty należące do nowego zamówienia muszą być wprowadzone do systemu produkcyjnego później niż w czasie $t + \Delta$, czyli po czasie adaptacji:

$$x = K_d + 1, \bar{t}_{x,0} > t + \Delta \quad (2.18)$$

Wystarczy, że pierwszy produkt z nowego zamówienia jest wprowadzony później niż wyznaczony czas adaptacji. Kolejne produkty na mocy ograniczenia (2.17) będą również wprowadzone po tym czasie.

- Dowolne dwa dźwigi pracujące na tej samej kolumnie nie mogą się wyminąć. To oznacza, że:

$$\forall t = 1, \dots, M, \forall h, j = 1, \dots, H, h < j, C^H(h) = C^H(j) \Rightarrow U(h, t) < U(j, t) \quad (2.19)$$

- Dowolne dwa dźwigi pracujące na tej samej kolumnie nie mogą kolidować. Oznacza to, że:

$$\forall t = 1, \dots, M, \forall h, j = 1, \dots, H, h < j, C^H(h) = C^H(j) \Rightarrow |U(h, t) - U(j, t)| > b \quad (2.20)$$

Powyższe kryterium jest wystarczające dla uproszczonego modelu ruchu, gdzie dźwigi zawsze poruszają się prędkością jednostajną. Na położenia dźwigów mogą być nałożone dodatkowe ograniczenia, jeśli wymagany jest inny model ruchu.

- Dźwigi nie mogą poruszać się z prędkością większą niż określona maksymalna prędkość dźwigów. To oznacza, że:

$$\forall t = 1, \dots, M - 1, \forall h = 1, \dots, H, \frac{|U(h, t) - U(h, t + 1)|}{l[s]} \leq v \quad (2.21)$$

O ile v jest wyrażone w $\left[\frac{m}{s}\right]$.

- Pozycja dźwigów jest ograniczona pozycją pierwszego i ostatniego stanowiska w kolumnie, na której znajduje się dźwig. Wprowadźmy pomocnicze zbiory \mathcal{C}^c , stanowisk należących do poszczególnych kolumn:

$$\mathcal{C}^c \subseteq \mathcal{C} : x \in \mathcal{C}^c \Leftrightarrow C^L(x) = c \quad (2.22)$$

gdzie \mathcal{C}^c jest zbiorem numerów grup stanowisk roboczych, należących do kolumny c . Można wtedy wskazać położenia krańcowych stanowisk dla danej kolumny:

$$\begin{aligned} L^{\min} : \mathcal{C} &\rightarrow \mathbb{R}, L^{\min}(c) = \min\left(\forall x \in \mathcal{C}^c, \min\left(P_{x,1}, \dots, P_{x,G_x}\right)\right) \\ L^{\max} : \mathcal{C} &\rightarrow \mathbb{R}, L^{\max}(c) = \max\left(\forall x \in \mathcal{C}^c, \max\left(P_{x,1}, \dots, P_{x,G_x}\right)\right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

Ograniczenie położenia dźwigów w ramach odpowiednich dla nich kolumn można zapisać jako:

$$\forall h = 1, \dots, H, \forall \tau = 1, \dots, M, L^{\min}(C^H(h)) \leq U(h, \tau) \leq L^{\max}(C^H(h)) \quad (2.24)$$

- Podczas opuszczania produktu do stanowiska roboczego w danym etapie procesu technologicznego wyznaczony dźwig musi znajdować się w pozycji odpowiedniego stanowiska roboczego przez cały czas opuszczania. To znaczy, że:

$$\begin{aligned} \forall k = 1, \dots, K, \forall i = 2, \dots, I^{z(k)}, \forall t = 0, \dots, \underline{t}_{z(k),i}, U(h_{k,i-1}, t_{k,i} - t) = P_{p_{n,i}, x} \\ x = a_{k,i+1} \end{aligned} \quad (2.25)$$

- Podczas podnoszenia produktu ze stanowiska roboczego w danym etapie procesu technologicznego wyznaczony dźwig musi znajdować się w pozycji odpowiedniego stanowiska roboczego przez cały czas podnoszenia. To znaczy, że:

$$\begin{aligned} \forall k = 1, \dots, K, \forall i = 1, \dots, I^{z(k)} - 1, \forall t = 0, \dots, \underline{t}_{z(k),i}, U(h_{k,i}, \bar{t}_{k,i} + t) = P_{o_{n,i},x} \\ x = a_{k,i} \end{aligned} \quad (2.26)$$

- Dźwig może przenosić maksymalnie jeden produkt na raz. Zdefiniujmy funkcje pomocnicze:

$$\begin{aligned} \overline{HP} : \mathcal{H} \times \mathbb{N} &\rightarrow \{0,1\} \\ \overline{HP}(h,t) &= \begin{cases} 1 - \text{gdy } \exists x \in \{1, \dots, K\}, y \in \{1, \dots, I^x\} : h_{x,y} = h \wedge \bar{t}_{x,y} = t \\ 0 - \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \\ \underline{HO} : \mathcal{H} \times \mathbb{N} &\rightarrow \{0,1\} \\ \underline{HO}(h,t) &= \begin{cases} 1 - \text{gdy } \exists x \in \{1, \dots, K\}, y \in \{1, \dots, I^x\} : h_{x,y} = h \wedge t_{x,y} = t \\ 0 - \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \\ \overline{H} : \mathcal{H} \times \mathbb{N} &\rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\} \\ \overline{H}(h,t) &= \sum_{1 \leq x \leq t} (\overline{HP}(h,x)) \\ \underline{H} : \mathcal{H} \times \mathbb{N} &\rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\} \\ \underline{H}(h,t) &= \sum_{1 \leq x \leq t} (\underline{HO}(h,x)) \end{aligned} \quad (2.27)$$

gdzie funkcja $\underline{H}(h,t)$ oblicza liczbę opuszczeń produktów a $\overline{H}(h,t)$ liczbę podniesień produktów przez dźwig h -ty od początku produkcji do czasu t . Ograniczenie można sformułować zatem następująco:

$$\forall h = 1, \dots, H, \forall t = 1, \dots, M, 0 \leq \overline{H}(h,t) - \underline{H}(h,t) \leq 1 \quad (2.28)$$

Oznacza to, że każdy dźwig musi spełniać warunek, że w danym momencie produkcji liczba podniesień w stosunku do liczby opuszczeń musi być taka sama lub różnić się o jeden. Podczas uruchomienia produkcji dźwig nie transportuje żadnego produktu. Gdy liczba podniesień jest równa liczbie opuszczeń, oznacza to, że dźwig nie transportuje żadnego produktu, gdyż na każde podniesienie przypada jedno opuszczenie. Gdy liczba podniesień jest większa o jeden od liczby opuszczeń wtedy dźwig transportuje dokładnie jeden produkt, co jest zgodne z ograniczeniami. Więcej opuszczeń niż podniesień jest niedopuszczalne, bo dźwig nie może opuścić produktu, jeśli żadnego nie transportuje.

- Stanowisko robocze może przetwarzać maksymalnie jeden produkt na raz. Zdefiniujmy funkcje pomocnicze:

$$\begin{aligned}
\overline{LP} &: \mathcal{L} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \{0,1\} \\
\overline{LP}(l, g, t) &= \begin{cases} 1 - \text{gd}y \exists x \in \{1, \dots, K\}, y \in \{1, \dots, I^x\}, \\ o_{z(x),y} \in O_{z(x)} : o_{z(x),y} = l \wedge \bar{t}_{x,y} = t \wedge a_{x,y} = g \\ 0 - \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \\
\underline{LO} &: \mathcal{L} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \{0,1\} \\
\underline{LO}(l, g, t) &= \begin{cases} 1 - \text{gd}y \exists x \in \{1, \dots, K\}, y \in \{1, \dots, I^x\}, \\ p_{z(x),y} \in O_{z(x)}^p : p_{z(x),y} = l \wedge t_{x,y} = t \wedge a_{x,y} = g \\ 0 - \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (2.29) \\
\bar{L} &: \mathcal{L} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\} \\
\bar{L}(l, g, t) &= \sum_{1 \leq x \leq t} (\overline{LP}(l, g, x)) \\
\underline{L} &: \mathcal{L} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\} \\
\underline{L}(l, g, t) &= \sum_{1 \leq x \leq t} (\underline{LO}(l, g, x))
\end{aligned}$$

gdzie funkcja $\bar{L}(l, g, t)$ oblicza liczbę podniesień produktów a $\underline{L}(l, g, t)$ liczbę opuszczeń produktów do g -tego stanowiska l -tej grupy od początku produkcji do czasu t . Ograniczenia tego typu nie obowiązują stanowisk załadowniczych oraz rozładowniczych. W stanowisku załadowniczym produkty wprowadzane są na linię, więc dźwig może podnosić produkty bez uprzedniego opuszczania. Na stanowiskach rozładowniczych ukończone produkty opuszczają linię produkcyjną. Dźwig może opuszczać produkty do tego stanowiska wielokrotnie. Wprowadźmy zatem zbiór grup stanowisk, który zawiera jedynie stanowiska załadowcze i rozładowcze:

$$\mathcal{L}' \subset \mathcal{L} : \forall n = 1, \dots, N, o_{n,1} \in O_n, o_{n,I^n} \in O_n \Rightarrow o_{n,1} \in \mathcal{L}' \wedge o_{n,I^n} \in \mathcal{L}' \quad (2.30)$$

Ograniczenie można sformułować następująco:

$$\forall l \in \mathcal{L} \setminus \mathcal{L}', \forall g = 1, \dots, G_l, \forall t = 1, \dots, M, 0 \leq \underline{L}(g, t) - \bar{L}(g, t) \leq 1 \quad (2.31)$$

Oznacza to, że dla każdego stanowiska na linii musi być spełnione ograniczenie, że w danym momencie produkcji liczba opuszczeń produktów jest równa liczbie podniesień lub różna o jeden. Wszystkie stanowiska są puste na początku produkcji. Gdy liczba opuszczeń i podniesień jest równa, stanowisko jest puste i nie przetwarza żadnego produktu. Gdy opuszczeń jest więcej stanowisko przetwarza dokładnie jeden produkt.

- Nowy harmonogram S' musi być identyczny z dotychczasowym harmonogramem S co najmniej do czasu adaptacji $t + \Delta$. Oznacza to, że wartości wszystkich zmiennych decyzyjnych powiązanych ze zdarzeniami mającymi miejsce przed czasem adaptacji muszą być identyczne z wartościami początkowymi tych zmiennych. Dla położenia dźwigów oznacza to:

$$\forall h = 1, \dots, H, \forall \tau = 1, \dots, t + \Delta, U(h, \tau) = \llbracket U(h, \tau) \rrbracket \quad (2.32)$$

Dla zdarzeń związanych z podniesieniem produktu przez dźwig:

$$\begin{aligned} \forall k = 1, \dots, K_d, \forall x = 1, \dots, I^{d(k)}, \\ \underline{t}_{k,x} \leq t + \Delta \Rightarrow \underline{t}_{k,x} = \llbracket \underline{t}_{k,x} \rrbracket \\ \underline{t}_{k,x} \leq t + \Delta \Rightarrow a_{k,x} = \llbracket a_{k,x} \rrbracket \end{aligned} \quad (2.33)$$

Oznacza to, że jeśli produkt został opuszczony do grupy przed czasem adaptacji to zarówno czas tego opuszczenia jak i wybrane stanowisko w ramach grupy pozostają takie same jak w dotychczasowym harmonogramie. Dla zdarzeń związanych z opuszczeniem produktu przez dźwig ograniczenie można zapisać jako:

$$\begin{aligned} \forall k = 1, \dots, K_d, \forall x = 1, \dots, I^{d(k)}, \\ \bar{t}_{k,x} \leq t + \Delta \Rightarrow \bar{t}_{k,x} = \llbracket \bar{t}_{k,x} \rrbracket \\ \bar{t}_{k,x} \leq t + \Delta \Rightarrow h_{k,x} = \llbracket h_{k,x} \rrbracket \end{aligned} \quad (2.34)$$

Oznacza to, że jeśli produkt został podniesiony z grupy przed czasem adaptacji to zarówno czas tego podniesienia jak i podnoszący dźwig pozostają takie same jak w dotychczasowym harmonogramie.

Wprowadzone ograniczenia pozwalają na sprawdzenie, czy dane rozwiązanie – harmonogram jest poprawne. Zakłada się, że poprawny harmonogram wystarczy do działania systemu produkcyjnego, czyli w sposób jednoznaczny można na jego podstawie wyznaczyć sterowanie dla znajdujących się w systemie produkcyjnym automatów.

2.2.5. Harmonogram kolejki produktów

Przypisanie wartości zmiennym decyzyjnym definiuje pewien harmonogram S . Oczywiście postać harmonogramu S jest różna w zależności od wielkości problemu, to znaczy zależy od liczby przetwarzanych produktów oraz ich rodzaju. Harmonogram S to zbiór wartości, które można przypisać zmiennym decyzyjnym określonego zadania harmonogramowania. To znaczy, że S określa wartości $U(h, \tau)$, $\underline{t}_{k,i}$, $\bar{t}_{k,i}$, $h_{k,i}$, $a_{k,i}$ dla określonej kolejki Z . W trakcie tworzenia wynikowego harmonogramu, na harmonogramie S , wykonywane są operacje modyfikujące wartości zmiennych decyzyjnych. Po ukończeniu algorytmu harmonogramowania uzyskuje się harmonogram S , czyli ogół decyzji związanych z pracą systemu produkcyjnego, które są wyjściem do pracy maszyn produkcyjnych.

Aby harmonogram można było jednoznacznie przełożyć na sterowanie automatów pracujących w systemie produkcyjnym wymagane są jeszcze modele zachowania się stanowisk roboczych oraz model przemieszczania się dźwigów.

Stanowisko może zachowywać się w różny sposób, w zależności od określonych w harmonogramie S , czasów $\underline{t}_{k,i}$ oraz $\bar{t}_{k,i}$, jak również określonych w parametrach: typu, masy, powierzchni produktu (i innych charakterystyk). Jeśli jest to stanowisko galwanizacyjne, stanowisko może na przykład używać innej krzywej prądowej. W rozprawie nie będziemy zajmować się szczegółowo modelowaniem zachowania się stanowisk roboczych.

Jeśli chodzi o model przemieszczania się dźwigów będziemy używać uproszczonego modelu ruchu dźwigów. Pozwala on przedstawienie harmonogramu w postaci łatwo zrozumiałej dla człowieka, tj. wykresu położenia dźwigów w czasie.

2.3. Zadanie cyklicznego harmonogramowania dźwigów

W niniejszym rozdziale zostanie opisany problem cyklicznej organizacji zamówień. Jest to istotne z punktu widzenia organizacji ze zmiennym strumieniem zamówień, dlatego że w algorytmie harmonogramowania będą używane cyklogramy. Cyklogram jest specjalnym harmonogramem, który jest wynikiem rozwiązania zadania cyklicznego harmonogramowania dźwigów. Zostanie przedstawiona notacja problemu, przy założeniu, że tworzony cyklogram produkuje jeden produkt danego typu na cykl.

2.3.1. Parametry cyklicznego zadania harmonogramowania

Parametry cyklicznego zadania harmonogramowania są niemal identyczne z parametrami problemu harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień. Parametrami problemu są

parametry systemu produkcyjnego, to znaczy: zbiór grup stanowisk roboczych \mathcal{L} , zbiór dźwigów \mathcal{H} , zbiór kolumn \mathcal{C} , liczby stanowisk w grupach G_i , położenia stanowisk $P_{l,v}$, prędkość maksymalna ruchu dźwigów v oraz szerokość strefy kolizyjnej b . Cyklogram tworzy się dla określonego typu produktu $n \in \mathcal{N}$, gdzie typy produktów określone są sekwencją produkcyjną O_n oraz interwałami ekspozycji $m_{n,i}$, $M_{n,i}$. Rozwiązaniem problemu cyklicznego harmonogramowania dźwigów jest cyklogram $v_{n,v} \in \mathcal{V}^n$. Poszczególne cyklogramy $v_{n,1}, \dots, v_{n,V^n}$ są różnymi rozwiązaniami, charakteryzującymi się długością $T(v_{n,v})$ oraz ładownością $G(v_{n,v})$.

2.3.2. Zmienne decyzyjne

Zmienne decyzyjne odzwierciedlają zakres możliwości decyzyjnych, które mają wpływ na przebieg produkcji. W cyklicznym zadaniu harmonogramowania podejmuje się decyzje odnośnie sekwencji operacji transportowych, alokacji zasobów oraz czasów wykonania poszczególnych operacji. Zmienne decyzyjne cyklicznego zadania harmonogramowania są opisane w tabeli 2.3:

Tabela 2.3 Zmienne decyzyjne cyklicznego zadania harmonogramowania

Zmienna decyzyjna	Opis
$\bar{t}(v_{n,v}, i(n))$	Moment rozpoczęcia podnoszenia w $i(n)$ -tym etapie procesu technologicznego typu n , dla cyklogramu $v_{n,v}$. Jest to chwila, z którą przetwarzanie w stanowisku roboczym dobiega końca.
$\underline{t}(v_{n,v}, i(n))$	Moment zakończenia opuszczania w $i(n)$ -tym etapie procesu technologicznego typu n , dla cyklogramu $v_{n,v}$. Jest to chwila, z którą przetwarzanie w stanowisku roboczym się rozpoczyna.
$h(v_{n,v}, i(n))$	Numer dźwigu, który dokonuje podnoszenia w $i(z(k))$ -tym oraz opuszcza produkt w $i(n)+1$ -szym etapie procesu technologicznego typu n , dla cyklogramu $v_{n,v}$. Ten sam dźwig opuszcza produkt, który go podniósł, ponieważ dźwigi nie mogą przekazywać sobie produktów między sobą.
$a(v_{n,v}, i(n), x)$	Dla produktu x -tego w kolejności, jest to numer stanowiska w grupie, która powiązana jest z wykonywaniem etapu $i(n)$ -tego procesu technologicznego typu n , dla cyklogramu $v_{n,v}$. Jeśli stanowisko jest grupą równoległych stanowisk to dźwig może podnieść produkt do jednego z G_i stanowisk, a zmienna $a(v_{n,v}, i(n), x)$ wyznacza, z którego stanowiska produkt ma być podniesiony.

Zmienna decyzyjna	Opis
$T(v_{n,v})$	Długość trwania cyklogramu.
$U(v_{n,v}, h, \Lambda)$	Położenia każdego z dźwigów od początku trwania cyklogramu do końca trwania cyklogramu. h – indeks dźwigu, $\Lambda = 0, \dots, T(v_{n,v})$

gdzie $n \in \{1, \dots, N\}$, $i(n) \in \{1, \dots, I^n\}$, $x = 1, \dots, M$, gdzie M jest dużą liczbą naturalną, oraz $0 \leq \Lambda \leq T(v_{n,v})$.

W problemie cyklicznego harmonogramowania dźwigów, wartość zmiennej decyzyjnej $a(v_{n,v}, i(n), x)$ jest ustalana przy założeniu, że grupa stanowisk traktuje się jako kolejkę FIFO (ang. *First In First Out*). To oznacza, że w kolejnych cyklach produkt jest opuszczany do kolejnych stanowisk w ramach grupy, a podnoszone odpowiednio ze stanowiska wcześniejszego. To powoduje, że jeśli grupa składa się z trzech stanowisk, produkt przetwarzany jest przez pełne dwa cykle oraz część cyklu trzeciego, tzn. $a(v_{n,v}, i(n), x) = x \bmod(G_y) + 1$, gdzie $y = o_{i(n)}$.

Ładowność cyklogramu $G(v_{n,v})$ jest równa liczbie produktów, które jednocześnie przetwarzane są w trakcie cyklu, czyli w czasie między 0 a $T(v_{n,v})$. Na wartość ładowności mają wpływ jedynie stanowiska biorące udział w procesie technologicznym. Oznaczmy \mathcal{L}_n , jako zbiór grup biorących udział w n -tym procesie technologicznym:

$$\mathcal{L}_n \subseteq \mathcal{L}, l \in \mathcal{L}_n \Leftrightarrow \exists o_{n,i} \in O_n, o_{n,i} = l \quad (2.35)$$

Wartość ładowności można obliczyć w następujący sposób:

$$\begin{aligned}
& \mathbf{P}_{\text{Stanowisko}}: \mathcal{Y}^n \times O_n \rightarrow \{0, 1\} \\
& \mathbf{P}_{\text{Stanowisko}}(v_{n,v}, o_{n,i(n)}) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } \underline{t}(v_{n,v}, i(n)) \leq \bar{t}(v_{n,v}, i(n)) \\ 1 & \text{gdy } \underline{t}(v_{n,v}, i(n)) > \bar{t}(v_{n,v}, i(n)) \end{cases} \\
& \mathbf{P}_{\text{Dźwig}}: \mathcal{Y}^n \times O_n \rightarrow \{0, 1\} \\
& \mathbf{P}_{\text{Dźwig}}(v_{n,v}, o_{n,i(n)}) = \begin{cases} 0 & \text{gdy } \underline{t}(v_{n,v}, i(n)) \leq \bar{t}(v_{n,v}, i(n) + 1) \\ 1 & \text{gdy } \underline{t}(v_{n,v}, i(n)) > \bar{t}(v_{n,v}, i(n) + 1) \end{cases} \\
& G(v_{n,v}) = \sum_{l \in \mathcal{L}_n} (G_l - 1) + \sum_{1 \leq i \leq I^n} (\mathbf{P}_{\text{Stanowisko}}(v_{n,v}, o_{n,i})) + \sum_{1 \leq o \leq I^n} (\mathbf{P}_{\text{Dźwig}}(v_{n,v}, o_{n,i}))
\end{aligned} \quad (2.36)$$

Ładowność cyklogramu składa się z trzech komponentów. Pierwszy powiązany jest z grupami stanowisk, gdzie każde dodatkowe stanowisko ponad jedno powoduje, że w produkcji równolegle

bierze udział dodatkowy produkt. Drugi związany jest z przenoszeniem między cyklami produktów w stanowiskach roboczych, co zwiększa ładowność o jeden na każdy produkt przeniesiony między cyklami. Trzeci komponent dotyczy produktów przeniesionych między cyklami przez dźwigi. Ładowność cyklogramu ma istotne znaczenie z punktu widzenia produkcji krótkich serii produktów, jak również samego systemu produkcyjnego. Liczba tzw. belek do zawieszek musi być co najmniej równa ładowności w produkcji cyklicznej. Każda belka stanowi pewien koszt inwestycyjny podczas konstrukcji linii.

Produkcja w organizacji cyklicznej przebiega poprzez powtarzanie cyklogramu w kolejnych taktach. W kolejnych taktach, wszystkie operacje z cyklogramu są powtórzone. Są one jedynie przesunięte o długość cyklogramu. Nie oznacza to, że produkt przebywa w systemie produkcyjnym jedynie przez jeden cykl. Produkty przenikają w domenę czasu poszczególne cykle. Są przenoszone w stanowiskach oraz niesione na dźwigach.

2.3.3. Kryterium

Celem harmonogramowania jest osiągnięcie maksymalnej wydajności. W przypadku cyklogramu, wyprodukowanie x produktów typu n przy pomocy cyklogramu $v_{n,v}$ trwa $G(v_{n,v}) + x - 1$ cykli o długości $T(v_{n,v})$. Przy bardzo dużym x , długość produkcji zależy niemal jedynie od długości cyklogramu, więc w literaturze, jako kryterium wydajności stosuje się bezpośrednio minimalizację długości cyklu:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(G(v_{n,v}) + x - 1) \cdot T(v_{n,v})}{x} = T(v_{n,v}) \quad (2.37)$$

Zatem kryterium optymalizacji cyklicznego zadania harmonogramowania można określić, jako:

$$Q_c = \arg \min(T(v_{n,v})) \quad (2.38)$$

2.3.4. Ograniczenia

Część ograniczeń, określających poprawny cyklogram, jest identyczna z zadaniem harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień. Wszystkie ograniczenia z pierwszej grupy (rozdział 2.2.4 „Ograniczenia”) również dotyczą problemu cyklicznego. W przypadku cyklogramów ograniczenia muszą zapewnić oprócz poprawnych, niekolidujących marszrut dźwigów, przetwarzanie zgodne z określonym procesem technologicznym, ale również takie własności, jak możliwość powtarzania harmonogramu w sposób cykliczny.

Poprawny cyklogram musi spełniać również następujące ograniczenia:

- Czas ekspozycji produktu w danym etapie procesu technologicznego musi zawierać się między określonym czasem minimalnym oraz maksymalnym. To oznacza, że dla danego cyklogramu $v_{n,v}$:

$$\forall i = 2, \dots, I^n - 1, m_{n,i} \leq (\bar{t}(v_{n,v}, i) - \underline{t}(v_{n,v}, i) + T(v_{n,v})) \bmod T(v_{n,v}) + T(v_{n,v}) \cdot (G_{o_i} - 1) \leq M_{n,i} \quad (2.39)$$

Część sumy objęta modulo oblicza czas przetwarzania produktu w ramach jednego cyklu. Następnie jest to powiększone o pewną liczbę długości cykli, która ma związek z liczbą stanowisk w grupie. Jeśli jedynie jedno stanowisko jest odpowiedzialne za realizację danego etapu, długość przetwarzania ustala się na podstawie tylko jednego cyklu.

- Dowolne dwa dźwigi pracujące na tej samej kolumnie nie mogą się wyminąć. To oznacza, że dla danego cyklogramu $v_{n,v}$:

$$\forall t = 1, \dots, T(v_{n,v}), \forall h, j = 1, \dots, H, h < j, C^H(h) = C^H(j) \Rightarrow U(v_{n,v}, h, t) < U(v_{n,v}, j, t) \quad (2.40)$$

- Dowolne dwa dźwigi pracujące na tej samej kolumnie nie mogą kolidować. Dla cyklogramu $v_{n,v}$ oznacza to, że:

$$\forall t = 1, \dots, T(v_{n,v}), \forall h, j = 1, \dots, H, h < j, C^H(h) = C^H(j) \Rightarrow |U(v_{n,v}, h, t) - U(v_{n,v}, j, t)| > b \quad (2.41)$$

Powyższe kryterium jest wystarczające dla uproszczonego modelu ruchu, gdzie dźwigi zawsze poruszają się prędkością jednostajną. Na położenia dźwigów mogą być nałożone dodatkowe ograniczenia, jeśli wymagany jest inny model ruchu.

- Dźwigi nie mogą poruszać się z prędkością większą niż określona maksymalna prędkość dźwigów. To oznacza, że:

$$\forall t = 1, \dots, T(v_{n,v}) - 1, \forall h = 1, \dots, H, \frac{|U(v_{n,v}, h, t) - U(v_{n,v}, h, t + 1)|}{1[s]} \leq v \quad (2.42)$$

- Pozycja dźwigów jest ograniczona pozycją pierwszego i ostatniego stanowiska w kolumnie, na której znajduje się dźwig (definicje stosowanych funkcji pomocniczych: patrz równania (2.22) i (2.23)), dla danego cyklogramu $v_{n,v}$:

$$\forall h = 1, \dots, H, \forall \tau = 1, \dots, T(v_{n,v}), L^{\min}(C^H(h)) \leq U(v_{n,v}, h, \tau) \leq L^{\max}(C^H(h)) \quad (2.43)$$

- Podczas opuszczania produktu do stanowiska roboczego w danym etapie procesu technologicznego wyznaczony dźwig musi znajdować się w pozycji odpowiedniego stanowiska roboczego przez cały czas opuszczania. To znaczy, że dla danego cyklogramu $v_{n,v}$:

$$\begin{aligned} \forall i = 2, \dots, I^n, \forall t = 0, \dots, \underline{t}_{n,i}, U(v_{n,v}, h(v_{n,v}, i), \underline{t}(v_{n,v}, i) - t) = P_{p_{n,i}, x} \\ x = a(v_{n,v}, i) \end{aligned} \quad (2.44)$$

- Podczas podnoszenia produktu ze stanowiska roboczego w danym etapie procesu technologicznego wyznaczony dźwig musi znajdować się w pozycji odpowiedniego stanowiska roboczego przez cały czas podnoszenia. To znaczy, że:

$$\begin{aligned} \forall i = 1, \dots, I^n - 1, \forall t = 0, \dots, \overline{t}_{n,i}, U(h(v_{n,v}, i), \overline{t}(v_{n,v}, i) + t) = P_{o_{n,i}, x} \\ x = a(v_{n,v}, i) \end{aligned} \quad (2.45)$$

- Dźwig może przenosić maksymalnie jeden produkt na raz. Zdefiniujmy funkcje pomocnicze, analogiczne jak w równaniu (2.27):

$$\begin{aligned} \overline{HP}_c : \mathcal{V}^n \times \mathcal{H} \times \mathbb{N} &\rightarrow \{0, 1\} \\ \overline{HP}_c(v_{n,v}, h, t) &= \begin{cases} 1 - & \text{gdy } \exists i \in \{1, \dots, I^n\} : h(v_{n,v}, i) = h \wedge \overline{t}(v_{n,v}, i) = t \\ 0 - & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \\ \underline{HO}_c : \mathcal{V}^n \times \mathcal{H} \times \mathbb{N} &\rightarrow \{0, 1\} \\ \underline{HO}_c(v_{n,v}, h, t) &= \begin{cases} 1 - & \text{gdy } \exists i \in \{1, \dots, I^n\} : h(v_{n,v}, i) = h \wedge \underline{t}(v_{n,v}, i) = t \\ 0 - & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \\ \overline{H}_c : \mathcal{V}^n \times \mathcal{H} \times \mathbb{N} &\rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\} \\ \overline{H}_c(v_{n,v}, h, t) &= \sum_{1 \leq x \leq t} (\overline{HP}_c(v_{n,v}, h, x)) \\ \underline{H}_c : \mathcal{V}^n \times \mathcal{H} \times \mathbb{N} &\rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\} \\ \underline{H}_c(v_{n,v}, h, t) &= \sum_{1 \leq x \leq t} (\underline{HO}_c(v_{n,v}, h, x)) \end{aligned} \quad (2.46)$$

gdzie funkcja $\underline{H}_c(v_{n,v}, h, t)$ oblicza liczbę opuszczeń produktów a $\overline{H}_c(v_{n,v}, h, t)$ liczbę podniesień produktów w cyklogramie $v_{n,v}$ przez dźwig h -ty od początku produkcji do czasu t . Ograniczenie przenoszenia jedynie jednego produktu przez dźwig ma postać:

$$\begin{aligned} \forall h = 1, \dots, H, \forall t = 1, \dots, T(v_{n,v}), |\overline{H}_c(v_{n,v}, h, t) - \underline{H}_c(v_{n,v}, h, t)| \leq 1 \\ \forall h = 1, \dots, H, \overline{H}_c(v_{n,v}, h, T(v_{n,v})) = \underline{H}_c(v_{n,v}, h, T(v_{n,v})) \end{aligned} \quad (2.47)$$

Oznacza to, że każdy dźwig musi spełniać warunek, że w danym momencie produkcji liczba podniesień w stosunku do liczby opuszczeń musi być taka sama lub różnić się o jeden. Dopuszczalna jest sytuacja, gdzie dźwig rozpoczyna cykl opuszczeniem produktu, co jest następstwem podniesienia w poprzednim cyklu. Dodatkowo, liczba podniesień i opuszczeń w cyklu musi być identyczna.

- Stanowisko robocze może przetwarzać maksymalnie jeden produkt na raz. Zdefiniujmy funkcje pomocnicze, analogiczne do (2.29):

$$\begin{aligned}
\overline{LP}_c &: \mathcal{V}^n \times \mathcal{L} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \{0,1\} \\
\overline{LP}_c(v_{n,v}, l, g, t) &= \begin{cases} 1 - & \text{gdy } \exists i \in \{1, \dots, I^n\}, o_{n,i} \in O_n: o_{n,i} = l \wedge \bar{t}(v_{n,v}, i) = t \wedge a(v_{n,v}, i) = g \\ 0 - & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \\
\underline{LO}_c &: \mathcal{V}^n \times \mathcal{L} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \{0,1\} \\
\underline{LO}_c(v_{n,v}, l, g, t) &= \begin{cases} 1 - & \text{gdy } \exists i \in \{1, \dots, I^n\}, o_{n,i} \in O_n: o_{n,i} = l \wedge \bar{t}(v_{n,v}, i) = t \wedge a(v_{n,v}, i) = g \\ 0 - & \text{w przeciwnym przypadku} \end{cases} \quad (2.48) \\
\overline{L}_c &: \mathcal{V}^n \times \mathcal{L} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\} \\
\overline{L}_c(v_{n,v}, l, g, t) &= \sum_{1 \leq x \leq t} (\overline{LP}_c(v_{n,v}, l, g, x)) \\
\underline{L}_c &: \mathcal{V}^n \times \mathcal{L} \times \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\} \\
\underline{L}_c(v_{n,v}, l, g, t) &= \sum_{1 \leq x \leq t} (\underline{LO}_c(v_{n,v}, l, g, x))
\end{aligned}$$

gdzie funkcja $\overline{L}_c(v_{n,v}, l, g, t)$ oblicza liczbę podniesień produktów a $\underline{L}_c(v_{n,v}, l, g, t)$ liczbę opuszczeń produktów do g -tego stanowiska l -tej grupy, dla cyklogramu $v_{n,v}$, od początku produkcji do czasu t . Ograniczenia tego typu nie obowiązują stanowisk załadowczych oraz rozładowczych (patrz równanie (2.30)). Ograniczenie można sformułować następująco:

$$\forall l \in \mathcal{L} / \mathcal{L}', \forall g = 1, \dots, G_l, \forall t = 1, \dots, T(v_{n,v}), \left| \underline{L}_c(v_{n,v}, h, t) - \overline{L}_c(v_{n,v}, h, t) \right| \leq 1 \quad (2.49)$$

Oznacza to, że dla każdego stanowiska na linii musi być spełnione ograniczenie, że w danym momencie produkcji liczba opuszczeń produktów jest równa liczbie podniesień lub różna o jeden. Wszystkie stanowiska są puste na początku produkcji. Gdy liczba opuszczeń i podniesień jest równa, stanowisko jest puste i nie przetwarza żadnego produktu. Gdy opuszczeń jest więcej stanowisko przetwarza dokładnie jeden produkt.

- Aby cyklogram można było powtarzać w sposób cykliczny, dźwigi muszą znajdować się w tym samym miejscu na początku oraz końcu trwania cyklu:

$$\forall h = 1, \dots, H, U(v_{n,v}, h, T(v_{n,v})) = U(v_{n,v}, h, 0) \quad (2.50)$$

2.3.5. Rozwijanie cyklogramu

Cyklogram jest jedynie szablonem harmonogramu, określającym sposób pracy systemu produkcyjnego i nie może być bezpośrednio wykorzystany, jako harmonogram pracy linii. Przy pomocy cyklogramu, jako generatora, można jednak wygenerować harmonogram produkcji dla określonej liczby produktów. Będziemy tą operację nazywać rozwijaniem cyklogramu. Jej celem jest wyznaczenie harmonogramu dla pewnej liczby produktów tego samego typu, poprzez cykliczne powtórzenie odpowiedniej liczby cykli cyklogramu oraz eliminację jałowych ruchów dźwigów.

Gdy uruchamiamy system produkcyjny, żadne stanowisko nie przetwarza produktów. Muszą być one systematycznie wprowadzane do systemu produkcyjnego, aby zapełnić linię produkcyjną. W produkcji cyklicznej system produkcyjny jest ładowany przez pewną liczbę cykli. Dopiero po liczbie cykli równej ładowności używanego cyklogramu pierwszy produkt opuszcza system produkcyjny. Gdy liczba jednocześnie przetwarzanych produktów równa jest ładowności, system osiąga w tym momencie swoją nominalną wydajność jednego produktu na takt. Do tego czasu pewien podzbiór operacji dźwigów jest bezcelowy. Nie można, bowiem podnieść produktu ze wszystkich przewidzianych w cyklogramie stanowisk, gdyż nie zostały one jeszcze odłożone do tych stanowisk. Podobna sytuacja ma miejsce, gdy wygasza się produkcję i nie wprowadza się nowych produktów do systemu produkcyjnego. System nadal produkuje jeden produkt na cykl, jednak operacje cyklogramu związane z produktami, które nie są wprowadzane do systemu produkcyjnego są bezcelowe.

Są zasadniczo dwie metody wykorzystania cyklogramów do generacji docelowego harmonogramu produkcji. Opisana dalej metoda rozwijania cyklogramów oraz rozwiązanie technologiczne w ramach systemu produkcyjnego. Problem jałowych przebiegów dźwigów jest rozwiązywany w taki sposób, że dźwigi mimo wszystko wykonują powierzone operacje, zgodnie ze scenariuszem, jednak na początku produkcji umieszcza się w odpowiednich miejscach atrapy – belki bez umieszczonych na nich produktów. Dzięki temu dźwigi mogą wykonywać wszystkie operacje cyklogramu a atrapy sukcesywnie opuszczają system produkcyjny, w miarę jego załadunku. Podobnie podczas rozładunku linii, zamiast wprowadzania nowych produktów wprowadza się atrapy, tak długo aż ostatni produkt opuści system produkcyjny.

Mniej kosztowną metodą jest rozwijanie cyklogramów. Oznaczmy procedurę rozwijania cyklogramów:

$$C: \mathcal{Y}^n \times \mathbb{N} \rightarrow S \quad (2.51)$$

czyli $C(v_{n,v}, x)$ oznacza stworzenie harmonogramu S dla kolejki \mathcal{X} o x elementach typu n na podstawie cyklogramu $v_{n,v}$. Przy czym kolejka \mathcal{X} ma postać:

$$\mathcal{X} = \{z_1, z_2, \dots, z_x\}, z_k = n \quad (2.52)$$

Długość harmonogramu S jest równa:

$$Y = (G(v_{n,v}) + x - 1) \cdot T(v_{n,v}) + \underline{t}(v_{n,v}, I^n) - \bar{t}(v_{n,v}, 0) \quad (2.53)$$

Harmonogram S otrzymuje się poprzez następujące podstawienia:

$$\forall t = 0, \dots, Y, \forall h = 1, \dots, H, U(h, t) = U(v_{n,v}, h, t \bmod (T(v_{n,v}))) \quad (2.54)$$

W równaniu (2.54) zapisano przekształcenie wartości zmiennych decyzyjnych określających marszrutę dźwigów z cyklogramu $v_{n,v}$ do harmonogramu S . Podobnie można zrobić dla zmiennych określających interwały produkcji w poszczególnych etapach procesu technologicznego. Wprowadźmy funkcję pomocniczą, zliczającą liczbę przeniesień produktu między taktami:

$$\begin{aligned} \theta: \mathcal{Y}^n \times \mathcal{I}^n &\rightarrow \mathbb{N}_0 \\ \theta(v_{n,v}, i(n)) &= \sum_{a=1 \dots i(n)} \begin{cases} 1 - & \text{gdy } \bar{t}(v_{n,v}, a) \leq \underline{t}(v_{n,v}, a) \\ 0 - & \text{gdy } \bar{t}(v_{n,v}, a) > \underline{t}(v_{n,v}, a) \end{cases} \end{aligned} \quad (2.55)$$

Można wtedy wyznaczyć wartości zmiennych określających czasy podnoszenia i opuszczania produktów w poszczególnych etapach procesu technologicznego:

$$\begin{aligned} \forall k = 1, \dots, x, \forall i = 1, \dots, I^n, \\ \bar{t}_{k,i} &= \bar{t}(v_{n,v}, i) + (k + \theta(v_{n,v}, i)) \cdot T(v_{n,v}) \\ \underline{t}_{k,i} &= \underline{t}(v_{n,v}, i) + (k + \theta(v_{n,v}, i)) \cdot T(v_{n,v}) \\ a_{k,i} &= a(v_{n,v}, i, k) \end{aligned} \quad (2.56)$$

Należy zwrócić uwagę, że rozwijanie cyklogramu tworzy harmonogram, który spełnia wszystkie ograniczenia. W zadaniu harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień, harmonogram utworzony przy pomocy procedury rozwijania cyklogramów będzie nazywany harmonogramem cząstkowym. Nowe zamówienia są dzielone w odpowiedni sposób i dla

wydzielonych części tworzy się harmonogramy cząstkowe. Następnie dopasowuje się je w jeden harmonogram – wynik końcowy.

2.4. Podział zamówienia na segmenty

W poprzednim rozdziale została opisana generacja harmonogramu pracy systemu produkcyjnego dla jednego bądź wielu produktów tego samego typu. Nie jest to wystarczające do harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień. Kolejne zamówienia wpływające do systemu produkcyjnego mogą być różnych typów. Aby było możliwe użycie rozwijania cyklogramów, kolejka zamówionych produktów jest dzielona na ciągi produktów tego samego typu – segmenty. Po takim podziale można dla każdego segmentu z osobna wygenerować harmonogram cząstkowy. Opisane w następnych rozdziałach algorytmy adaptują harmonogramy powstałe z rozwinięcia cyklogramów poszczególnych segmentów w jeden wspólny harmonogram.

Oznaczmy Ξ jako operację segmentacji kolejki:

$$\Xi(\mathcal{L}) = \Xi(\delta(1), \dots, \delta(K_\delta)) = \{(s_1, u_1), \dots, (s_{SEG}, u_{SEG})\} \quad (2.57)$$

gdzie SEG jest liczbą segmentów w kolejce, $s_x \in \mathcal{M}$ oznacza rodzaj procesu technologicznego segmentu x , u_x liczbę produktów w segmencie x . Podział na segmenty wykonujemy jedynie dla nowych produktów kolejki. Podział na segmenty musi spełniać warunki:

$$\begin{aligned} \sum_{x=1, \dots, SEG} u_x &= K_\delta \\ suma(seg) &= \sum_{p=1, \dots, seg-1} u_p \\ \forall s = 1, \dots, SEG, \forall x, y \in \{suma(s) + 1, \dots, suma(s) + u_s\}, \delta(x) &= \delta(y) \end{aligned} \quad (2.58)$$

czyli wielkości segmentów sumują się do liczby nowych produktów w kolejce, oraz poszczególne produkty w segmencie powiązane są z tym samym procesem technologicznym.

Przykładowo, dla zamówienia $\{1, 1, 3, 4, 4, 4, 2, 2, 1\}$, operacja segmentacji $\Xi(1, 1, 3, 4, 4, 4, 2, 2, 1) = \{(1, 2), (3, 1), (4, 3), (2, 2), (1, 1)\}$, czyli zamówienie dziewięciu produktów czterech różnych typów tworzy pięć segmentów.

2.5. Wykorzystanie metod rozpoznawania do selekcji scenariusza

Dla każdego z segmentów nowego zamówienia generowany jest harmonogram cząstkowy, przy użyciu algorytmu rozwijania cyklogramów. Tak powstałe harmonogramy

częstkowe używa się do stworzenia końcowego harmonogramu – rozwiązania zadania harmonogramowania. Wykonuje się to poprzez dopasowywanie harmonogramów cząstkowych (rozdział 2.6). Każdy proces technologiczny może być wykonany przez system produkcyjny zgodnie z jednym z wielu scenariuszy, reprezentowanych przez różne cyklogramy. Każdy scenariusz ma indywidualne cechy, mające wpływ na sposób działania systemu produkcyjnego, tzn. ładowność $G(v_{n,v})$, długość taktu $T(v_{n,v})$ oraz wartości zmiennych decyzyjnych cyklicznego zadania harmonogramowania. W zależności od liczby produktów w segmencie, rodzaju poprzednich produktów, dostępności zasobów na linii wybrany scenariusz produkcji może zapewnić wartość kryterium bliższą optimum. Nie jest jednak w sposób jawny znana zależność, pozwalająca dopasować scenariusz tak, aby optymalizować kryterium.

W pracy [64] pokazano przykłady zachowania się systemu produkcyjnego dla różnych scenariuszy w zależności od kontekstu. Na podstawie obserwacji konkretnego systemu produkcyjnego można wysnuć wniosek, że dla pewnych sytuacji sprawdza się scenariusz A dla innych scenariusz B itd. Wybór scenariusza ma wpływ na przebieg algorytmu dopasowania segmentów harmonogramu w następnym kroku algorytmu harmonogramowania. Wynika to z tego, że w zależności od scenariusza liczba konfliktów zasobów systemu produkcyjnego jest różna. Różni się również długość harmonogramu cząstkowego dla danego segmentu. Rozwinięcie cyklogramu A można stworzyć harmonogram cząstkowy krótszy niż rozwinięcie cyklogramu B, ale może generować więcej konfliktów i w rezultacie dać gorszą wartość kryterium. O ile zadanie harmonogramowania można rozwiązać przy pomocy proponowanej metody przy użyciu jedynie jednego scenariusza, to użycie wielu scenariuszy pozwala na pokonanie małym kosztem ograniczeń, wiążących się z zastosowaniem rozwijania cyklogramów. Wykorzystanie metod rozpoznawania ma niewielki wpływ na złożoność obliczeniową procesu decyzyjnego. Jednocześnie pozwala na lokalną optymalizację w ramach podziału problemu na segmenty. W kolejnych podrozdziałach został opisany proces wyboru scenariusza dla danego segmentu.

Wykorzystanie scenariuszy pozwala na dostosowanie procesu decyzyjnego do konkretnej linii produkcyjnej. W konkretnym systemie produkcyjnym, produkcja ma swoją określoną charakterystykę, powtarzalność, która pozwala na ograniczenie pola decyzji.

2.5.1. Problem wyboru scenariusza

Aby wybrać scenariusz, który zapewni najlepszą wartość funkcji celu zadania harmonogramowania, można dla każdego dostępnego scenariusza z osobna wykonać kolejne kroki algorytmu – dopasowanie harmonogramu cząstkowego oraz marszrutowanie, i wybrać ten scenariusz, który jest najlepszy w danym kontekście. Jest to jednak bardzo pracochłonne. Problem

decyzyjny wybór scenariusza zostanie potraktowany, jako problem rozpoznawania. Rozpoznawanym obiektem jest stan procesu, tzn. stan linii oraz parametry segmentu w chwili wyboru scenariusza realizującego harmonogram cząstkowy dla segmentu. Zadaniem jest określenie przynależności stanu linii oraz parametrów segmentu do klasy. Klasami są scenariusze produkcji $v_{n,v} \in \mathcal{V}^n = \{v_{n,1}, v_{n,2}, \dots, v_{n,V^n}\}$. Określenie klasy oznacza wybór scenariusza, który będzie użyty do generacji harmonogramu cząstkowego dla danego segmentu. Harmonogram cząstkowy wykorzystany jest w kolejnych krokach algorytmu harmonogramowania, po dopasowaniu go (rozdział 2.6) stworzony zostaje harmonogram wynikowy dla kolejki produktów powiększonej o analizowany segment. Rozpoznanie jest prawidłowe, jeśli wybrany scenariusz minimalizuje wartość kryterium. Oznacza to, że wybór dowolnego innego scenariusza powoduje, że harmonogram wynikowy ma wyższą wartość kryterium.

Rozpoznawanie jest dodatkowo uzasadnione praktyką systemów ze zmiennym strumieniem zamówień. Zamówienia mają tendencję do powtarzania się, często zamawiane są w określonej proporcji, więc zamówienia i stany linii mogą być podobne do tych wyuczonych w ramach algorytmu rozpoznawania.

Dla każdego typu procesu technologicznego $n \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ należy zbudować klasyfikator realizujący odwzorowanie A (patrz rozdział 1.4). Oznaczmy, zatem A_n jako klasyfikator scenariuszy produkcji dla procesu technologicznego n . Indeks n będzie rozróżniał zadania rozpoznawania dla poszczególnych typów procesów technologicznych. Każdy z n klasyfikatorów ma własną liczbę klas, związaną z liczbą dostępnych scenariuszy V^n dla danego procesu technologicznego.

Relacja recepcji D_n jest tutaj odwzorowaniem reprezentującym wybrane miary stanu linii podczas wyboru scenariusza dla segmentu w postaci ciągu liczb. Przestrzeń cech opisująca stan linii oraz zamówienia jest opisana w tabeli 2.4.

Tabela 2.4 Opis przestrzeni cech \mathcal{X}_n opisujących rozpoznawany stan procesu

Cecha	Opis
$x_1 = u_{seg}$	Liczba produktów typu n w segmencie seg .
x_2, \dots, x_{H+1}	Współczynnik zużycia poszczególnych dźwigów w harmonogramie dotychczasowym. Współczynnik liczony jest, jako stosunek czasu, gdy dźwig jest zajęty do całego badanego okresu od ostatniego wprowadzenia produktu do końca trwania dotychczasowego harmonogramu.

Cecha	Opis
$x_{H+2}, \dots, x_{H+V^n+2}$	Długość segmentu (Υ) po rozwinięciu, dla poszczególnych scenariuszy.
$x_{H+V^n+3}, \dots, x_{H+V^n+L+3}$	Współczynnik zużycia poszczególnych stanowisk roboczych. Liczony jest, jako stosunek czasu przetwarzania w danym stanowisku do całego badanego okresu od ostatniego wprowadzenia produktu do końca trwania dotychczasowego harmonogramu.
$x_{H+V^n+L+4}, \dots, x_{H+V^n+2L+4}$	Ważony współczynnik zużycia poszczególnych stanowisk roboczych. Liczony jest, jako liniowo przeskalowany stosunek czasu przetwarzania w danym stanowisku do całego badanego okresu od ostatniego wprowadzenia produktu do końca trwania dotychczasowego harmonogramu. Im wcześniej przetwarzanie ma miejsce tym mniejszy ma wpływ na wartość współczynnika zużycia.

Pozostałe części algorytmu rozpoznawania są realizowane przez zastosowany algorytm rozpoznawania. W pracy stosowane są do porównania trzy algorytmy: sztuczna sieć neuronowa uczona algorytmem propagacji wstecznej, maszyna wektorów wspierających, elastyczny klasyfikator Bayesa [33] oraz klasyfikator złożony. Stosowany klasyfikator złożony opiera się na głosowaniu trzech pozostałych klasyfikatorów, gdzie zwycięża scenariusz wybrany przez większość.

2.5.2. Przygotowanie zbioru scenariuszy

Poszczególne cyklogramy różnią się od siebie wartościowaniem zmiennych decyzyjnych opisujących cyklogram. W związku z tym, że liczba różnych cyklogramów może być bardzo duża. O ile w zadaniu cyklicznego harmonogramowania jako kryterium oceny cyklogramów stosuje się minimalizację długości cyklu, to w harmonogramowaniu ze zmiennym strumieniem zamówień, poszczególne cyklogramy mogą być w różnym stopniu użyteczne. Nie wszystkie cyklogramy nadają się, jako scenariusze produkcji w pracy ze zmiennym strumieniem zamówień. Do zbioru \mathcal{V}^n wybierane są jedynie niektóre cyklogramy. Wybierane są jedynie takie, które z punktu widzenia harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień mogą minimalizować kryterium. Dobór cyklogramów jest w dużym stopniu oparty na doświadczeniu eksperckim i może się różnić w konkretnych zastosowaniach. Ze wszystkich dostępnych cyklogramów, jako scenariusze produkcji zostaną wybrane cyklogramy opisane w tabeli 2.5.

Tabela 2.5 Cyklogramy wybrane jako scenariusze produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień.

Cyklogram	Opis
O najmniejszej długości cyklu.	Jest to scenariusz, który jest najbardziej odpowiedni w przypadku bardzo długich segmentów, znacznie przekraczających liczebnością ładowność cyklogramów tego procesu technologicznego.
Dla każdej z ładowności osobna, cyklogram o najmniejszej długości cyklu.	W początkowym zbiorze cyklogramów mogą się znajdować harmonogramy o różnej ładowności. Każda w ramach danej ładowności harmonogram o najkrótszej długości cyklu może być kandydatem na scenariusz w przypadku segmentu o długości równej dokładnie ładowności tego cyklu.
Dla rosnących liczebności segmentu, cyklogram dający najkrótsze rozwinięcie.	Cyklogram dający najkrótsze w domenie czasu rozwinięcie dla segmentu o długości 1, 2, 3,...

Dla każdego procesu technologicznego buduje się osobny zbiór scenariuszy. Zbiór scenariuszy pozwala na skonstruowanie algorytmu rozpoznawania oraz na wygenerowanie odpowiedniego ciągu uczącego.

2.5.3. Przygotowanie ciągu uczącego

Dla każdego procesu technologicznego, który będzie wykonywany w systemie produkcyjnym musi być przygotowany klasyfikator A_k . Stosowane algorytmy rozpoznawania bazują na nadzorowanym uczeniu, więc przygotowuje się ciąg uczący. Ciąg uczący składa się z wygenerowanych przykładów, dla których oblicza się powiązaną klasę. Każdy przykład uczący jest składa się z zestawu cech opisujących rozpoznawany obiekt \mathcal{X}_n oraz powiązanej z obiektem klasy. Dobór odpowiedniego ciągu uczącego ma istotne znaczenie w problemach maszynowego uczenia [44].

Przykłady uczące tworzy się poprzez symulację działania systemu produkcyjnego. Dla ustalonych parametrów systemu produkcyjnego, dźwigów losuje się kolejne zamówienia różnych typów produktów. W przypadku, gdy dostępne są informacje dotyczące struktury zamówień, np. proporcji zamawianych produktów, minimalnej lub maksymalnej wielkości zamówień, etc. uwzględnia się te informacje podczas losowania. Oblicza się wartości cech, które opisują sytuację, dla której ma być podjęta decyzja odnośnie scenariusza. Dla nowego zamówienia kontynuuje się działanie algorytmu kolejno dla wszystkich scenariuszy. Jako klasę przypisaną uprzednio obliczonym wartościom cech przypisuje się numer tego scenariusza, dla którego wygenerowany harmonogram jest najkrótszy. W ten sposób tworzone są ciągi uczące dla wszystkich procesów technologicznych jednocześnie. Po wygenerowaniu odpowiedniej liczby

przykładów dla danego procesu technologicznego, część klas może nie mieć reprezentantów, lub mieć ich nieznaczną liczbę. Dokonuje się wtedy redukcji zbioru dostępnych scenariuszy. Usuwa się te scenariusze, których reprezentatywność w zbiorze uczącym jest poniżej pewnego progu. Jeśli liczba przykładów dla klasy ν jest mniejsza niż jedna setna liczby przykładów uczących klasy najliczniej reprezentowanej, scenariusz ν usuwany jest ze zbioru \mathcal{V}^n . Generowane są kolejne przykłady aż do uzyskania równej reprezentatywności pozostałych klas. Przy użyciu tak przygotowanego ciągu uczącego konstruowane są klasyfikatory dla wszystkich procesów technologicznych. W zależności od rodzaju klasyfikatora stosowany jest odpowiedni algorytm uczenia.

Tabela 2.6 zawiera opis parametrów używanych podczas tworzenia ciągu uczącego. Aby symulacja pracy systemu produkcyjnego była zbliżona do rzeczywistości stosuje się różne wielkości segmentów, liczby segmentów, czasy adaptacji. Kolejki są losowane dla różnych kombinacji tych parametrów.

Tabela 2.6 Parametry losowania przykładów uczących.

Parametr	Wartości	Opis
Wielkość zamówienia	Krótkie zamówienia	Od jednego produktu do połowy największej ładowności scenariuszy danego procesu technologicznego.
	Długie zamówienia	Od połowy największej ładowności scenariuszy danego procesu technologicznego do dwukrotności największej ładowności.
Liczba segmentów	Mało segmentów	Dotychczasowa kolejka produktów składa się z jednego do pięciu segmentów.
	Dużo segmentów	Dotychczasowa kolejka produktów składa się z sześciu i więcej segmentów.
Czas adaptacji	Znana cała kolejka	Czas adaptacji jest oddalony o długość całego dotychczasowego harmonogramu, stworzony harmonogram jest w niewielkim stopniu ograniczony pod względem dostępnego czasu harmonogramowania.
	Czas przetwarzania ostatniego produktu	Czas adaptacji jest ustalony w momencie wprowadzenia ostatniego produktu do systemu ostatniego produktu z dotychczasowej kolejki.
	Połowa czasu przetwarzania ostatniego produktu	Czas adaptacji jest ustalony w połowie czasu przetwarzania ostatniego produktu z dotychczasowej kolejki.

W celu wygenerowania ciągu uczącego, tworzone są instancje zadania harmonogramowania. Każda instancja składa się z dotychczasowej produkcji, tzn. pewnej liczbie już przetworzonych oraz przetwarzanych produktów, których liczbę determinuje parametr „Liczba segmentów”. Dodatkowo, instancja zadania harmonogramowania determinowana jest poprzez wielkość zamówienia oraz czas nowego zamówienia, które określane są przez pozostałe parametry z tabeli 2.6. Instancje tworzone są w sposób losowy, przy rozkładzie jednorodnym. Dla każdej kombinacji parametrów, tworzy się pewną liczbę instancji kwadratowo zależną od liczby zdefiniowanych procesów technologicznych tak, aby w wygenerowanym zbiorze znajdowały się przykłady zmiany typu produktu z każdego w każdy. Dla każdej tak stworzonej instancji przygotowuje się harmonogram dotychczasowej produkcji, przy użyciu opisanej metody. Z zastrzeżeniem, że zawsze wykorzystuje się scenariusze o najkrótszej długości cyklu. Następnie dla każdej instancji, wyznaczany jest scenariusz minimalizujący wartość kryterium. Odbywa się to poprzez sprawdzenie wartości kryterium dla każdego scenariusza ze zbioru. Wartość kryterium oblicza się poprzez użycie opisywanej metody harmonogramowania. Z zastrzeżeniem, że w kroku wyboru scenariusza wybierany jest scenariusz, dla którego obliczana jest wartość kryterium. Gdy wybrany został scenariusz ξ minimalizujący wartość kryterium, do ciągu uczącego dodawany jest element $\langle \underline{x}^w, i^w = \xi \rangle$, gdzie \underline{x}^w jest wektorem cech, obliczonych dla danej instancji zgodnie z opisem w tabeli 2.4. Ciąg uczący można również utworzyć na podstawie rzeczywistych przebiegów systemu produkcyjnego, jednak jest to żmudny i długotrwały proces.

Klasyfikatory są przygotowywane przed produkcją i ich przygotowanie nie ma wpływu na algorytm rozwiązujący zadanie harmonogramowania. Podczas pracy w czasie rzeczywistym podczas wyboru scenariusza oblicza się cechy opisujące stan systemu produkcyjnego oraz opisujące zamówienie, a następnie wyznacza się scenariusz przy użyciu klasyfikatora. Wybrany scenariusz jest używany do budowy harmonogramu cząstkowego przy użyciu algorytmu rozwijania cyklogramów. W kolejnym kroku harmonogram cząstkowy jest dopasowywany do dotychczasowego.

2.6. Dopasowanie segmentów harmonogramu

Dla każdego segmentu kolejki produktów, można wygenerować harmonogram cząstkowy przy użyciu odpowiedniego scenariusza. Harmonogramy cząstkowe można wykorzystać do budowy harmonogramu dla całej kolejki. W tym celu harmonogramy cząstkowe będą przesuwane w czasie w celu dopasowania ich do siebie. Przesuwanie harmonogramu będzie oznaczane, jako Ψ :

$$\Psi : S \times T \rightarrow S$$

$$\Psi(S, \tau) = \begin{cases} h_{k,i}, a_{k,i} \text{ pozostają bez zmian,} \\ U(h, \tau) \doteq \begin{cases} U(h, t - \Delta), t - \tau > 0 \\ U(h, 0), t - \tau \leq 0 \end{cases} \text{ dla } 1 \leq \tau \leq M, 1 \leq h \leq H, \\ \underline{t}_{k,i} \doteq \underline{t}_{k,i} + \tau \text{ dla } 1 \leq k \leq Z, 2 \leq i \leq I^{z(k)}, \\ \bar{t}_{k,i} \doteq \bar{t}_{k,i} + \tau \text{ dla } 1 \leq k \leq Z, 1 \leq i \leq I^{z(k)} - 1 \end{cases} \quad (2.59)$$

czyli przesunięcie harmonogramu S o τ sekund zmienia jedynie wartościowanie położenia dźwignów oraz czasy rozpoczęcia i zakończenia etapów procesu technologicznego.

Przesuwanie harmonogramów jest operacją, która w kontekście jednego segmentu nie wpływa na spełnianie ograniczeń nałożonych na rozwiązanie. Jednakże przesuwanie harmonogramów odbywa się w kontekście innych części harmonogramu. Procedura dopasowywania harmonogramów cząstkowych, znajduje odpowiednią wartość przesunięcia $\tau_{seg}, seg = 1, \dots, SEG$ dla kolejnych segmentów nowego zamówienia. Pierwszy segment dopasowywany jest do dotychczasowego harmonogramu. Gdy harmonogram cząstkowy pierwszego segmentu zostanie dopasowany, do następnej iteracji jako dotychczasowy harmonogram przechodzi dopasowany harmonogram, zawierający produkty dotychczasowe jak i te z pierwszego segmentu. Kolejne iteracje wyglądają podobnie. Harmonogram z poprzedniej iteracji, dopasowywany jest z harmonogramem cząstkowym kolejnego segmentu.

Harmonogram dotychczasowy S oraz harmonogram cząstkowy S' są dopasowane poprzez ustalenie przesunięcia Δ_{seg} takiego, że połączony harmonogram $S \cup S'$ spełnia ograniczenia nałożone na poprawny harmonogram. Połączone harmonogramy uwzględniają produkty zarówno z harmonogramu dotychczasowego S oraz dopasowywanego S' . Istota proponowanego algorytmu harmonogramowania opiera się na własności operacji przesuwania harmonogramu oraz własnościach harmonogramów cząstkowych. Harmonogramy cząstkowe spełniają wszystkie ograniczenia. Operacja przesuwania harmonogramu może złamać jedynie ograniczenia (2.17), (2.19), (2.20), (2.27), (2.29), (2.32), (2.33) oraz (2.34). Pozostałe ograniczenia nie mogą zostać

złamane, bo operacja przesuwania nie zmienia wartości zmiennych decyzyjnych powiązanych z tymi ograniczeniami, lub zmienia jednocześnie kilka zmiennych tak, że nie ma to wpływu na ograniczenia. Wymienione ograniczenia dotyczą ograniczeń związanych z kolizjami dźwigów oraz ograniczeniem liczby jednocześnie obsługiwanych produktów przez dźwigi oraz stanowiska. Oprócz tego, ograniczenia mogą być złamane jedynie dla niektórych produktów. Dotyczy to jedynie okresu, w którym operacje harmonogramów nachodzą na siebie, czyli okres między pierwszym podniesieniem produktu w S' a ostatnim opuszczeniem w S . Ograniczenia związane ze zmiennymi opisującymi zdarzenia spoza tego obszaru są również spełnione, ponieważ zostały wartościowane podczas rozwijania cyklogramu.

Procedura dopasowywania harmonogramów ustala zbiór dopuszczalnych przesunięć τ_{seg} , a następnie dla każdego z nich bada, czy można ułożyć bezkolizyjną marszrutę dźwigów (patrz rozdział 2.7). Znalezienie bezkolizyjnej marszruty kończy działanie algorytmu. Zbiór dopuszczalnych przesunięć zawiera takie τ_{seg} , dla których ograniczenia (2.17), (2.27), (2.29), (2.32), (2.33) oraz (2.34) są spełnione.

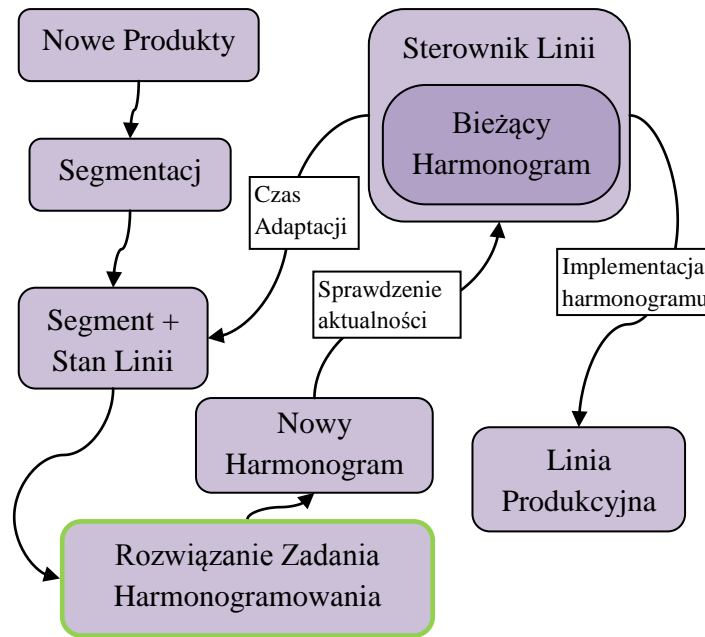
Harmonogram cząstkowy ustala wartościowanie zmiennych alokujących zasoby $h_{k,i(z(k))}$ oraz $a_{k,i(z(k))}$ dla produktów powiązanych z segmentem ($k = K_d + suma(seg), \dots, K_d + suma(seg) + u_{seg}$). Operacja przesuwania powoduje, że zmienne opisujące interwały produkcyjne są sprzężone z τ_{seg} . Ustalenie wartości przesunięcia, powoduje ustalenie wartościowania $\bar{t}_{k,i(z(k))}$, $\underline{t}_{k,i(z(k))}$. Pozostaje jedynie ustalić wartościowanie zmiennych decyzyjnych opisujących marszrutę dźwigów.

Aby wyznaczyć dopuszczalne τ_{seg} można sprawdzić czy ograniczenia (2.17), (2.27), (2.29), (2.32), (2.33) oraz (2.34) są spełnione dla $\tau_{seg} = 0, \dots, M$. Jest to jednak pracochłonne, więc można nałożyć ograniczenia na dziedzinę, korzystając z faktu, że na wartościowanie części zmiennych decyzyjnych procedura przesuwania nie ma wpływu. Nierówność (2.17) ogranicza wartość τ_{seg} od dołu: $\tau_{seg} > \bar{t}_{Z_s + suma(seg) - 1, 1}$, czyli przesunięcie musi być większe od czasu podniesienia ostatniego produktu z dotychczasowego harmonogramu. Dzięki temu harmonogram spełnia własność, że produkty wprowadzane są do systemu produkcyjnego w odpowiedniej kolejności. Kolejne ograniczenie z dołu wprowadza czas adaptacji oraz wymaganie, że nowy harmonogram musi być zgodny z dotychczasowym aż do pewnego ustalonego czasu. Po nałożeniu ograniczeń (2.33) oraz (2.34) otrzymujemy, że $\tau_{seg} \geq t + \Delta$. Można również ograniczyć przestrzeń poszukiwań przesunięć

harmonogramu cząstkowego z góry: $\tau_{seg} \leq t_{x,I^{(x)}} + \varepsilon, x = K_d + suma(seg) - 1$, czyli przesunięcie musi być, co najwyżej równe czasowi opuszczenia systemu produkcyjnego przez ostatni produkt dotychczasowego harmonogramu, powiększonemu o pewną stałą wartość ε . Wartość ε jest to czas potrzebny dźwigom na osiągnięcie dowolnej pozycji w systemie produkcyjnym, niezależnie od położenia. Górne ograniczenia na wartość przesunięcia wynika z faktu, że powyżej określonej granicy dopasowywane harmonogramy nie mają części wspólnej w domenie czasu, a co za tym idzie, zasoby używane przez te harmonogramy nie mogą kolidować. Na potrzeby systemu czasu rzeczywistego można na żądanie skrócić procedurę dopasowywania i w jednym kroku wybrać górne ograniczenie przesunięć i dzięki temu uniknąć dezaktualizacji generowanego harmonogramu, wyznaczania nowego czasu adaptacji i kolejnej iteracji zadania harmonogramowania. Oprócz górnego i dolnego ograniczenia na dopuszczalne przesunięcia, po nałożeniu ograniczeń (2.27) oraz (2.29) na dziedzinę przesunięć pozostają do sprawdzenia jedynie takie τ_{seg} , dla których dopasowany harmonogram $S \cup \Psi\left(C\left(v_{s_{seg},v}, u_{seg}\right), \tau_{seg}\right)$ spełnia ograniczenia (2.17), (2.27), (2.29), (2.32), (2.33) oraz (2.34). Wartość τ_{seg} ma bezpośredni wpływ na wartość kryterium. Im mniejsze τ_{seg} tym lepszy harmonogram. Zbiór dopuszczalnych przesunięć jest przeszukiwany od najmniejszej dopuszczalnej wartości do pierwszej, dla której można ułożyć bezkolizyjną marszrutę.

Jeśli zdarzy się tak, że ostatni produkt w ramach dotychczasowego harmonogramu jest tego samego typu co produkt pierwszego segmentu, to zamiast dopasowywania harmonogramu, poprzez przesuwanie i układanie marszrut, harmonogram buduje się poprzez kontynuację produkcji przy użyciu cyklogramu z poprzedniego segmentu.

Segmentacja oraz dopasowanie harmonogramów segment po segmencie pozwala na podział nowego zamówienia na części. Jest to wykorzystywane w systemie harmonogramowania. Pozwala to na uniezależnienie czasu odpowiedzi od wielkości nowego zamówienia. Każde nowe zamówienie jest dzielone na segmenty. Każdy segment jest traktowany jak osobne zamówienie z własnym czasem adaptacji. Po dopasowaniu jednego segmentu, harmonogram produkcji linii jest implementowany a system harmonogramowania przechodzi do kolejnego segmentu. Dzięki temu czas harmonogramowania nie zależy od liczby segmentów nowego zamówienia. Każdy ukończony segment wydłuża bieżący harmonogram o część związaną z nowymi produktami z tego segmentu. To przesuwają horyzont czasowy harmonogramu w przyszłość. Rysunek 2.2 przedstawia diagram przedstawiający działanie systemu harmonogramowania w czasie rzeczywistym po uwzględnieniu segmentacji.



Rysunek 2.2 System harmonogramowania z uwzględnieniem segmentacji

Gdy wartość τ_{seg} zostanie ustalona, wszystkie zmienne decyzyjne z wyjątkiem położenia dźwigów mają ustalone wartości oraz spełniają wszystkie ograniczenia, z wyjątkiem (2.19), (2.20). Wartościowanie zmiennych $U(h, t)$ odbywa się zgodnie z algorytmem układania marszrut dźwigów opisanym w rozdziale 2.7.

2.7. Układanie bezkolizyjnej marszrut dźwigów

Kolejnym etapem układania harmonogramu jest układanie marszrut dźwigów (*ang. routing*). Z problemem układania marszrut mamy do czynienia, gdy dla zadanego wartościowania zmiennych decyzyjnych związanych z interwałami produkcyjnymi i alokacją zasobów należy wyznaczyć dowolne wartościowanie zmiennych decyzyjnych dotyczących położenia dźwigów, które spełnia ograniczenia lub zapewnić, że takie wartościowanie nie istnieje. Oznacza to, że dla zadanych wartości $\bar{t}_{k,i(z(k))}$, $\underline{t}_{k,i(z(k))}$, $h_{k,i(z(k))}$ oraz $a_{k,i(z(k))}$ należy ustalić wartości zmiennych $U(h, t)$ tak, aby nie łamały ograniczeń, lub określić, że dla danych parametrów rozwiązanie nie istnieje. Zakładamy, że podane zmienne spełniają ograniczenia.

W poprzednich etapach algorytmu harmonogramowania, ustalone zostały wymagane wartości zmiennych decyzyjnych, czy to podczas wyboru odpowiedniego scenariusza $(h_{k,i(z(k))}, a_{k,i(z(k))})$, lub dopasowania segmentów $(\bar{t}_{k,i(z(k))}, \underline{t}_{k,i(z(k))})$. Pozostaje, zatem problem ułożenia bezkolizyjnej marszrut dźwigów. Taki podział problemu jest celowy i ma na celu redukcję złożoności

problemu. Z jednej strony układanie marszruty nie gwarantuje znalezienia rozwiązania optymalnego, bo może być ono już poza zasięgiem ze względu na wartościowanie pozostałych zmiennych decyzyjnych. Z drugiej strony, sama marszruta dźwigów nie ma w tym momencie bezpośredniego wpływu na wartość funkcji celu. Dzięki temu nie mamy już więcej do czynienia z problemem optymalizacji, gdzie należy znaleźć wartościowanie zmiennych optymalizując wartość funkcji celu, a z problemem poszukiwania, gdzie dowolne poprawne rozwiązanie kończy działanie algorytmu. Pozwala to na opracowanie heurystyki bazującej na strukturze ograniczeń, która w sposób wstępujący utworzy marszrutę o ile taka istnieje.

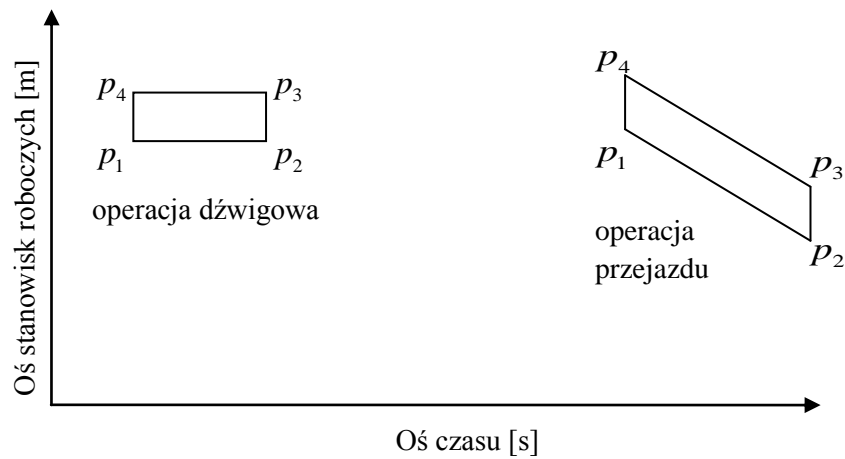
Układanie marszrut dźwigów zostanie zaprezentowane dla uproszczonego modelu ruchu dźwigów. Można jednak stosować ten sam algorytm, dla innej reprezentacji czasoprzestrzennej położenia dźwigów.

2.7.1. Detekcja kolizji

Przy założeniu, że rozpatrujemy uproszczony model ruchu dźwigów, gdzie dźwigi poruszają się ruchem jednostajnym, każda marszruta może być przedstawiona, jako zbiór figur w dwuwymiarowej przestrzeni, nazywanej przestrzenią kolizyjną. Jeden wymiar to położenie dźwigu w osi stanowisk roboczych, drugi to czas. Marszruta dźwigu składa się z ciągu operacji elementarnych – przejazdów, oraz operacji dźwigowych, tzn. podnoszenia i opuszczania. W przestrzeni kolizyjnej, operacje przejazdu są równoległobokami, natomiast operacje podnoszenia i opuszczania są prostokątami. Dla wygody zapisu bez ułamków, zakładamy, że pozycje wszystkich stanowisk roboczych $P_{l,g}$ są przesunięte o $b/2$ w stosunku do rzeczywistych położenia stanowisk na linii.

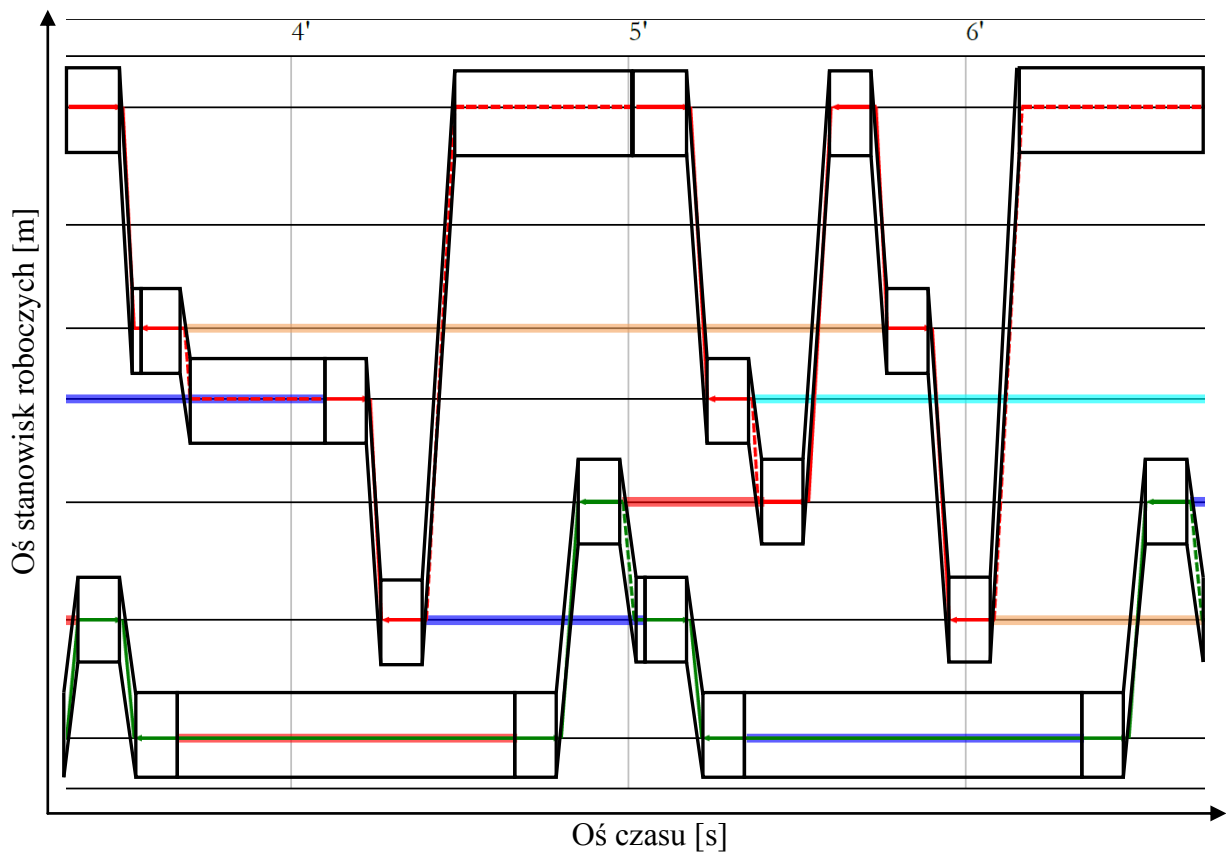
Rysunek 2.3 przedstawia w sposób graficzny operacje wchodzące w skład marszrut dźwigów.

Dowolna operacja przejazdu dla dźwigu $h: p_1 \langle t_{początek}, x+b \rangle, p_2 \langle t_{koniec}, y+b \rangle, p_3 \langle t_{koniec}, y \rangle, p_4 \langle t_{początek}, x \rangle$ rozpoczyna się w czasie $t_{początek}$ w pozycji $x = U(h, t_{początek})$, a kończy w czasie t_{koniec} w pozycji $y = U(h, t_{koniec})$. Operacja dźwigowa dla i -tego kroku n -tego produktu jest określona dla opuszczania: $p_1 \langle t - \underline{t}_{n,i}, P_{l,y} + b \rangle, p_2 \langle t, P_{l,y} + b \rangle, p_3 \langle t, P_{l,y} \rangle, p_4 \langle t - \underline{t}_{n,i}, P_{l,y} \rangle$, gdzie $t = \underline{t}_{n,i}$, $l = o_i$, $y = a_{n,i}$. Dla operacji podnoszenia punkty definiujące figurę w przestrzeni kolizyjnej to: $p_1 \langle t, P_{l,y} + b \rangle, p_2 \langle t + \bar{t}_{n,i}, P_{l,y} + b \rangle, p_3 \langle t + \bar{t}_{n,i}, P_{l,y} \rangle, p_4 \langle t, P_{l,y} \rangle$, gdzie $t = \bar{t}_{n,i}$, $l = p_i$, $y = a_{n,i}$.



Rysunek 2.3 Figury reprezentujące operacje dźwigi w przestrzeni kolizyjnej

Aby sprawdzić, czy dwa dowolne dźwigi kolidują w trakcie produkcji przy użyciu harmonogramu, należy sprawdzić czy ich marszruty mają w przestrzeni kolizyjnej punkty przecięcia. Jeśli nie ma punktów przecięcia, dźwigi nie kolidują. Rysunek 2.4 przedstawia marszruty dwóch dźwigi nałożone na harmonogram. Na rysunku figury nie przecinają się w żadnym miejscu, więc harmonogram nie doprowadza do kolizji. Wysokość figur reprezentuje szerokość strefy kolizyjnej dźwigu.



Rysunek 2.4 Wycinek harmonogramu z oznaczonymi strefami kolizyjnymi

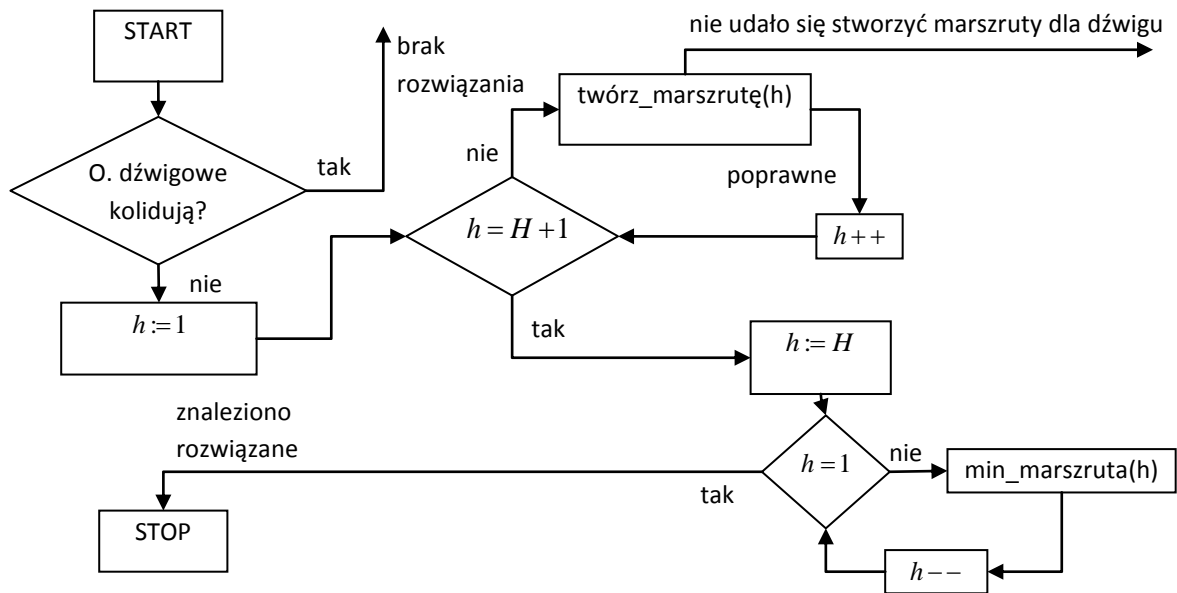
Aby sprawdzić czy kolizje dla wszystkich dźwigów, należy sprawdzić jedynie każdy dźwig z następnym (z wyjątkiem ostatniego), przy czym każdą kolumnę traktujemy osobno. Sprawdzanie kolizji można przerwać na pierwszym napotkanym przecięciu. Sprawdzenie przecinania się figur jest uproszczonym, bo uwzględniającym model ruchu, sprawdzeniem ograniczeń (2.19) oraz (2.20).

Wraz z ograniczeniami (2.25) oraz (2.26) część marszruty jest określona już na początku układania marszrut dźwigów. Wszystkie operacje dźwigowe są określone dla wszystkich podniesień i opuszczeń, zgodnie z wyliczeniami na podstawie przekazanych parametrów alokacji i interwałów produkcyjnych. Podczas układania marszrut dźwigów nie mamy wpływu na położenia przestrzenne operacji dźwigowych, dlatego brak kolizji tych operacji w czasie jest warunkiem koniecznym istnienia bezkolizyjnej marszruty.

2.7.2. Schemat układania marszrut dźwigów

Algorytm układania marszrut dźwigów wykonuje dwie iteracje dla wszystkich dźwigów, osobno dla każdej z kolumn. Pierwsza iteracja ma na celu maksymalizację dostępnego miejsca dla następnego dźwigu przy zachowaniu poprawności marszruty. Druga iteracja ma na celu kolejne przetworzenie marszruty (*ang. post processing*), aby zrealizować drugorzędny cel układania tras – minimalizację długości trasy dźwigu. Druga iteracja jest opcjonalna, jeżeli po pierwszej iteracji znaleziono poprawną marszrutę to minimalizacja długości trasy nie może doprowadzić do złamania ograniczeń marszruty.

Na rysunku 2.5 zaprezentowano schemat blokowy głównej części algorytmu generacji tras dźwigów. Procedura rozpoczyna się od sprawdzenia czy operacje dźwigowe nie powodują kolizji. Następnie dla kolejnych dźwigów układa się trasę w taki sposób, aby maksymalizować wolne miejsce dla następnego sąsiedniego dźwigu. Wykonuje się to poprzez zjazd pierwszego w kolumnie dźwigu do skrajnego stanowiska w kolumnie w czasie pomiędzy kolejnymi operacjami dźwigowymi. Natomiast kolejne dźwigi przemieszczają się tak, aby znajdować się w bezpiecznej odległości od poprzedzającego ich dźwigu ale jednocześnie być jak najbliżej tego dźwigu. Dźwig naśladuje ruchy poprzedzającego go dźwigu nie kolidując z nim. W ten sposób kolejne dźwigi mają pozostawione maksymalne pole do przejazdów. Gdy trasy zostaną ułożone dla wszystkich dźwigów rozpoczyna się druga iteracja, tym razem od ostatniego dźwigu. Trasy są modyfikowane tak, aby zminimalizować długość pokonywanego dystansu.



Rysunek 2.5 Zarys algorytmu układania marszrut

W związku z tym, że na operacje dźwigowe nałożone są ograniczenia, które w sposób jednoznaczny wyznaczają położenie oraz czas tych operacji, marszrutowanie sprowadza się do wartościowania $U(h, t)$ dla interwałów t w czasie pomiędzy dwoma operacjami dźwigowymi. Interesujące są dwa rodzaje interwałów: przejazdy załadowanego dźwigu oraz niezaladowanego dźwigu. Przejazdy załadowanego dźwigu mają miejsce dla każdego etapu i procesu technologicznego między czasem $\bar{t}_{k,i} + \bar{t}_{z(k),i}$ a $\underline{t}_{k,i+1} - \underline{t}_{z(k),i+1}$. Podobnie, dla przejazdów rozładowanego dźwigu należy dokonać wartościowania $U(h, t)$ między czasem $\underline{t}_{k,i}$ a $\bar{j}_{k,i}$, gdzie:

$$j_{k,i} = \min_{\substack{a=1, \dots, Z \\ b=1, \dots, I^{(a)}}} \left(\bar{t}_{a,b} : a = k \Rightarrow b > i, h_{k,b} = h_{k,i}, a \neq k \Rightarrow h_{a,b} = h_{k,i}, \bar{t}_{a,b} > \bar{t}_{k,i} \right) \quad (2.60)$$

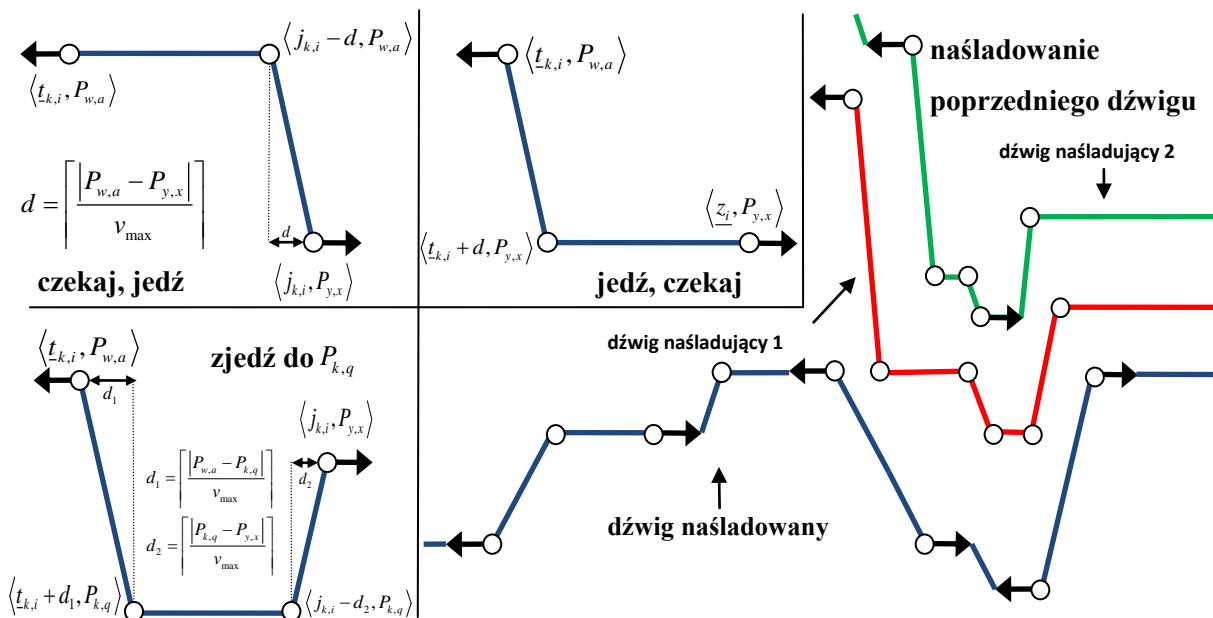
oznacza czas rozpoczęcia kolejnego podnoszenia danego dźwigu. Dla każdego z tych interwałów stosuje się kilka strategii układania tras, aby stworzyć pewną liczbę operacji przejazdu dźwigów, które ustalą wartościowanie $U(h, t)$.

2.7.3. Strategie układania tras

Na rysunku 2.6 zaprezentowano strategię tworzenia operacji transportowych, wykorzystywanych podczas tworzenia marszrut. Strategia „czekaj, jedź” powoduje, że dźwig czeka w pozycji, w której wykonał ostatnią operację dźwigową tak długo jak to możliwe a następnie zmienia pozycję na położenie wyznaczone przez następną operację dźwigową. Analogicznie, strategia „jedź, czekaj” powoduje, że dźwig ustawia się w pozycji docelowej, a następnie czeka w bezruchu do następnej operacji dźwigowej. Strategia „zjedź do $P_{k,q}$ ”

powoduje, że dźwig z maksymalną prędkością zmienia pozycję do pewnego stanowiska q w grupie k , czeka w tej pozycji a następnie zmienia pozycję na docelową. Podczas pierwszej iteracji algorytmu, pierwszy dźwig w kolumnie zjeżdża zawsze do brzegowego stanowiska, jeśli prędkość dźwigu jest zbyt mała, znajdowane jest jak najbliższe brzegowemu stanowisku k oraz q takie, że $d_1 + d_2 \leq j_{k,i} - t_{k,i}$. Jeżeli, nie można zastosować, żadnej ze strategii (np. dlatego, że prędkość dźwigu jest zbyt niska) algorytm zostaje przerwany i poszukiwane jest rozwiązanie o innych interwałach produkcyjnych, czy alokacjach.

Naśladowanie poprzedniego dźwigu, łączy pozostałe strategie przy założeniu, że pozycja stanowiska, do którego dźwig ma jechać zmienia się w czasie, zgodnie z pozycją innego dźwigu. Marszruta podzielona jest na odcinki o różnych pozycjach, wyznaczanych na podstawie zachowania poprzedniego dźwigu.



Rysunek 2.6 Strategie marszrut

Wymienione strategie mogą być stosowane zarówno podczas tworzenia trasy jak i minimalizacji długości przejazdów dźwigu. Inne są jedynie priorytety stosowania. Priorytety te zaprezentowano w tabeli 2.7.

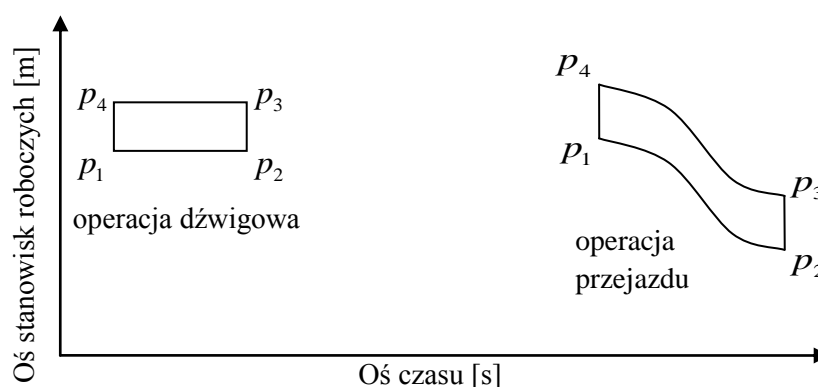
Tabela 2.7 Priorytety strategii układania marszrut

Tworzenie tras	Wysoki priorytet	Średni priorytet	Niski priorytet
Pierwszy dźwig	Zjazd do stanowiska brzegowego.	Czekaj, jedź; Jedź, czekaj	Naśladowanie poprzedniego dźwigu.

Kolejne dźwigi	Naśladowanie poprzedniego dźwigu.	Znaleźć $P_{k,q}$ będące w centrum obsługiwanych przez dźwig stanowisk. Zjedź do $P_{k,q}$.	Czekaj, jedź; Jedź, czekaj.
----------------	-----------------------------------	---	-----------------------------

Minimalizacja tras	Wysoki priorytet	Średni priorytet	Niski priorytet
Dowolny dźwig	Czekaj, jedź; Jedź, czekaj.	Znaleźć $P_{k,q}$ będące w centrum obsługiwanych przez dźwig stanowisk. Zjedź do $P_{k,q}$.	Naśladowanie poprzedniego dźwigu. Jeśli się nie powiedzie, zastosować dla podzbiorów operacji przejazdów z bieżącej trasy.

Zaprezentowany algorytm układania marszrut jest na tyle uniwersalny, że może być stosowany niezależnie od modelu ruchu. W uproszczonym modelu ruchu mamy do czynienia z czworobokami wyznaczającymi położenie dźwigów w czasoprzestrzeni. Można jednak zastosować inny model, np. na rysunku 2.7 zaprezentowano figury, które aproksymują położenie dźwigu w modelu z przyspieszeniem. Sprawdzenie przecinania się figur staje się kłopotliwe obliczeniowo, jednak algorytm marszrutowania pozostaje ten sam.



Rysunek 2.7 Figury reprezentujące operacje dźwigu w przestrzeni kolizyjnej dla modelu ruchu z przyspieszeniem

2.8. Schemat algorytmu harmonogramowania

Opisane w poprzednich rozdziałach algorytmy stanowią część algorytmu harmonogramowania, który służy do rozwiązywania zadania harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień. W niniejszym rozdziale zostanie zbiorczo przedstawiony algorytm, który

dla zadanej kolejki zadań, parametrów, dotychczasowego harmonogramu oraz ustalonego czasu adaptacji znajduje harmonogram bazując na harmonogramach cząstkowych.

Do działania algorytmu muszą być spełnione wszystkie ograniczenia pierwszego typu opisane w rozdziale 2.2.4, musi być dostępny niepusty zbiór scenariuszy dla każdego procesu technologicznego oraz klasyfikator A_n realizujący zadanie rozpoznawania opisane w rozdziale 2.5.

2.8.1. Pseudokod algorytmu harmonogramowania

Harmonogramowanie z selekcją scenariuszy

- 1) Oblicz segmenty Ξ dla kolejki \mathcal{X}
- 2) Wynik = DOTYCHCZASOWY HARMONOGRAM
- 3) dla $x = 1$ do SEG
 - 3a) Wybierz scenariusz $v_{s_x,v}$ przy użyciu A_k i cech obliczonych na podstawie dotychczasowego harmonogramu. Jeśli klasyfikacja jest niejednoznaczna wybierz arbitralne $v_{s_x,v}$ ze zbioru scenariuszy \mathcal{Y}^n
 - 3b) Oblicz $S(x) = C(v_{s_x,v}, u_x)$.
 - 3c) Znajdź najmniejsze τ_x takie, że ograniczenia są spełnione oraz istnieje bezkolizyjna marszruta dla $\text{Wynik} \cup \Psi(S(x), \tau_x)$.
 - 3d) Wynik = $\text{Wynik} \cup \Psi(S(x), \tau_x)$

Algorytm harmonogramowania jest częścią systemu harmonogramowania. Kolejne iteracje pętli algorytmu (krok 3) aktualizują harmonogram systemu produkcyjnego. W sytuacji gdy pojawi się nowe zamówienie wykonywany jest krok 1, czyli podział zamówienia na segmenty produktów tego samego typu. System harmonogramowania wyznacza czas adaptacji dla kolejnych segmentów. Na podstawie stanu systemu produkcyjnego wybierany jest scenariusz produkcji (krok 3a), z którego tworzony jest harmonogram cząstkowy (krok 3b). Następnie harmonogram cząstkowy dopasowywany jest do dotychczasowego harmonogramu, tak aby spełnione były ograniczenia z wyjątkiem ograniczeń dotyczących marszrut. Dla każdego przesunięcia, które spełnia te ograniczenia następuje próba ułożenia bezkolizyjnych marszrut dźwigów (krok 3c). Gdy bezkolizyjna marszruta zostanie znaleziona harmonogram pracy systemu produkcyjnego jest aktualizowany, o ile harmonogramowanie nie trwało zbyt długo, aby naruszyć ograniczenie czasu adaptacji (krok 3d). Jeśli harmonogram można zaimplementować, system analizuje kolejny segment. W przeciwnym wypadku wyznaczany jest nowy czas adaptacji i algorytm wraca do kroku 3a.

W kroku 3a dopuszcza się możliwość niejednoznacznej klasyfikacji pewnego obiektu x . Taka sytuacja może mieć miejsce, gdy podczas konstruowania ciągu uczącego nie uwzględniono

pewnej sytuacji. W implementacji systemu harmonogramowania stosowano zasadę, że w takim przypadku wybierano scenariusz, dla którego harmonogram cząstkowy był najkrótszy. Można rozważyć zastosowanie algorytmu realizującego zadanie rozpoznawania o charakterze przyrostowym, który pozwala na douczanie klasyfikatora w takich sytuacjach.

2.9. Analiza złożoności algorytmu harmonogramowania

W niniejszym rozdziale zostanie przeprowadzone oszacowanie złożoności obliczeniowej algorytmu harmonogramowania. Będzie ono dotyczyło części systemu harmonogramowania, odpowiedzialnej za rozwiązanie zadania harmonogramowania dla jednego segmentu. Odpowiada to krokom 3a–3d w pseudokodzie algorytmu z rozdziału 2.8. Jest to, bowiem kluczowa część systemu z punktu widzenia pracy w czasie rzeczywistym. Rozwiązanie zadania harmonogramowania dla segmentu dokonuje uaktualnienia harmonogramu, który jest następnie wdrażany do systemu produkcyjnego. Implementacja nowego harmonogramu jest równoznaczna z poprawną synchronizacją systemu harmonogramowania ze środowiskiem i jest warunkiem poprawnego działania systemu czasu rzeczywistego. O ile nowe zamówienie może składać się z wielu segmentów, to system harmonogramowania odpowiada na tego typu zdarzenie serią odpowiedzi. Nie wpływa to negatywnie na zachowanie środowiska, ze względu na sekwencyjny charakter harmonogramu sterującego systemem produkcyjnym.

Do oszacowania złożoności obliczeniowej będzie stosowana notacja O oraz parametry określające wielkość problemu. Praca [39] zawiera przegląd złożoności obliczeniowej wielu podobnych problemów harmonogramowania. Użyte parametry opisane są w tabeli 2.8.

Tabela 2.8 Opis parametrów związanych z wielkością problemu.

Cecha	Opis
I	Maksimum z liczby etapów procesów technologicznych, obliczona ze wszystkich procesów technologicznych.
H	Liczba dźwigów dostępnych w systemie produkcyjnym.
L	Liczba stanowisk dostępnych w systemie produkcyjnym.
G	Maksymalna ładowność dostępnych cyklogramów.
Z	Wielkość nowego zamówienia, liczba nowo zamówionych produktów. W brzegowych sytuacjach oznacza to Z segmentów lub jeden segment o Z elementach.
\mathcal{T}	Dyskretyzowany do 1 sekundy interwał czasu, liczony od czasu wprowadzenia ostatniego produktu z dotychczasowego harmonogramu do czasu opuszczenia systemu produkcyjnego przez ten produkt.

\mathcal{T} może być z góry oszacowane w dwojaki sposób. Z jednej strony, przetwarzanie może trwać maksymalnie sumę czasów maksymalnych etapów procesu technologicznego, powiększony o sumę czasów trwania podniesień i opuszczeń, powiększony o pewną liczbę przejazdów dźwigów. Z drugiej strony można obliczyć czas przetwarzania na podstawie różnych scenariuszy. Dla danego systemu produkcyjnego można obliczyć oba ograniczenia na podstawie jedynie parametrów systemu produkcyjnego. \mathcal{T} jest zależna de facto od definicji procesu technologicznego. Górne oszacowanie jest przypadkiem pesymistycznym z punktu widzenia algorytmu harmonogramowania. Jest to przypadek pesymistyczny ze względu na to, że z reguły interwał jest krótszy. Po pierwsze, pojedynczy produkt jest przetwarzany krócej niż czas maksymalny. Po drugie, \mathcal{T} jest pomniejszone o wartości wykluczone przez nałożenie ograniczeń (2.25) i (2.26).

Generalnie algorytm składa się z czterech części. Można, co prawda brać również pod uwagę operację segmentacji o złożoności $O(Z)$, ze względu na to, że nowe zamówienie może składać się z maksymalnie Z segmentów. Jednak jest to operacja wykonywana raz na nowe zamówienie, natomiast nie ma wpływu na kolejne iteracje rozwiązywania zadania harmonogramowania dla poszczególnych segmentów. Pierwszą częścią jest klasyfikacja (krok 3a pseudokodu). Złożoność kalkulacji wyniku zależy od zastosowanego modelu, jednak przyjmujemy ją jako stałą $O(1)$. Natomiast przekształcenie obiektu rozpoznawania w obraz, czyli stan procesu ma złożoność $O((H+L) \cdot I)$. Wynika to z tego, że dla każdego dźwigu (H dźwigów) oraz każdej grupy (L grup) wylicza się współczynnik zużycia. Aby obliczyć współczynnik zużycia, oblicza się, co najwyżej I wymnożone przez stałą ostatnich etapów w dotychczasowym harmonogramie. Kolejnym etapem jest rozwijanie cyklogramów (krok 3b pseudokodu) o złożoności $O(I \cdot Z)$. Ponieważ dla każdego produktu w segmencie (maksymalnie jest ich Z) należy dla każdego etapu procesu technologicznego (maksymalnie jest ich I) obliczyć wartość rozpoznawanego stanu systemu produkcyjnego (obliczenie wartości rzędu $O(1)$). Daje to w sumie złożoność $O(I \cdot Z)$. Oprócz tego należy odtworzyć marszrutę, czyli dla każdego dźwigu ustalone są punkty marszruty między którymi pozycja dźwigu jest interpolowana linią prostą. Mimo, iż marszruta jest rozwijana dla każdego dźwigu, złożoność obliczeń zależy jedynie od liczby operacji na produktach, czyli $O(I \cdot Z)$. Dzieje się tak, ponieważ niezależnie od liczby dźwigów na każdy dźwig przypada pewna część, a części poszczególnych dźwigów sumują się do tej samej liczby operacji. Im więcej dźwigów tym mniej dany dźwig musi wykonać operacji a co za tym idzie mniej skomplikowana jest jego marszruta. Należy zaznaczyć, że ten krok może być pominięty kosztem złożoności pamięciowej. W rzeczywistych systemach harmonogramowania przygotowuje się wcześniej

rozwiązania dla każdego cyklogramu dla wszystkich procesów technologicznych oraz dla $u_{seg} = 1, \dots, 20$. W praktyce oznacza to, że złożoność obliczeniowa $C(v_{n,v}, u_{seg})$ jest równa $O(1)$ zamiast $O(I \cdot Z)$. Można to zrobić, ponieważ algorytm rozwijania cyklogramów nie zależy w żadnym stopniu od rodzaju zamówienia czy stanu systemu produkcyjnego w danej chwili. Pozwala to zredukować ilość obliczeń dla najczęściej występujących zamówień. Trzecią częścią algorytmu jest ustalenie zbioru dopuszczalnych przesunięć \mathcal{F} . Należy sprawdzić, co najwyżej $I \cdot Z$ ograniczeń, czyli procedura ma złożoność obliczeniową $O(I \cdot Z)$. Następnie dla kolejnych przesunięć (pesymistycznie może to oznaczać dla \mathcal{F} wartości) należy sprawdzić czy istnieje bezkolizyjna marszruta. Procedura ta dla każdego dźwigu musi ustalić sposób zachowania się dźwigu, w co najwyżej $I \cdot Z$ interwałach. Na każdy interwał może przypadać pewna stała liczba kroków, w przypadku prostych strategii lub zmienna w przypadku naśladowania poprzedniego dźwigu. Jednak, jeśli liczba kroków jest zmienna to w sumie dla wszystkich interwałów jest stała i równa pewnej stałej wielokrotności $I \cdot Z$. Liczba możliwych do naśladowania kroków dźwigu rośnie dla kolejnych dźwigów, dlatego złożoność operacji układania jest rzędu $O(H \cdot I \cdot Z)$. Cała trzecia część ma zatem złożoność $O(I \cdot Z + \mathcal{F} \cdot H \cdot I \cdot Z)$ czyli $O(\mathcal{F} \cdot H \cdot I \cdot Z)$.

W sumie złożoność algorytmu dla pojedynczego segmentu jest równa $O((H + L) \cdot I + I \cdot Z + \mathcal{F} \cdot H \cdot I \cdot Z)$, czyli ostatecznie $O(L \cdot I + \mathcal{F} \cdot H \cdot I \cdot Z)$. Wszystkie parametry mające wpływ na wielkość problemu z wyjątkiem Z są stałe dla danego systemu produkcyjnego oraz zdefiniowanych procesów technologicznych. Należy zwrócić uwagę również, że optymistyczna złożoność algorytmu wynosi $O(L \cdot I + H \cdot I \cdot Z)$. Dzieje się tak dlatego, że w kroku algorytmu 3c) może istnieć bezkolizyjna marszruta już dla pierwszego analizowanego τ_x .

Z jednej strony wynika z tego, że proponowany algorytm będzie miał różny czas odpowiedzi na zdarzenia środowiska w pracy w systemie czasu rzeczywistego. Czas obliczeń jest liniowo zależna od liczby produktów w segmentach nowego zamówienia. Z drugiej strony jednak liniowa zależność od jednego parametru pozwala na łatwe wskazanie górnej granicy liczby jednorazowo zamawianych produktów aby z góry ograniczyć czas odpowiedzi systemu. Dzięki temu ograniczeniu możemy określić zdolność systemu do pracy w czasie rzeczywistym dla danego systemu produkcyjnego. Oznacza to, że jeśli będziemy badać czas trwania harmonogramowania dla jednego segmentu i dla pewnej wielkości Z okaże się, że jest ona większa niż czas trwania całego harmonogramu dotychczasowego to czas adaptacji powinien być tak duży, że nowy segment będzie przetwarzany już po rozładowaniu systemu produkcyjnego. Liniowa zależność czasu obliczeń od liczby produktów pozwala jednak łatwo dokonać estymacji czy

w rzeczywistych zastosowaniach algorytm jest wystarczająco szybki. Z drugiej strony taka złożoność obliczeń jest wskazówką dla algorytmu estymacji czasu adaptacji. Czas potrzebny na obliczenia powinien, co najmniej być liniowo zależny od wielkości segmentu.

Przedstawiony algorytm harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień został zaimplementowany w postaci systemu badawczo symulacyjnego. W rozdziale 3, zostaną przeprowadzone badania sprawdzające analizę złożoności algorytmu.

2.10. Cechy systemu harmonogramowania

Teza i zakres rozprawy wymagają od systemu harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień pewnych cech, które zapewniają jego poprawne działanie. System musi być zdolny do pracy w czasie rzeczywistym, nie dopuszczać do psucia produktów, musi być zdolny do obsługi dowolnych zamówień ze znanego wcześniej zbioru procesów technologicznych, o różnej liczności. Oprócz tego harmonogramy muszą spełniać określone wymagania technologiczne związane z charakterystyką linii produkcyjnych z transportem dźwigowym oraz przetwarzaniem chemicznym, takich jak: bezkolizyjność marszrut dźwigów, elastyczne czasy przetwarzania, grupy stanowisk roboczych, stanowiska wielofunkcyjne, kolumny stanowisk roboczych z transportami poprzecznymi.

Twierdzenie 1 *Przedstawiony algorytm gwarantuje znalezienie harmonogramu w skończonym czasie dla dowolnego zamówienia o skończonej liczbie produktów przy założeniu, że istnieje przynajmniej jeden scenariusz dla każdego procesu technologicznego.*

Dowód: Twierdzenie 1 opiera się na założeniu niezawodności procedury rozwijania cyklogramu $C(x, v_{n,v})$ oraz założeniu, że dla górnego ograniczenia przesunięcia τ_{seg} wszystkie ograniczenia opisujące poprawne rozwiązanie są spełnione. Każde zamówienie produktów można podzielić na segmenty. Przy pomocy procedury rozwijania cyklogramów, można skonstruować poprawny harmonogram cząstkowy poprzez przypisanie kolejnym wartościom zmiennych decyzyjnych opisujących zachowanie się produktów z segmentu odpowiednich wartości z cyklogramu. Jeśli cyklogram jest poprawny to również harmonogram cząstkowy musi być poprawny, ponieważ ograniczenia nałożone na cyklogram to gwarantują. Harmonogram cząstkowy jest odpowiednikiem uruchomienia systemu produkcyjnego zgodnie z pewnym scenariuszem produkcji, pracę tego systemu przez pewną liczbę cykli oraz wygaszenie produkcji. Przy odpowiednio dużym przesunięciu τ_{seg} segmenty nie mają części wspólnej w dziedzinie czasu, co jest odpowiednikiem uruchomienia systemu produkcyjnego, produkcji według pewnego scenariusza, wygaszenia produkcji, a następnie uruchomienia kolejnej produkcji. Oczywiście

harmonogramowanie ze zmiennym strumieniem zamówień nie ma sensu, gdy praca systemu odbywa się podobnie jak podczas harmonogramowania z cykliczną organizacją zamówień, jednak nawet w pesymistycznym przebiegu harmonogramowania jest taka możliwość. Można, więc dowolne zamówienie o skończonej liczbie produktów podzielić na skończoną liczbę segmentów, każdy segment będzie reprezentowany przez harmonogram cząstkowy, który można stworzyć na podstawie założenia o tym, że istnieje przynajmniej jeden scenariusz dla każdego procesu technologicznego. Harmonogramy cząstkowe są dopasowywane, co również nie może się nie powieść. W najgorszym razie, gdy nie uda się znaleźć bezkolizyjnej marszruty, segmenty można przesunąć wystarczająco daleko, że spełniają ograniczenia. Postępując tak dla każdego segmentu tworzy się harmonogram dla całego zamówienia. Co należało dowieść.

Twierdzenie 2 *Przedstawiony algorytm nie doprowadza do psucia się zamówionych produktów, przy założeniu, że istnieje przynajmniej jeden scenariusz dla każdego procesu technologicznego.*

Dowód: System harmonogramowania implementuje nowy, zaktualizowany harmonogram jedynie jeśli harmonogram jest poprawny. Oznacza to, że harmonogram musi z góry zawierać wszystkie operacje od czasu wprowadzenia produktu do systemu produkcyjnego aż do jego opuszczenia. W najgorszym przypadku czas wprowadzenia go na linię jest wydłużany, gdy algorytm wyznacza nowe czasy adaptacji na skutek spóźnienia się z odpowiedzią. Tym samym, przy założeniu niezawodności samego systemu produkcyjnego powoduje, że produkt nie może być zepsuty. Co należało dowieść.

Twierdzenie 3 *Przedstawiony algorytm jest zdolny do pracy w czasie rzeczywistym, to znaczy synchronizować swoją odpowiedź do stanu środowiska, przy założeniu, że istnieje przynajmniej jeden scenariusz dla każdego procesu technologicznego.*

Dowód: System harmonogramowania implementuje nowy, zaktualizowany harmonogram jedynie jeśli czas trwania harmonogramowania nie przekroczył wyznaczonej granicy. W przeciwnym wypadku algorytm w nieskończoność wyznacza nowy czas adaptacji i rozwiązuje zadanie harmonogramowania. Przez ten czas system nadal pracuje przy użyciu dotychczasowego harmonogramu. W momencie, gdy wszystkie operacje przewidziane w dotychczasowym harmonogramie zostaną ukończone, system produkcyjny czeka na dalsze instrukcje. Taki stan jest normalny i nie powoduje szkód. Dodanie nowego segmentu w tej sytuacji jest ułatwione, ponieważ dowolne przesunięcie τ_{seg} spełnia ograniczenia oraz marszruty dźwigów w harmonogramie cząstkowym są również poprawne. Czas trwania harmonogramowania sprowadza się do procedury rozwijania cyklogramów. Rozwijanie cyklogramów trwa skończony

czas, więc system harmonogramowania powinien w końcu wyznaczyć wystarczająco odległy w przyszłości czas adaptacji tak, że będzie można znaleźć poprawny harmonogram przed jego upływem.

Poprawny harmonogram jest zgodny z zachowaniem systemu produkcyjnego aż do czasu adaptacji. Mechanizm wyznaczania czasu adaptacji, ograniczenia (2.32), (2.33), (2.34) oraz sprawdzenie czy czas po ukończeniu harmonogramowania nie przekroczył czasu adaptacji zapewnia synchronizację systemu harmonogramowania ze środowiskiem. Co należało dowieść.

Warunkiem koniecznym do działania algorytmu harmonogramowania, a co za tym idzie systemu harmonogramowania pracującego w czasie rzeczywistym jest istnienie cyklogramów dla poszczególnych procesów technologicznych. Jeśli dostępne cyklogramy pozwalają na harmonogramowanie wielu dźwigów, grup stanowisk roboczych, stanowisk wielofunkcyjnych, wielu kolumn oraz elastycznych czasów przetwarzania, to harmonogramy wygenerowane przez zaproponowany algorytm również wspierają te cechy charakterystyczne systemów galwanotechnicznych. Są one również częścią notacji problemu. W systemie badawczym używane są cyklogramy utworzone przy pomocy opracowanej przez autora metody tworzenia cyklogramów [36]. Metoda ta wspiera wszystkie wymienione w zakresie pracy cechy charakterystyczne opisywanych systemów produkcyjnych.

Twierdzenie 4 *Czas pracy przedstawionego algorytmu pracy w czasie rzeczywistym jest skończony, przy założeniu skończonej liczby zamawianych produktów.*

Dowód: Skończoną liczbę zamówionych produktów można podzielić na skończoną liczbę segmentów o skończonej liczbie produktów tego samego typu. Na mocy twierdzenia pierwszego, ułożenie harmonogramu trwa pewną skończoną ilość czasu. Równanie (2.3) definiuje przewidywany czas obliczeń algorytmu harmonogramowania. W kolejnych iteracjach, w których sprawdza się synchronizację harmonogramu ze środowiskiem, czas ten jest coraz dłuższy (co najmniej o współczynnik, który musi być większy od jedności). Oznacza to, że w skończonej liczbie iteracji zostanie ustalony wystarczająco długi czas adaptacji, który pozwoli na utworzenie harmonogramu produkcji. Stworzony harmonogram, będzie zsynchronizowaną ze środowiskiem odpowiedzią systemu harmonogramowania.

Rozdział 3. Badania symulacyjne

3.1. Plan i zakres badań symulacyjnych

W niniejszym rozdziale zostaną opisane przeprowadzone badania symulacyjne systemu harmonogramowania opisanego w rozdziale 2. Oprócz zilustrowania działania przedstawionych algorytmów, eksperymenty numeryczne miały na celu zbadanie wpływu:

- parametrów problemu na zdolność systemu harmonogramowania do pracy w czasie rzeczywistym,
- sekwencji zamówień oraz liczności zamówionych produktów na wartość kryterium i współczynnik zrównoleglenia linii produkcyjnej.

Badania symulacyjne obejmują również:

- porównanie jakości uzyskanych harmonogramów w stosunku do dotychczas znanych algorytmów harmonogramowania,
- porównanie jakości harmonogramów w cyklicznej organizacji produkcji a organizacji ze zmiennym strumieniem zamówień,
- porównanie jakości harmonogramów w zależności od zastosowanej metody rozpoznawania,
- prezentację wyników działania systemu harmonogramowania dla rodzin produktów.

Przeprowadzone badania symulacyjne mają na celu sprawdzenie poprawności działania opracowanych algorytmów, zarówno dla syntetycznych linii oraz wygenerowanych procesów technologicznych jak i rzeczywistych danych, które można odszukać w literaturze. Zakres badań obejmuje zagadnienia pozwalające na zweryfikowanie tezy stawianej w tej pracy. Analiza przesuwania się horyzontu czasowego w zależności od wielkości problemu pozwoli stwierdzić, dla jakiego rodzaju problemów system harmonogramowania będzie zdolny do synchronizacji swojego działania ze środowiskiem. Porównanie jakości harmonogramów dla szeregu problemów przygotowanych do weryfikacji algorytmów harmonogramowania z dostępnymi wynikami innych systemów harmonogramowania, porównanie względem górnego oszacowania wartości kryterium

oraz analiza współczynnika zrównoleglenia linii produkcyjnej pozwolą na ocenę jakości stosowanych algorytmów.

3.2. Wyniki przeprowadzonych badań numerycznych

Prezentowane wyniki badań zostały obliczone przy użyciu implementacji algorytmów w języku C++ oraz C# na komputerze z procesorem Intel Q9300 2.5GHz. Jest to maszyna czterordzeniowa, jednak większość procedur będących częścią systemu harmonogramowania nie nadawała się do zrównoleglenia, lub nie została zrównoleglona. Można jednak założyć, że dla testów symulujących działanie linii w czasie rzeczywistym, zarówno proces „środowiska” – dodający produkty, implementujący harmonogramy jak i proces harmonogramowania mają do dyspozycji moc obliczeniową jednego rdzenia.

3.2.1. Wyniki związane z pracą w czasie rzeczywistym

W celu potwierdzenia oszacowań złożoności obliczeniowej zostały przeprowadzone badania symulacyjne dla syntetycznych danych, które ustalą wydajność algorytmu w zależności od parametrów mających wpływ na wielkość problemu. Kolejno zbadany zostanie wpływ liczby etapów procesu technologicznego I , wielkości zbioru przesunięć \mathcal{S} , liczby stanowisk w systemie produkcyjnym oraz wielkości zamówienia K .

Wszystkie testy wykonane są na danych syntetycznych, wygenerowanych na potrzeby testów. Testy zakładają, że produkcja odbywa się na jednokolumnowej linii produkcyjnej, gdzie stanowiska oddalone o 1 metr, maksymalna prędkość dźwigu to $0.5 \left[\frac{m}{s} \right]$, czas podnoszenia oraz opuszczenia to 8 sekund. Sekwencja stanowisk procesu technologicznego jest losowa.

3.2.1.1 Badanie wpływu maksymalnej liczby etapów procesu technologicznego na czas obliczeń

Jednym ze współczynników mających wpływ na złożoność obliczeniową jest liczba etapów procesu technologicznego. Tabela 3.1 przedstawia parametry zadania oraz warunki przeprowadzonych badań symulacyjnych. Należy zwrócić uwagę na zabieg wprowadzony w przypadku czasów maksymalnych czasu przetwarzania $M_{n,i}$. Zasadniczo liczba etapów procesu technologicznego I oraz \mathcal{S} są niezależne, jednak w związku ze zmieniającą liczbą etapów zmienia się również górne oszacowanie \mathcal{S} , ponieważ sumuje się coraz większą liczbę czasów maksymalnych $M_{n,i}$, bo rośnie zakres i . Aby uniezależnić zmiany wartości I od \mathcal{S} , zmienia się wartość $M_{n,i}$ w zależności od liczby etapów I .

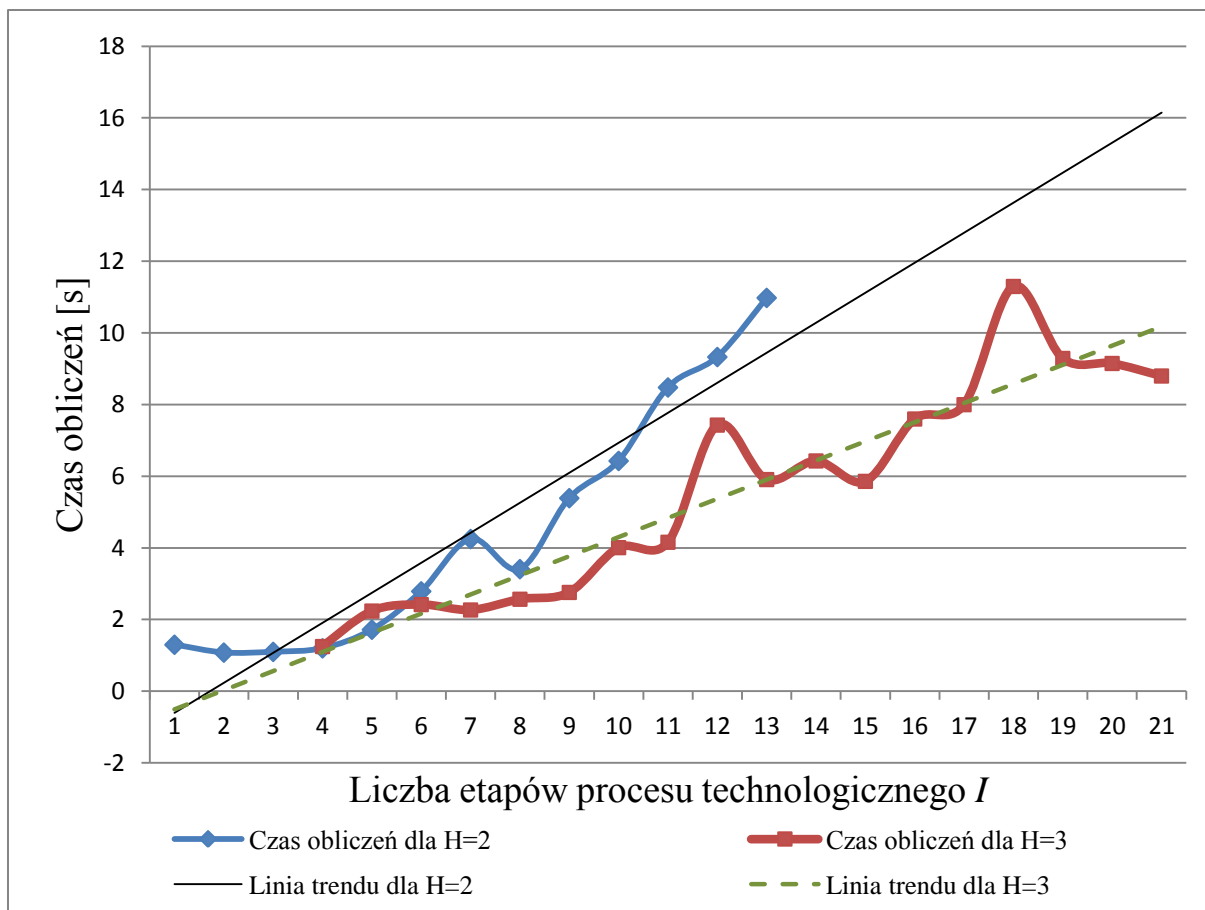
Tabela 3.1 Założenia testu zależności czasu obliczeń od liczby maksymalnej liczby kroków I

Cecha	Wartość
\mathcal{F}	2000;
$m_{n,i}$	$M_{n,i} / 4$
$M_{n,i}$	$2000 / I$
L	30
I	6, 7, ..., 18 dla $H = 2$, 9, 10, ..., 26 dla $H = 3$
H	2, 3
K	10
Przygotowanie testu	Dla każdego I oraz H generowane są dwa procesy technologiczne (nazywane A i B) o liczbie kroków I , minimalnym czasie etapu $m_{n,i}$, maksymalnym czasie etapu $M_{n,i}$ dla standardowej linii o 30 stanowiskach oraz o losowej sekwencji procesowej. Tworzone są cyklogramy, tworzony zbiór scenariuszy, generowane ciągi uczące dla obu klasyfikatorów. Przygotowanych jest 20 losowych instancji problemu dla każdego I oraz H . Losowe sekwencje tworzone są w taki sposób, aby kolejne stanowisko było oddalone o 1, 2 lub 3 stanowiska, produkty są zabierane do coraz dalszych stanowisk.
Obliczenia	Obliczenia dotyczą kolejki 10 produktów typu A, oraz nowego zamówienia 10 produktów typu B, co jest porównywalne z czasem adaptacji jednego segmentu. Wynikiem jest średni czas obliczeń z 20 wylosowanych instancji.

Tabela 3.2 zawiera wyniki badań symulacyjnych, które są następnie przedstawione w postaci wykresu na rysunku 3.1.

Tabela 3.2 Wyniki dla testu zależności czasu obliczeń od liczby maksymalnej liczby kroków I , czas obliczeń w sekundach

I	6	7	8	9	10	11	12
$H = 2$	1.30	1.08	1.10	1.20	1.72	2.79	4.25
$H = 3$	–	–	–	1.25	2.24	2.42	2.27
I	13	14	15	16	17	18	19
$H = 2$	3.41	5.39	6.43	8.48	9.33	10.98	–
$H = 3$	2.57	2.76	4.01	4.16	7.43	5.91	6.43
I	20	21	22	23	24	25	26
$H = 2$	–	–	–	–	–	–	–
$H = 3$	5.86	7.60	8.00	11.30	9.29	9.15	8.80



Rysunek 3.1 Zależność czasu trwania obliczeń od liczby kroków procesu technologicznego

Test został wykonany dla ograniczonej liczby etapów, ponieważ w sytuacji, gdy na dźwieg zaczyna przypadać więcej niż pewna liczba operacji znalezienie poprawnych cyklogramów może być bardzo trudne albo niemożliwe. Należy pamiętać, że liniowa zależność od liczby etapów procesu technologicznego jest tutaj zaszumiona dodatkowo wielkością \mathcal{F} . Wynika to z różnicy między pesymistyczną a optymistyczną złożonością obliczeniową (patrz rozdział 2.9). Przy przyjętych założeniach nie sposób ułożyć tak testu, aby zagwarantować stałą złożoność tego etapu algorytmu.

3.2.1.2 Badanie wpływu czasu trwania procesu technologicznego na czas obliczeń

Test badający wpływ wielkości \mathcal{F} na czas obliczeń, bada dla różnych czasów trwania procesów technologicznych, czas trwania harmonogramowania. Tabela 3.3 zawiera parametry badań symulacyjnych. Są one bardzo podobne do badań wykonanych w rozdziale 3.2.1.1.

Tabela 3.3 Założenia testu zależności czasu obliczeń od wielkości zbioru przesunięć \mathcal{F}

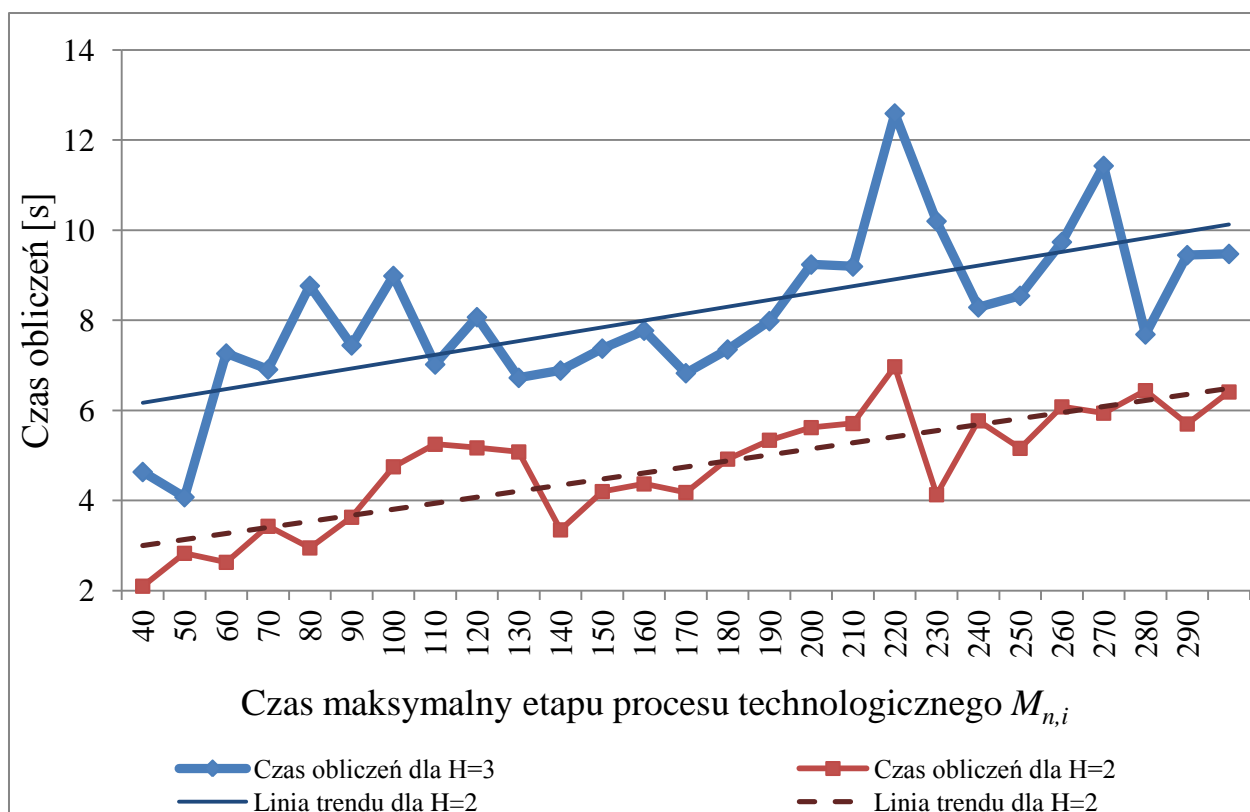
Cecha	Wartość
\mathcal{F}	$M_{n,i} \cdot I$ tj. 500, 640, ..., 4200 dla $H = 2$ oraz 840, 1000, ..., 6300 dla $H = 3$.

Cecha	Wartość
$m_{n,i}$	$M_{n,i} / 4$
$M_{n,i}$	40, 50, ..., 300
L	30
I	14 dla $H = 2$, 21 dla $H = 3$
H	2, 3
K	10
Przygotowanie testu	Dla każdego $M_{n,i}$ generowane są dwa procesy technologiczne (nazywane A i B) o liczbie kroków I , minimalnym czasie etapu $m_{n,i}$, maksymalnym czasie etapu $M_{n,i}$ dla standardowej linii o 30 stanowiskach oraz o losowej sekwencji procesowej. Tworzone są cyklogramy, tworzony zbiór scenariuszy, generowane ciągi uczące dla obu klasyfikatorów. Przygotowanych jest 20 losowych instancji problemu dla każdego $M_{n,i}$. Losowe sekwencje tworzone są w taki sposób, aby kolejne stanowisko było oddalone o 1, 2 lub 3 stanowiska, produkty są zabierane do coraz dalszych stanowisk.
Obliczenia	Obliczenia dotyczą kolejki 10 produktów typu A, oraz nowego zamówienia 10 produktów typu B, co jest porównywalne z czasem adaptacji jednego segmentu. Wynikiem jest średni czas obliczeń z 20 wylosowanych instancji.

Tabela 3.4 zawiera wyniki badań symulacyjnych, które są następnie przedstawione w postaci wykresu na rysunku 3.2.

Tabela 3.4 Wyniki dla testu zależności czasu obliczeń od wielkości zbioru przesunięć \mathcal{T} , czas obliczeń w sekundach

$M_{n,i}$	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$H = 2$	2.10	2.83	2.63	3.43	2.95	3.63	4.75	5.25	5.17
$H = 3$	4.63	4.07	7.26	6.90	8.76	7.44	8.98	7.02	8.07
$M_{n,i}$	130	140	150	160	170	180	190	200	210
$H = 2$	5.08	3.35	4.20	4.37	4.18	4.92	5.34	5.62	5.71
$H = 3$	6.72	6.88	7.37	7.77	6.82	7.35	7.98	9.23	9.19
$M_{n,i}$	220	230	240	250	260	270	280	290	300
$H = 2$	6.97	4.13	5.77	5.16	6.08	5.94	6.44	5.70	6.41
$H = 3$	12.59	10.20	8.28	8.54	9.73	11.42	7.68	9.44	9.47



Rysunek 3.2 Zależność czasu trwania obliczeń od czasu trwania procesu technologicznego $M_{n,i}$

Podobnie jak we wcześniejszym teście, wynik jest zaszumiony poprzez wpływ \mathcal{F} . Mimo to zauważalny jest liniowy charakter zależności złożoności obliczeniowej od maksymalnego czasu trwania etapów procesu technologicznego, a co za tym idzie od \mathcal{F} .

3.2.1.3 Badanie wpływu wielkości zamówienia na czas obliczeń

Kolejny test dotyczy badania wpływu wielkości zamówienia na czas obliczeń. Z analizy złożoności wynika, że zależność powinna mieć również liniowy charakter. Parametry badania znajdują się w tabeli 3.5.

Tabela 3.5 Założenia testu zależności czasu obliczeń od wielkości zamówienia K .

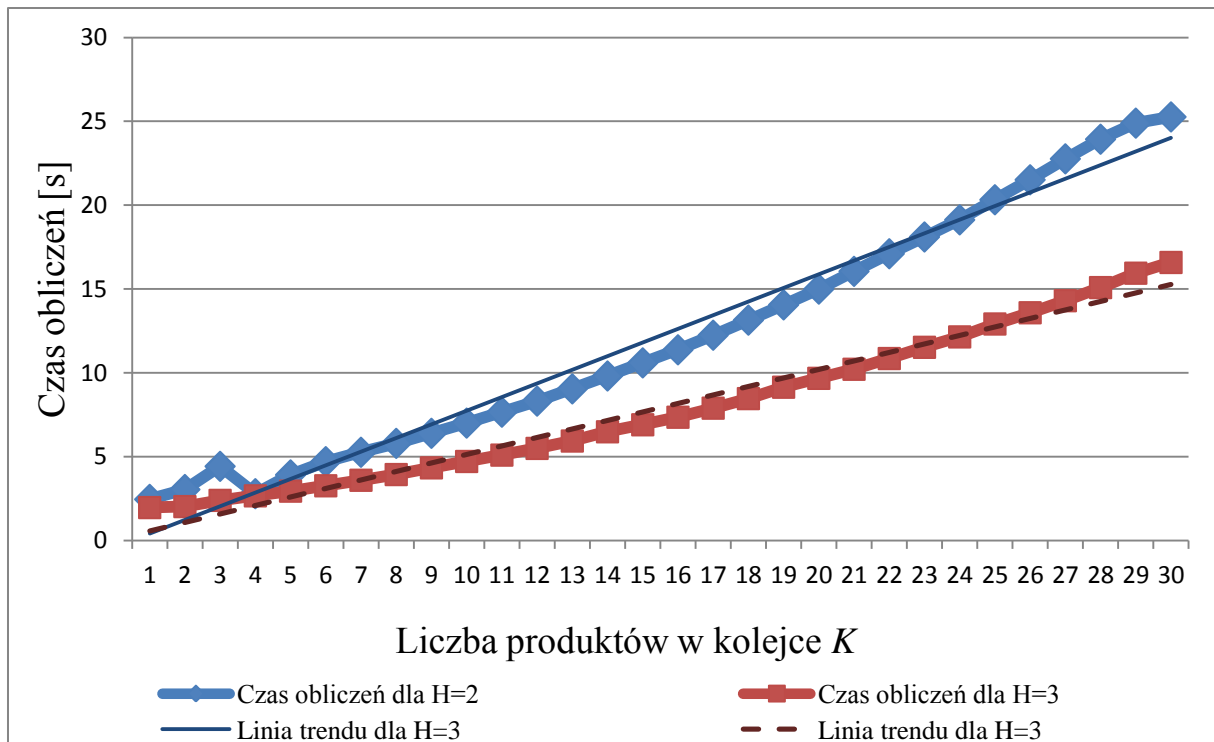
Cecha	Wartość
\mathcal{F}	2000
$m_{n,i}$	32
$M_{n,i}$	125
L	30
I	16
H	2, 3
K	1, 2, ..., 30

Cecha	Wartość
Przygotowanie testu	Dla dwóch wartości H generowane są dwa procesy technologiczne (nazywane A i B) o liczbie kroków I , minimalnym czasie etapu $m_{n,i}$, maksymalnym czasie etapu $M_{n,i}$ dla standardowej linii o 30 stanowiskach oraz o losowej sekwencji procesowej. Tworzone są cyklogramy, tworzony zbiór scenariuszy, generowane ciągi uczące dla obu klasyfikatorów. Przygotowanych jest 20 losowych instancji problemu dla każdego I oraz H . Losowe sekwencje tworzone są w taki sposób, aby kolejne stanowisko było oddalone o 1, 2 lub 3 stanowiska, produkty są zabierane do coraz dalszych stanowisk.
Obliczenia	Obliczenia dotyczą kolejki 10 produktów typu A, oraz nowego zamówienia Z produktów typu B, co jest porównywalne z czasem adaptacji jednego segmentu. Wynikiem jest średni czas obliczeń z 20 wylosowanych instancji.

Tabela 3.6 zawiera wyniki badań symulacyjnych, które są następnie przedstawione w postaci wykresu na rysunku 3.3.

Tabela 3.6 Średni czas obliczeń w sekundach dla wielkości zamówienia K

Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H=2	2.46	3.05	4.43	2.80	3.92	4.71	5.27	5.80	6.40	7.01
H=3	1.97	2.03	2.40	2.67	2.95	3.27	3.60	3.94	4.34	4.72
Z	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
H=2	7.66	8.32	9.05	9.82	10.60	11.38	12.25	13.15	14.06	15.00
H=3	5.10	5.50	5.94	6.49	6.91	7.36	7.90	8.47	9.15	9.68
Z	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
H=2	16.06	17.11	18.11	19.13	20.33	21.52	22.77	23.94	24.90	25.27
H=3	10.22	10.86	11.53	12.15	12.92	13.59	14.31	15.09	15.95	16.59



Rysunek 3.3 Zależność czasu obliczeń od liczby zamówionych produktów K

Przeprowadzone badanie potwierdza liniowy charakter zależności czasu obliczeń w stosunku do liczby zamówionych produktów.

Na podstawie przeprowadzonych badań, można zaobserwować, że czynnikiem mającym największy wpływ na czas trwania harmonogramowania jest I , czyli wartość związana z czasem trwania procesu technologicznego. Można to tłumaczyć tym, że im więcej etapów procesu technologicznego tym bardziej ograniczony jest zbiór prawidłowych rozwiązań. Na każdy produkt, zasoby linii są stosunkowo w większym stopniu używane w trakcie wykonywania wieloetapowego procesu technologicznego, niż procesu o małej liczbie etapów.

3.2.2. Wyniki związane z oceną jakości harmonogramów

W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione wyniki trzech rodzajów badań. Jako pierwsze zbadane są problemy testowe zaczerpnięte z literatury. Dla warunków identycznych (lub zbliżonych, w przypadkach, gdy występują różnice w systemie produkcyjnym np. inny model ruchu) zostaną utworzone harmonogramy w celu porównania osiągniętej wartości kryterium – długości harmonogramu – z wynikami przedstawionymi w literaturze. W drugiej części przedstawione są wyliczenia oszacowań maksymalnej wartości kryterium oraz porównanie z osiąganymi wartościami dla szerokiego zakresu parametrów. W trzeciej części porównane będą osiągi systemu produkcyjnego dla organizacji cyklicznej oraz ze zmiennym strumieniem zamówień.

3.2.2.1 Współczynnik zrównoleglenia systemu produkcyjnego

Podczas badań stosowane są dwie miary pomocne w ocenie jakości harmonogramów. Jednym z nich jest współczynnik zrównoleglenia systemu produkcyjnego liczony zgodnie z wzorem:

$$UT = \frac{\sum_{1 \leq k \leq Z} TB_{z(k)}}{\mathcal{Q}} \quad (2.61)$$

Gdzie \mathcal{Q} jest długością harmonogramu dla całej kolejki zadań, a TB_n jest określone zgodnie z wzorem (1.43) i oznacza minimalną czas trwania procesu technologicznego. TB_n jest górnym ograniczeniem czasu trwania procesu technologicznego w systemie produkcyjnym. W sposób trywialny można stworzyć harmonogram o długości równej $\sum_{1 \leq k \leq Z} TB_{z(k)}$ dla dowolnej kolejki \mathcal{X} . Harmonogram taki można stworzyć poprzez wprowadzanie jedynie jednego produktu na raz do systemu produkcyjnego. Wprowadzenie następnego produktu następuje dopiero po ukończeniu poprzedniego. Jeśli w systemie obecny jest jeden dźwig to podnosi on produkt ze stanowiska załadowczego i zanosz do kolejnego stanowiska. Czeka on przez czas równy minimalnemu czasowi trwania danego etapu, podnosi produkt i przenosi go do kolejnego stanowiska i tak dalej. Jeśli system zawiera więcej niż jeden dźwig, w jednym z etapów produkt podnoszony jest przez inny dźwig niż upuszczony. Jeśli rozwiązanie istnieje to podana procedura może służyć do jego znalezienia. Jest to jednak harmonogram o bardzo wysokiej wartości minimalizowanego kryterium, ponieważ nie dopuszcza do zrównoleglenia przetwarzania. $UT \leq 1$ oznacza, że algorytm harmonogramowania nie jest lepszy niż rozwiązanie trywialne, nie doszło w ogóle do zrównoleglenia przetwarzania. Jest to sytuacja niedopuszczalna. Wskaźnik UT można interpretować, jako współczynnik zrównoleglenia. Jest to odpowiednik ładowności w cyklogramach. $UT = 2$ oznacza, że system produkcyjny zdoła wyprodukować kolejkę zadań dwa razy szybciej niż harmonogram trywialny.

3.2.2.2 Dolne ograniczenie wartości kryterium

O ile współczynnik zrównoleglenia wskazuje górne ograniczenie odnośnie czasu trwania harmonogramu dla danej kolejki, czyli $UT = 1$, to dolne ograniczenie można zapisać jako:

$$W = \max(a^*, b^*, c^*, d^*, e^*) \quad (2.62)$$

gdzie, a^* oznacza najdłuższy minimalny czas trwania procesu technologicznego spośród produktów w kolejce, b^* oznacza sumę czasów potrzebnych do wprowadzenia wszystkich produktów do systemu produkcyjnego powiększoną o czas trwania procesu technologicznego ostatniego z produktów, c^* oznacza czas używania najdłuższej używanego stanowiska w systemie

produkcyjnym, d^* oznacza sumę czasów trwania wszystkich niezbędnych operacji dźwigów, podzieloną przez liczbę dźwigów, e^* oznacza ograniczenie na wprowadzanie produktów tego samego typu następujących po sobie. W jest jedynie oddolnym oszacowaniem. Nie jest możliwe, aby istniało rozwiązanie lepsze. Nie wiadomo, czy istnieje rozwiązanie bliskie W . Każdy z elementów dolnego ograniczenia długości harmonogramu ma związek z innym zbiorem ograniczeń nałożonych na poprawne rozwiązanie. a^* dotyczy sytuacji, gdzie minimalny czas trwania jednego z procesów technologicznych jest znacznie dłuższy od pozostałych. Na przykład składa się z 40 etapów po minimum 100 sekund, natomiast inne procesy technologiczne mają nie więcej niż 10 etapów po minimum 100 sekund. Wtedy ostatni wprowadzony do systemu produkcyjnego produkt tego typu może być jeszcze przetwarzany. Nawet, jeśli nie jest to ostatni produkt w kolejce, pozostałe produkty wprowadzone później mogą zostać ukończone wcześniej. Wynika to z ograniczeń (2.15),(2.16), (2.17). Wartość a^* można obliczyć w następujący sposób:

$$a^* = TB_{z(w)} + \sum_{1 \leq k < w} \left(\left\lceil \frac{|P_{o_1,0} - P_{o_2,0}|}{v} \right\rceil + \bar{\ell}_{z(k),0} \right) \quad (2.63)$$

w – indeks ostatniego produktu, którego TB_n jest największy

Oszacowanie a^* można jeszcze ulepszyć w przypadku, gdy można założyć, że wszystkie produkty wprowadzane są z tego samego stanowiska, co jest bardzo częste w rzeczywistych liniach produkcyjnych. Wtedy dźwig obsługujący stanowisko załadowcze musi wpiery opuścić produkt w kolejnym stanowisku oraz wrócić do stanowiska załadowczego, aby móc wprowadzić kolejny produkt. a^* jest równe:

$$a^* = TB_{z(w)} + \sum_{1 \leq k < w} \left(2 \cdot \left\lceil \frac{|P_{o_1,0} - P_{o_2,0}|}{v} \right\rceil + \bar{\ell}_{z(k),0} + \underline{\ell}_{z(k),1} \right) \quad (2.64)$$

w – indeks ostatniego produktu, którego TB_n jest największy

Uzupełnienie oszacowania a^* jest oszacowanie b^* wyrażone wzorem:

$$b^* = TB_{z(z-1)} + \sum_{1 \leq k < z} \left(\left\lceil \frac{|P_{o_1,0} - P_{o_2,0}|}{v} \right\rceil + \bar{\ell}_{z(k),0} \right) \quad (2.65)$$

Podobnie jak w poprzednim przypadku, przy założeniu, że wszystkie produkty wprowadzane są z tego samego stanowiska załadowczego, oszacowanie można rozszerzyć do:

$$b^* = TB_{z(z-1)} + \sum_{1 \leq k < Z} \left(2 \cdot \left| \frac{P_{o_1,0} - P_{o_2,0}}{v} \right| + \bar{\ell}_{z(k),0} + \underline{\ell}_{z(k),1} \right) \quad (2.66)$$

Oszacowanie c^* , w przeciwieństwie do poprzednich oszacowań, w lepszy sposób oszacowuje kolejki o dużej liczbie produktów. Oznacza to, że produkty nie mogą zostać ukończone, jeśli poszczególne etapy procesów technologicznych nie zostaną wykonane. O ile etapy procesów technologicznych mogą być wykonywane równolegle to w danym stanowisku muszą być one wykonywane w sekwencji. Wynika to z ograniczeń (2.25), (2.26), (2.31). W najlepszym razie dane stanowisko będzie w użyciu przez czas przetwarzania produktów oraz podczas podnoszenia oraz opuszczania. Oszacowanie wyraża się wzorem:

$$c^* = \max \left(\sum_{1 \leq k \leq Z} \sum_{1 \leq i \leq I^{z(k)}} PS(i, k, 1), \dots, \sum_{1 \leq k \leq Z} \sum_{1 \leq i \leq \mathcal{O}^{z(k)}} PS(i, k, l), \dots, \sum_{1 \leq k \leq Z} \sum_{1 \leq i \leq \mathcal{O}^{z(k)}} PS(i, k, L) \right) \quad (2.67)$$

$$PS(i, k, l) = \begin{cases} \bar{\ell}_{z(k),i} + \underline{\ell}_{z(k),i} + m_{z(k),i} - \text{gdy } o_i = l \\ 0 - \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases}$$

Ostatnia część oszacowania bierze pod uwagę czas pracy dźwigów. Ma to znaczenie jedynie, gdy czasy operacji dźwigów są zbliżone lub większe od czasów przetwarzania. Poprawny harmonogram składa się z serii podniesień i opuszczeń oraz niezbędnych przejazdów. Na mocy ograniczeń (2.25), (2.26) oraz (2.28) wartość d^* można wyrazić, jako:

$$d^* = \frac{\sum_{1 \leq k \leq Z} \sum_{1 \leq i < I^{z(k)}} \left(\left| \frac{P_{o_i,0} - P_{o_{i+1},0}}{v} \right| + \bar{\ell}_{z(k),i} + \underline{\ell}_{z(k),i+1} \right)}{H} \quad (2.68)$$

Ostatnią część oddolnego oszacowania W stanowi część wykorzystująca w większym stopniu informacje dotyczące kolejności i typów produktów w kolejce. Pod uwagę brane są poszczególne segmenty składające się na kolejkę. W danym segmencie produkt nie może być wprowadzany do systemu szybciej niż najdłuższy minimalny czas przetwarzania wśród wszystkich etapów procesu technologicznego, podzielony przez liczbę stanowisk realizujących ten etap. Zakładając, że produkty mają być ukończone w najszybszym czasie, a ich przetwarzanie nie może być krótsze niż TB_n to muszą być one jak najszybciej wprowadzone do systemu produkcyjnego. Jednak jeśli drugi produkt tego samego typu ma być wprowadzony, w sposób naturalny będzie on zużywał te same zasoby systemu produkcyjnego co poprzedni produkt (z dokładnością do stanowisk w grupach wielolicznych). Tym samym wprowadzenie produktu szybciej niż minimalny czas potrzebny na ukończenie danego etapu, powiększone o czas podnoszenia, opuszczania produktu oraz czas potrzebny na wyminięcie się dwóch dźwigów, powoduje nieodzownie złamanie, co

najmniej jednego z ograniczeń (2.15), (2.20) oraz (2.31). Dlatego też przetwarzanie segmentu może trwać nie krócej niż wspomniany czas ograniczający wprowadzanie produktów, powiększony o czas podniesienia z miejsca załadunku, pomnożony przez liczbę produktów w segmencie minus jeden. Oprócz, tego ostatni segment jest powiększony o minimalny czas trwania procesu technologicznego, w związku z tym, że ostatni wprowadzony produkt będzie przetwarzany co najmniej tyle, a co za tym idzie cały system będzie pracował co najmniej tyle. Ostatni składnik oszacowania można zapisać zatem jako:

$$e^* = \sum_{1 \leq x \leq SEG} \left(\max \left(\frac{m_{x,1}}{G_{o_1}} + \bar{\ell}_{x,1} + \underline{\ell}_{x,1}, \dots, \frac{m_{x, \mathcal{S}^x}}{G_{o_{\mathcal{S}^x}}} + \bar{\ell}_{x, \mathcal{S}^x} + \underline{\ell}_{x, \mathcal{S}^x} \right) \cdot (u_x - 1) + \bar{\ell}_{x,0} \right) + TB_{s_{SEG}} \quad (2.69)$$

3.2.2.3 Wyniki dotyczące jakości harmonogramów dla przykładów testowych z literatury

W niniejszym rozdziale znajdują się wyniki różnych przykładów testowych, które można znaleźć w literaturze poświęconej tematowi harmonogramowania z transportem dźwigowym. Opis przykładów testowych oraz użyte parametry można znaleźć w rozdziale 3.5.

Tabela 3.7 zawiera wyniki testów, których wyniki można znaleźć bezpośrednio w publikacjach, które definiują te problemy. Część problemów dotyczy pracy ze zmiennym strumieniem zamówień. Część zakłada produkcję jedynie jednego typu produktu, porównanie dotyczy wydajności systemu w organizacji cyklicznej do wydajności ze zmiennym strumieniem zamówień. Większość scenariuszy została wygenerowana za pomocą metody opisanej w pracy [59], poza przykładem Copper, gdzie użyto scenariusza z pracy [52].

Tabela 3.7 Porównanie wartości kryterium dla przykładów przedstawionych w literaturze.

Problem testowy	Wynik z literatury	Wynik algorytmu selekcji scenariuszy	Różnica
Jegou-1	62 produkty w 8:00:00.	108 produktów w 08:00:00 lub 62 produkty w 4:44:00	Wyprodukowano więcej o 44 produkty, tj. o 72% więcej.
Kopfer-1	40 produktów w proporcji 8:2:1:1, średnia ze 100 losowych kolejek: 27:56:27±2:37:47	21:00:06±1:37:41 przy identycznych warunkach testowych.	Czas trwania harmonogramów jest średnio o 24.8% krótsza od wyników z literatury.

Problem testowy	Wynik z literatury	Wynik algorytmu selekcji scenariuszy	Różnica
Jiyin-1	Nie więcej niż 81 produktów w 08:00:00	83 produkty w 08:00:00	Wyprodukowano więcej o 2 produkty, tj. o 2.4% więcej. Praca ze zmiennym strumieniem zamówień zamiast pracy cyklicznej.
PhU-1	Okolo 54 produkty dla jednego dźwigu oraz 77 dla dwóch dźwigów przy produkcji trwającej 08:00:00	54 produkty dla jednego dźwigu oraz 77 dla dwóch przy produkcji trwającej 08:00:00	Uzyskano wyniki porównywalne do odnotowanych w literaturze dla organizacji cyklicznej przy pracy ze zmiennym strumieniem zamówień.
Copper	Nie więcej niż 76 produktów	76 produktów w 08:00:00	Uzyskano wyniki porównywalne do odnotowanych w literaturze dla organizacji cyklicznej przy pracy ze zmiennym strumieniem zamówień.
DEGEM-1	Nie więcej niż 80 produktów, dla cyklogramu o długości cyklu 347 sekund.	83 produkty dla jednego dźwigu, 84 produkty dla dwóch oraz 84 produkty dla trzech dźwigów	Wyprodukowano więcej o 4 produkty, tj. o 5% więcej. Praca ze zmiennym strumieniem zamówień zamiast pracy cyklicznej. Dodanie dodatkowych dźwigów pozwoliło na wyprodukowanie więcej o jeden produkt, tj. o około 1.2% więcej.

Tabela 3.8 zawiera dane pozwalające na ocenę jakości uzyskanych harmonogramów w stosunku do optimum globalnego, dla przykładów z tabeli 3.7.

Tabela 3.8 Zrównoleglenie oraz dolne ograniczenie kryterium systemu produkcyjnego dla przykładów przedstawionych w literaturze.

Problem testowy	Rodzaj testu	Współczynnik zrównoleglenia	Dolne ograniczenie kryterium
Jegou-1	Kolejka 108 produktów, dwa dźwigi	6.18	20:40:00; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 38.48%.

Problem testowy	Rodzaj testu	Współczynnik zrównoleglenia	Dolne ograniczenie kryterium
Kopfer-1	40 produktów w proporcji 8:2:1:1, średnia ze 100 kolejek o losowej sekwencji zamówień, jeden dźwig	2.27	13:32:51; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 56.72%.
PhU-1	Kolejka 54 produktów, jeden dźwig	2.51	04:58:48; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 60%.
PhU-1	Kolejka 77 produktów, dwa dźwigi	3.58	04:01:27; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 98.31%.
Copper	69 produktów w 08:00:00	8.41	06:59:39; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 13.53%
DEGEM-1	Kolejka 83 produktów, jeden dźwig	2.53	07:27:48; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 6.55%
DEGEM-1	Kolejka 84 produktów, dwa dźwigi	2.56	07:33:05; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 5.27%
DEGEM-1	Kolejka 84 produktów, trzy dźwigi	2.57	07:33:05; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 4.99%

Tabela 3.9 zawiera wyniki badań symulacyjnych przeprowadzonych dla procesów technologicznych opisanych w literaturze, dla których nie podano wyników pracy ze zmiennym strumieniem zamówień. Wszystkie badania pokazują średnią arytmetyczną oraz odchylenie standardowe obliczone dla stu przykładów o losowej kolejności zamówienia.

Tabela 3.9 Wyniki przeprowadzonych testów dla danych syntetycznych .

Problem testowy	Rodzaj testu	Wynik selekcji scenariuszy	algotymu	Ilość segmentów
Jiyin-1	40 produktów w proporcji 1;3xJiyin-2;2xJiyin-3	15xJiyin-	08:29:41±00:27:00	17.71

Problem testowy	Rodzaj testu	Wynik selekcji scenariuszy	algorytmu	Ilość segmentów
Jiyin-1	40 produktów w proporcji 10xJiyin-1;3xJiyin-2;2xJiyin-3	08:25:32±00:27:25		21.01
Jiyin-1	40 produktów w proporcji 5xJiyin-1;3xJiyin-2;2xJiyin-3	08:10:39±00:31:29		24.99
Che-1	40 produktów w proporcji 15xChe-1;3xChe-2;2xChe-3	04:01:54±00:08:59		17.42
Che-1	40 produktów w proporcji 10xChe-1;3xChe-2;2xChe-3	04:43:59±00:05:57		21.08
Che-1	40 produktów w proporcji 5xChe-1;3xChe-2;2xChe-3	04:46:43±00:05:55		25.68
Mantile-1	40 produktów w proporcji 15xMantile-1;3xMantile-2;2xMantile-3	02:36:40±00:04:03		17.09
Mantile-1	40 produktów w proporcji 10xMantile-1;3xMantile-2;2xMantile-3	02:46:04±00:05:17		21.09
Mantile-1	40 produktów w proporcji 5xMantile-1;3xMantile-2;2xMantile-3	02:59:41±00:05:25		26.01
BlackOxide-1	40 produktów w proporcji 1xBO-1;1xBO-2	06:38:41±00:20:57		20.61
BlackOxide-1	40 produktów w proporcji 2xBO-1;3xBO-2	06:32:17±00:20:29		20.39
BlackOxide-1	40 produktów w proporcji 3xBO-1;2xBO-2	06:35:13±00:20:56		20.17

Tabela 3.10 zawiera dane pozwalające na ocenę jakości uzyskanych harmonogramów w stosunku do optimum globalnego, dla przykładów z tabeli 3.9.

Tabela 3.10 Zrównoleglenie oraz dolne ograniczenie kryterium systemu produkcyjnego dla danych syntetycznych.

Problem testowy	Rodzaj testu	Współczynnik zrównoleglenia	Dolne ograniczenie kryterium
Jiyin-1	40 produktów w proporcji 15xJiyin-1;3xJiyin-2;2xJiyin-3	3.16	03:16:00; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 160.04%.

Problem testowy	Rodzaj testu	Współczynnik zrównoleglenia	Dolne ograniczenie kryterium
Jiyin-1	40 produktów w proporcji 10xJiyin-1;3xJiyin-2;2xJiyin-3	3.40	03:16:00; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 157.83%.
Jiyin-1	40 produktów w proporcji 5xJiyin-1;3xJiyin-2;2xJiyin-3	3.61	03:16:00; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 149.85%.
Che-1	40 produktów w proporcji 15xChe-1;3xChe-2;2xChe-3	4.45	02:08:32; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 88.21%.
Che-1	40 produktów w proporcji 10xChe-1;3xChe-2;2xChe-3	3.81	02:13:36 tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 112.57%.
Che-1	40 produktów w proporcji 5xChe-1;3xChe-2;2xChe-3	3.80	02:23:44; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 99.48%.
Mantile-1	40 produktów w proporcji 15xMantile-1; 3xMantile-2;2xMantile-3	2.16	01:30:40; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 72.80%.
Mantile-1	40 produktów w proporcji 10xMantile-1; 3xMantile-2;2xMantile-3	2.04	01:29:40; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 85.21%.
Mantile-1	40 produktów w proporcji 5xMantile-1; 3xMantile-2;2xMantile-3	1.90	01:30:40; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 98.18%.

Problem testowy	Rodzaj testu	Współczynnik zrównoleglenia	Dolne ograniczenie kryterium
BlackOxide-1	40 produktów w proporcji 1xBO-1;1xBO-2	2.10	2:12:00; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 199.02%.
BlackOxide-1	40 produktów w proporcji 2xBO-1;3xBO-2	2.12	2:12:00; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 197.19%.
BlackOxide-1	40 produktów w proporcji 3xBO-1;2xBO-2	2.14	2:12:00; tj. znalezione rozwiązanie jest średnio dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 199.41%.

3.2.2.4 Wyniki badań symulacyjnych związane z porównaniem organizacji cyklicznej do organizacji ze zmiennym strumieniem zamówień

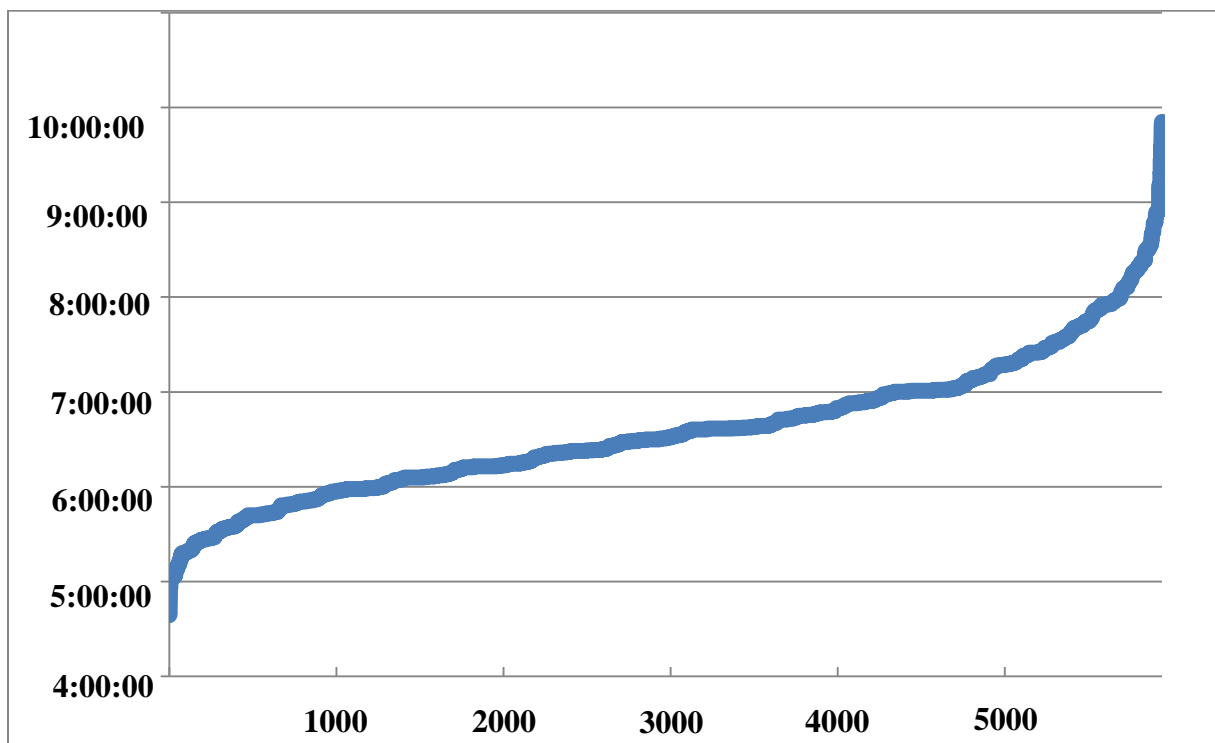
Kolejnym testem jest porównanie organizacji cyklicznej oraz ze zmiennym strumieniem zamówień. W przypadku produkcji jednego typu produktów proponowany algorytm tworzy harmonogramy, które pozwalają na uzyskanie identycznej wydajności systemu produkcyjnego jak w przypadku cyklicznym. Wynika to z faktu, że możliwe jest używanie dowolnych cyklogramów, jako scenariuszy produkcji w systemie czasu rzeczywistego. W przypadku produkcji jedynie jednego typu produktu cała kolejka składa się jedynie z jednego segmentu. System harmonogramowania w takim przypadku generuje harmonogram równoważny rozwinięciu cyklogramu dla określonej liczby produktów. Zatem w takim przypadku, żadna z organizacji produkcji nie uzyskuje przewagi z punktu widzenia kryterium optymalizacji.

W przypadku produkcji wielu typów produktów porównanie zostanie wykonane na podstawie problemu testowego Kopfer-1 opisany w pracy [38]. W pracy opisano cztery typy produkty, które są produkowane przez system produkcyjny. Produkty są oznaczone akronimami CAA, YAL, SAS, SAD. Określone jest również zapotrzebowanie na poszczególne typy produktów w postaci proporcji 8xCAA, 2xYAL, 1xSAS, 1xSAD. W celu porównania wartości kryterium, dla każdego z produktów utworzono cyklogramy przy użyciu algorytmu tworzenia cyklogramów [38]. Następnie spośród nich wybrano takie, dla których wyprodukowanie odpowiednio ośmiu, dwóch oraz dwa razy po jednym produkcie daje najkrótszy czas. Czyli odpowiednio 3:56:13 trwa wyprodukowanie ośmiu produktów CAA, 0:47:43 trwa wyprodukowanie dwóch produktów YAL, 2:38:21 wyprodukowanie jednego produktu SAD oraz 2:19:19 jednego produktu SAS. W sumie

daje to wartość: **9:41:36**. Jest to minimalny czas potrzebny, aby wyprodukować dwanaście produktów w tej proporcji przy użyciu cyklicznej organizacji produkcji. W przypadku produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień, gdy mamy zadaną proporcję produktów określonych typów, powstaje problem doboru kolejności zamówień. Najlepiej, aby kolejność zamówień była taka, żeby ułożony harmonogram dla kolejki produktów był jak najkrótszy. Liczbę różnych kolejek można wyrazić za pomocą wzoru:

$$LK = \prod_{1 < n \leq SEG} \left(\prod_{1 \leq k \leq u_n} \left(\frac{(\sum_{1 \leq j \leq n-1} u_j) + k}{k} \right) \right) \quad (2.70)$$

Gdzie *SEG* to liczba segmentów kolejki składającej się produktów ułożonych w taki sposób, że produkty tego samego typu sąsiadują ze sobą, a u_j to liczba produktów w segmencie j -tym. W analizowanym przypadku, można stworzyć $9 \cdot 5 \cdot 11 \cdot 12 = 5940$ różnych kolejek. Przygotowano system harmonogramowania na bazie tych samych cyklogramów przygotowanych do produkcji w organizacji cyklicznej. Sprawdzono każdą z 5940 kolejek. Wyniki zostały zobrazowane w formie wykresu na rysunku 3.4.



Rysunek 3.4 Długości harmonogramu dla 10692 kolejek, posortowane rosnąco od najkrótszej

Najlepszym rozwiązaniem jest kolejka $\{CAA, YAL, CAA, YAL, CAA, SAD, 2 \times CAA, SAS, 3 \times CAA\}$ o długości 4:35:39 oraz współczynnika zrównoleglenia 3.11 przy dolnym oszacowaniu długości

harmonogramu równym 03:07:36. Średnia długość harmonogramu wyniosła $6:35:31 \pm 0:43:33$, $UT = 2.19$. Natomiast rozwiązanie będące medianą zbioru to 6:30:35.

Tak jak można było się spodziewać, organizacja produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień osiąga lepsze rezultaty od organizacji cyklicznej w przypadku, gdy następują częste zmiany typów produktów. W analizowanym przypadku można ukończyć dwanaście produktów w zadanej proporcji o **5:02:57** krócej, niż w organizacji cyklicznej. Stanowi to aż 52% czasu cyklicznego. Średnio harmonogramowanie ze zmiennym strumieniem zamówień jest o 3:06:08 krótsze, co stanowi 32% długości trwania produkcji w organizacji cyklicznej. Problem doboru sekwencji zamówień, nie jest częścią tej rozprawy, jednak na przykładzie widać, że ma znaczny wpływ na osiągnięte wyniki.

3.2.3. Pozostałe wyniki

3.2.3.1 Wpływ zastosowania metod rozpoznawania na jakość uzyskanych harmonogramów

W tezie rozprawy postulowano, że wykorzystanie metod rozpoznawania pozwala na osiągnięcie wymaganych własności algorytmu harmonogramowania. Zastosowanie metod rozpoznawania pozwala na dostosowanie działania systemu harmonogramowania do produkcji odbywającej się w danym systemie produkcyjnym. Ma w największym stopniu wpływ na osiąganą wydajność harmonogramów. W niniejszym rozdziale zostaną przedstawione wyniki pokazujące zachowanie się systemu harmonogramowania z zastosowaniem zbioru scenariuszy oraz bez zbioru scenariuszy. W drugim przypadku algorytm zawsze stosuje ten sam cyklogram do wygenerowania harmonogramu cząstkowego dla segmentu. Wykonane badanie zostało przeprowadzone dla przypadku testowego Kopfer-1. W przypadku bez zbioru scenariuszy używane będą cyklogramy CAA-1, YAL-1, SAD-1, SAS-1 (długości cyklu odpowiednio 1434, 960, 4271, 4271). Tabela 3.11 przedstawia uzyskane wyniki, obliczone dla stu kolejek, po czterdzieści produktów w proporcji 8xCAA:2xYAL:1xSAS:1xSAD, o losowej sekwencji produktów.

Tabela 3.11 Badanie wpływu zastosowania metod rozpoznawania na jakość harmonogramów.

Typ badania	Średni czas harmonogramu	Współczynnik zrównoleglenia	Dolne ograniczenie kryterium	Poprawa z zastosowania metod rozpoznawania
Bez scenariuszy	24:14:45±1:28:53	1.97	13:29:54	–
Ze zbiorem scenariuszy ENS	21:00:06±1:37:41	2.27	13:29:54	13.38%
Ze zbiorem scenariuszy ANN	21:19:25±1:46:35	2.24	13:29:54	12.05%

Typ badania	Średni czas harmonogramu	Współczynnik zrównoleglenia	Dolne ograniczenie kryterium	Poprawa z zastosowania metod rozpoznawania
Ze zbiorem scenariuszy FNB	21:44:31±1:45:20	2.20	13:29:54	10.32%
Ze zbiorem scenariuszy SVM	21:28:39±1:46:06	2.23	13:29:54	11.41%

W przypadkach, gdy dostępny był zbiór scenariuszy oraz metoda rozpoznawania, algorytm tworzy lepsze harmonogramy, o większym współczynniku zrównoleglenia i mniejszym czasie niż w przeciwnym wypadku. Poszczególne klasyfikatory ENS – klasyfikator złożony, ANN – sztuczna sieć neuronowa, FNB – zmodyfikowany naiwny klasyfikator Bayesowski oraz SVM – maszyna wektorów wspierających, osiągnęły zbliżone rezultaty, choć klasyfikator złożony uzyskał najlepszy wynik.

3.2.3.2 Badania pracy algorytmu w czasie rzeczywistym dla testu Linia galwanotechniczna-1

Kolejne badanie pokazuje zachowanie się systemu harmonogramowania w pracy w czasie rzeczywistym. W tym celu zostanie użyty przykład opisany w rozdziale 3.5.10. Do kolejki dziesięciu produktów zostanie dodane nowe zamówienie w postaci jednego oraz pięciu nowych produktów. Test zostanie powtórzony dla różnych czasów dodania nowego zamówienia.

Tabela 3.12 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów nowego zamówienia dla testu Linia galwanotechniczna-1, do kolejki 10 produktów dodano jeden nowy.

Przesunięcie	Adaptacje	Wydłużenie harmonogramu	Czas harmonogramowania	Czas trwania harmonogramu
2000	1	00:21:37	00:00:31	02:21:50
2270	1	00:21:37	00:00:31	02:21:50
2280	0	00:38:43	00:00:03	02:38:56
2370	0	00:39:37	<00:00:01	02:39:50
3400	0	00:40:07	<00:00:01	02:40:20
2500	0	00:41:47	<00:00:01	02:42:00
2600	0	00:43:27	<00:00:01	02:43:40
2700	0	00:45:07	<00:00:01	02:45:20
2800	0	00:46:47	<00:00:01	02:47:00
2900	0	00:48:27	<00:00:01	02:48:40
3000	0	00:50:07	<00:00:01	02:50:20
3300	0	00:55:10	<00:00:01	02:55:23
3500	0	00:58:40	00:00:01	02:58:40

Tabela 3.13 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów nowego zamówienia dla testu Linia galwanotechniczna-1, do kolejki 10 produktów dodano pięć nowych.

Przesunięcie	Adaptacje	Wydłużenie harmonogramu	Czas harmonogramowania	Czas trwania harmonogramu
2100	1	00:33:57	00:00:29	02:34:10
2290	1	00:33:57	00:00:22	02:34:10
2300	0	00:51:05	00:00:03	02:51:18
2500	0	00:54:07	00:00:02	02:54:20
2600	0	00:55:59	00:00:03	02:56:12
2900	1	01:01:20	00:00:40	03:01:33
3000	0	00:58:15	00:00:03	02:58:28
3100	0	01:04:46	00:00:02	03:04:59

Kolumna „Przesunięcie” tabel 3.12 oraz 3.13 zawiera czas dodania nowego zamówienia do systemu produkcyjnego. Jest to czas liczony względem czasu wprowadzenia ostatniego dotychczasowego produktu. Kolumna „Adaptacje” zawiera liczbę nieudanych aktualizacji harmonogramu. Nieudana aktualizacja ma miejsce wtedy, gdy po znalezieniu harmonogramu okazuje się, że upłynął czas przewidziany na obliczenia. Nie można wtedy wdrożyć harmonogramu i należy rozpocząć poszukiwanie ponownie dla późniejszego czasu. W przypadku testowego Linia galwanotechniczna-1, dodanie nowego zamówienia (jeden produkt) nawet 2270 sekund po wprowadzeniu nie wpływa na maksymalną wydajność utworzonego harmonogramu. Dodanie produktu później sukcesywnie pogarsza rozwiązanie. System harmonogramowania, zachowuje się podobnie w przypadku zamówienia większej liczby produktów.

Kolejne badanie również dotyczy problemu testowego linii galwanotechnicznej-1. Tym razem zakładamy, że zamówienie jest dodawane w czasie wprowadzenia ostatniego dotychczasowego produktu. Test zostanie powtórzony dla różnych wielkości zamówienia. Tabela 3.14 zawiera uzyskane wyniki

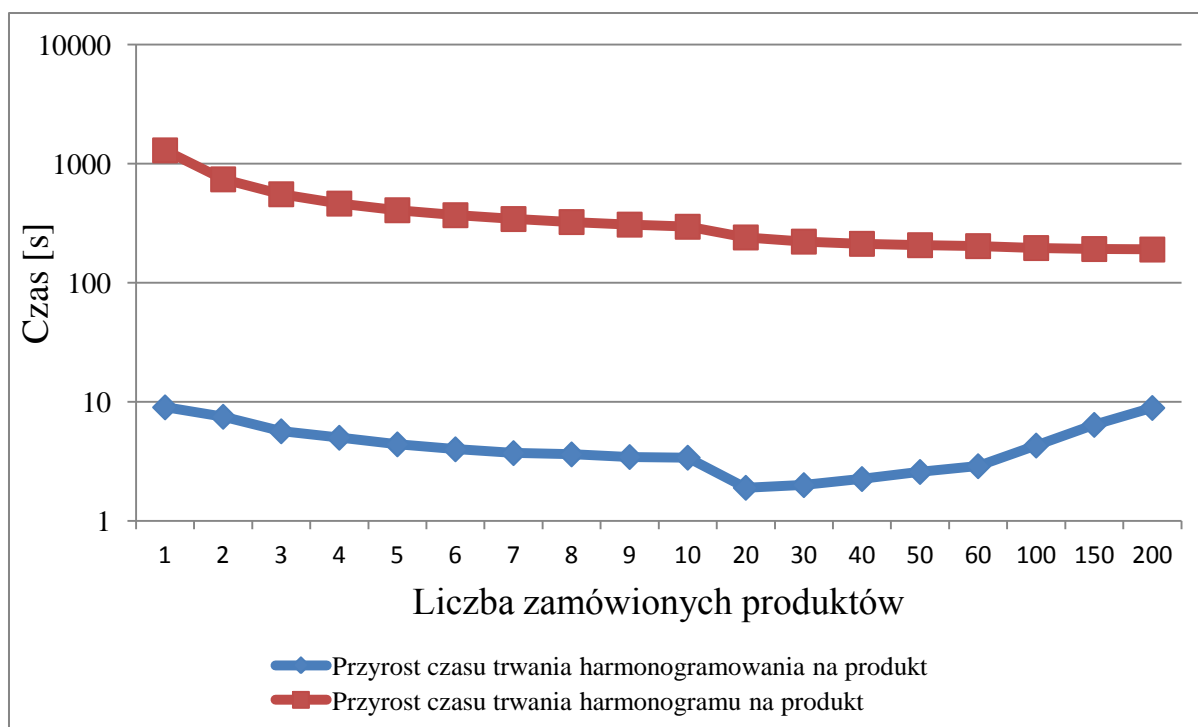
Tabela 3.14 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych wielkości segmentu dla procesu LG-1.

Wielkość nowego zamówienia	Czas trwania segmentu	Adaptacje	Wydłużenie harmonogramu	Czas harmonogramowania	Czas trwania harmonogramu
1	01:32:29	1	00:21:37	00:00:09	02:21:50
2	01:35:33	1	00:24:41	00:00:15	02:24:54
3	01:38:37	1	00:27:45	00:00:17	02:27:58

Wielkość nowego zamówienia	Czas trwania segmentu	Adaptacje	Wydłużenie harmonogramu	Czas harmonogramowania	Czas trwania harmonogramu
4	01:41:45	1	00:30:53	00:00:20	02:31:06
5	01:44:49	1	00:33:57	00:00:22	02:34:10
6	01:47:53	1	00:37:01	00:00:24	02:37:14
7	01:50:57	1	00:40:05	00:00:26	02:40:18
8	01:54:05	1	00:43:13	00:00:29	02:43:26
9	01:57:09	1	00:46:17	00:00:31	02:46:30
10	02:00:13	1	00:49:21	00:00:34	02:49:34
20	02:31:05	1	01:20:13	00:00:38	03:20:26
30	03:01:53	1	01:51:01	00:01:00	03:51:14
40	03:32:45	1	02:21:53	00:01:30	04:22:06
50	04:03:33	1	02:52:41	00:02:09	04:52:54
60	04:34:25	1	03:23:33	00:02:53	05:23:46
100	06:37:45	1	05:26:53	00:07:10	07:27:06
150	09:11:53	1	08:01:01	00:16:02	10:01:14
200	11:46:05	1	10:35:13	00:29:39	12:35:26

Proces technologiczny LG-1 jest obliczeniowo najbardziej złożonym problemem analizowanym w tej pracy. Proces technologiczny składa się z 36 etapów. W systemie pracuje sześć dźwigów, 37 grup w tym sześć wielolicznych oraz dwa stanowiska transportowe. System zorganizowany jest w dwie kolumny stanowisk roboczych. Jest to zatem dobry przykład do zaprezentowania wydajności algorytmu harmonogramowania. Badania przedstawione w tabelach 3.12 oraz 3.13 pokazują, że niezależnie od czasu dodania nowego zamówienia, algorytm znajduje rozwiązanie. Jedynie jakość rozwiązania może ulec pogorszeniu w zależności od sytuacji.

Tabela 3.14 pozwala na oszacowanie wydajności harmonogramowania w zależności od liczby zamawianych produktów oraz na sprawdzenie czy system harmonogramowania pracuje wystarczająco wydajnie, aby ukończyć harmonogramowanie przed rozładowaniem się systemu produkcyjnego.



Rysunek 3.5 Czasy harmonogramowania w stosunku do horyzontu czasowego harmonogramowania

Rysunek 3.5 przedstawia zależność obliczoną na podstawie tabeli 3.14. Przyrost czasu trwania harmonogramu pokazuje o ile sekund wzrasta czas harmonogramowania na każdy nowo zamówiony produkt, w zależności od liczby zamówionych produktów. Przyrost czasu trwania harmonogramu pokazuje o ile sekund wzrasta czas trwania harmonogramu po dodaniu nowego zamówienia, w zależności od liczby dodanych produktów. Przyrost czasu trwania harmonogramu jest tzw. horyzontem czasowym zadania harmonogramowania. Horyzont czasowy jest to czas w przyszłości, w stosunku do czasu rzeczywistego, w którym system produkcyjny pracuje zgodnie z określonym harmonogramem. System czasu rzeczywistego ma prawo działać poprawnie o ile przyrost czasu trwania harmonogramu będzie większy niż przyrost czasu harmonogramowania. W badanym przypadku procesu LG-1, ten warunek jest spełniony nawet dla bardzo dużych zamówień, a jest to najbardziej złożony proces technologiczny analizowany w tej rozprawie. Przyrost czasu trwania harmonogramu asymptotycznie dąży do wartości 180, czyli długości cyklu używanego scenariusza. Przyrost czasu harmonogramowania wynosi poniżej 8 sekund na produkt.

3.3. Omówienie wyników badań symulacyjnych

W ramach badań symulacyjnych wykonano szereg pomiarów, które miały sprawdzić zachowanie się proponowanego rozwiązania dla różnorodnych przypadków testowych. Część problemów miała charakter danych syntetycznych, wygenerowanych na potrzeby badań

symulacyjnych. Inne problemy zostały zaczerpnięte z literatury zajmującej się harmonogramowaniem systemów produkcyjnych z transportem dźwigowym. Miały one charakter zarówno danych rzeczywistych systemów produkcyjnych jak i specjalnie przygotowanych testów badających różne aspekty pracy tych systemów. Zaplanowane badania wykonano zgodnie z planem.

W rozdziale 3.2.1, wykonano badania wpływu różnych parametrów zadania harmonogramowania na czas obliczeń. Zgodnie z przeprowadzoną analizą złożoności algorytmu harmonogramowania wykazano, że czas trwania obliczeń jest liniowo zależny od liczby etapów realizowanych w systemie produkcyjnym procesów technologicznych, czasu trwania etapów oraz liczby nowo zamawianych produktów. Przy okazji zbadano również działanie algorytmu harmonogramowania dla szerokiego spektrum parametrów. Możliwe, że istnieje zestaw parametrów, dla którego algorytm harmonogramowania nie będzie mógł znaleźć rozwiązania, mimo iż takie rozwiązanie istnieje. Jednak, mimo szerokiego spektrum zbadanych parametrów, tego typu zdarzenie nie miało miejsca. W rozdziale 3.2.3 przedstawiono kilka badań potwierdzających wymaganą w tezie rozprawy zdolność systemu harmonogramowania do pracy w czasie rzeczywistym, nawet w przypadku skomplikowanych procesów technologicznych oraz dużych zamówień.

W rozdziale 3.2.2, przedstawiono podsumowanie szeregu testów, mających na celu porównanie pod kątem przyjętego kryterium, wyników dotychczas znanych algorytmów harmonogramowania z wynikami proponowanego rozwiązania. Proponowana metoda okazała się nie gorsza dla wszystkich zaprezentowanych problemów testowych. Dla przykładów zaprojektowanych do pracy ze zmiennym strumieniem zamówień, czyli Jegou-1 oraz Kopfer-1, uzyskano wyniki lepsze o odpowiednio 72% oraz 24.8%. Część pozostałych przykładów (tj. Jiyin-1, PhU-1 oraz DEGEM-1) została zaadaptowana do pracy w czasie rzeczywistym, i w istocie porównywano jakość dostępnych scenariuszy. W związku z tym, że korzystano z lepszego algorytmu tworzenia cyklogramów (algorytm opisany w pracy [55]), uzyskano lepszą wydajność systemu produkcyjnego. Testy te pokazały również, że system harmonogramowania pozwala na produkcję szerokiego zakresu procesów technologicznych. Obsługiwane jest wiele dźwigów, stanowiska wielofunkcyjne, grupy wieloliczne stanowisk roboczych.

W związku z tym, że dla pozostałych przykładów nie były znane wyniki dotychczasowych algorytmów harmonogramowania, wprowadzono dwa współczynniki – zrównoleglenia systemu produkcyjnego oraz dolne ograniczenie kryterium. Mogą być one pomocne w ocenie jakości prezentowanych wyników. Z jednej strony wysoki współczynnik zrównoleglenia pokazuje, że zbudowany harmonogram w dużym stopniu zrównolegla pracę systemu produkcyjnego. Z drugiej strony oddolna estymacja wartości kryterium teoretycznego rozwiązania, która pokazuje o ile

znalezione harmonogramy mogłyby być wydajniejsze. Obydwa współczynniki mają swoje wady. W przypadku współczynnika zrównoleglenia, każdy proces technologiczny różni się pod względem możliwości jego zrównoleglenia. Dlatego też, nie można przy pomocy zrównoleglenia porównywać jakości rozwiązań różnych procesów technologicznych. Dolna estymacja rozwiązania nie pozwala do końca stwierdzić, czy oceniany harmonogram jest słaby, czy sama estymacja jest za mało dokładna. Jednak mimo tych wad, miary te ustalają ramy, według których można ocenić jakość tworzonych harmonogramów dla przypadków testowych Jiyin-1, Che-1, Matile-1 oraz BlackOxide-1, i innych. Dla wspomnianych przypadków testowych uzyskano harmonogramy od długości stanowiącej od 172% do niemal trzykrotności dolnego oszacowania. Mimo to, można stwierdzić, że współczynnik zrównoleglenia dla tych harmonogramów jest na wysokim poziomie. Należy również zauważyć, że badane przypadki zostały zebrane z kolejek o kompletnie losowej sekwencji typów produktów. Im częstsze zmiany w typie produktu, tym większa szansa na konflikt zasobów, a co za tym idzie mniejsza szansa na znalezienie poprawnego rozwiązania.

Odnosząc się do tezy, można uznać, że rozwiązania generowane przez proponowaną metodę harmonogramowania nie są gorsze od rozwiązań, które można znaleźć w literaturze.

W rozdziale 3.2.2 zaprezentowano wyniki działania systemu harmonogramowania pod kątem zastosowania metod rozpoznawania. Zastosowanie metod rozpoznawania w procesie decyzyjnym ma istotny wpływ na wartość kryterium osiąganych wyników. W analizowanym przykładzie jest to ponad 13% wartości kryterium. Bez zastosowania zbioru scenariuszy metoda byłaby mało elastyczna, dopasowanie nowych zamówień byłoby trudniejsze. Algorytm rozpoznawania jest odpowiednikiem doświadczenia planisty, który wie jakiego rodzaju scenariusz użyć aby optymalizować kryterium. Potwierdzają to również inne badania opublikowane w pracy [64].

Oprócz własności zawartych w tezie rozprawy, podczas badań symulacyjnych zbadano również inne aspekty harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień. Dwa aspekty dotyczą wykazania sensu stosowania organizacji ze zmiennym strumieniem zamówień. To znaczy, korzyści w stosunku do organizacji cyklicznej oraz omówienie niedostępnych w organizacji cyklicznej rodzin produktów. Zbadano również wpływ kolejności zamówień na wydajność uzyskiwanych harmonogramów.

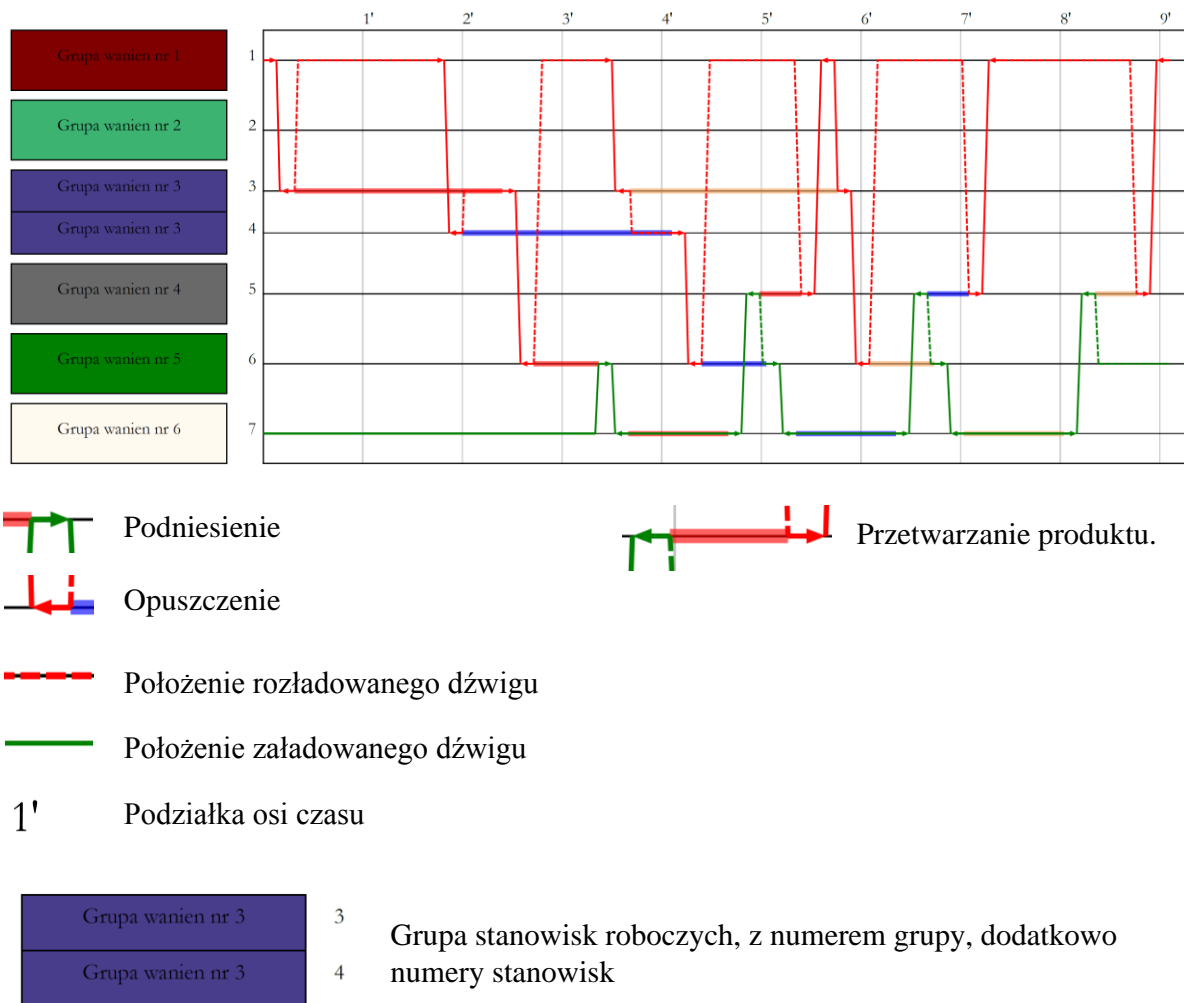
Wykonano testy pracy systemu harmonogramowania dla produkcji jednego rodzaju produktu, gdzie nowy produkt dodawany jest do kolejki co pewien interwał czasu. Są to warunki identyczne do tych jakie należy zapewnić w organizacji cyklicznej. Okazało się, że wyniki są porównywalne lub lepsze (przykłady Jiyin-1, PhU-1 oraz DEGEM-1). W proponowanej metodzie mogą być

wykorzystane te same cyklogramy, co stosowane w organizacji cyklicznej. Dlatego też, przy utrzymaniu podobnej wydajności produkcji, użytkownik systemu produkcyjnego zyskuje swobodę w czasie wprowadzania produktów do systemu. W organizacji cyklicznej, gdy na skutek błędu ludzkiego nowy produkt nie jest odłożony na czas, system przenosi pustą belkę zgodnie z cyklogramem. W organizacji ze zmiennym strumieniem zamówień, tego typu zdarzenia losowe mają jedynie wpływ na czas dodania nowego zamówienia. Inną korzyścią z zastosowania harmonogramowania w czasie rzeczywistym, są rodziny produktów. Jeśli nawet system produkcyjny jest dostosowany do produkcji jednego procesu technologicznego, może okazać się, że część produktów wymaga odrobiny innych czasów przetwarzania w określonych stanowiskach. Może to wynikać np. z nietypowej masy czy powierzchni produktu. Proces technologiczny jest tak zaprojektowany, aby niwelować drobne różnice, ale mimo to te produkty będą miały gorszą jakość. W takich sytuacjach, można wprowadzić rodziny produktów technologicznych, tak jak w zbadanych przypadkach testowych Matile-1, Jiyin-1 oraz Che-1. Badania pokazały, że proponowany system harmonogramowania obsługuje rodziny produktów i osiąga wysoką wydajność również dla nich. W przypadku przetwarzania wielu typów produktów, porównanie pracy ze zmiennym strumieniem zamówień a pracą cykliczną wskazuje jednoznacznie na przewagę pracy w czasie rzeczywistym. Przykładem mogą być przeprowadzone badania symulacyjne, gdzie harmonogram ułożony przez system harmonogramowania był o ponad 50% krótszy od czasu potrzebnego na wyprodukowanie tych samych produktów w organizacji cyklicznej.

Badania zaprezentowane w rozdziale 3.2.2 pokazują jedną z nieuniknionych wad prezentowanej metody harmonogramowania, jak i samej organizacji ze zmiennym strumieniem zamówień. Wpływ kolejności zamawianych produktów ma stosunkowo duże znaczenie na wynik harmonogramowania. W przypadku nawet niewielkiej kolejki dwunastu produktów, w zależności od sekwencji wprowadzania uzyskiwano wyniki o współczynniku zrównoleglenia od 1.45 do 3.11. Więc wynik może być ponad dwukrotnie lepszy od najgorszego. Część z powyższych badań została opublikowana w pracach [38], [38] oraz [40].

3.4. Graficzny i tekstowy opis harmonogramów

W niniejszym rozdziale zaprezentujemy jeden ze stosowanych w pracy sposobów zapisu harmonogramów. Jest to zapis graficzny pozwalający na śledzenie zachowania się stanowisk i dźwignów w trakcie produkcji oraz zapis tekstowy zawierający dokładny zapis czasów.



Rysunek 3.6 Elementy graficznej reprezentacji harmonogramu

Harmonogram w postaci graficznej, prezentuje wykres położenia dźwigów w czasie. Rysunek 3.6 prezentuje harmonogram o długości 547 sekund, dla linii z sześcioma grupami, siedmioma stanowiskami, dwoma dźwigami, trzema produktami tego samego typu. Oś rzędnych oznacza położenie w osi stanowisk roboczych, które są ponumerowane, a pozioma podziałka wskazuje położenie w czasie. Oś odciętych reprezentuje czas. Różnokolorowe linie (czerwona i zielona) pokazują położenie kolejnych dźwigów. Linia ciągła wskazuje na dźwig załadowany, linia przerywana na dźwig pusty. Strzałka o zwrocie w prawo wskazuje na podniesienie, w lewo na opuszczenie produktu. Poziome paski o różnych kolorach w miejscu położenia stanowisk reprezentują interwał czasu, gdzie produkt jest przetwarzany w ramach etapu procesu technologicznego. Kolory pasków rozróżniają poszczególne produkty, co umożliwia ich śledzenie podczas produkcji. Wykres przedstawia jedynie jedną kolumnę, cały harmonogram musi być przedstawiony przez tyle wykresów ile jest kolumn na linii.

Tabela 3.15 Tekstowa wersja harmonogramu z rysunku 3.6 dla pierwszego dźwigu.

Lp.	Operacja	Czas końca [s]	Położenie	<i>k</i>
1	Początek	0	Gr. 1, St. 1	-
2	Podniesienie	8	Gr. 1, St. 1	1
3	Przejazd	10	Gr. 3, St. 1	-
4	Przejazd	11	Gr. 3, St. 1	-
5	Opuszczenie	19	Gr. 3, St. 1	1
6	Przejazd	21	Gr. 1, St. 1	-
7	Przejazd	101	Gr. 1, St. 1	-
8	Podniesienie	109	Gr. 1, St. 1	2
9	Przejazd	112	Gr. 3, St. 2	-
10	Opuszczenie	120	Gr. 3, St. 2	2
11	Przejazd	121	Gr. 3, St. 1	-
12	Przejazd	144	Gr. 3, St. 1	-
13	Podniesienie	152	Gr. 3, St. 1	1
14	Przejazd	155	Gr. 5, St. 1	-
15	Opuszczenie	163	Gr. 5, St. 1	1
16	Przejazd	168	Gr. 1, St. 1	-
17	Przejazd	202	Gr. 1, St. 1	-
18	Podniesienie	210	Gr. 1, St. 1	3
19	Przejazd	212	Gr. 3, St. 1	-
20	Przejazd	213	Gr. 3, St. 1	-
21	Opuszczenie	221	Gr. 3, St. 1	3
22	Przejazd	222	Gr. 3, St. 2	-
23	Przejazd	246	Gr. 3, St. 2	-
24	Podniesienie	254	Gr. 3, St. 2	2
25	Przejazd	256	Gr. 5, St. 1	-
26	Opuszczenie	264	Gr. 5, St. 1	2
27	Przejazd	269	Gr. 1, St. 1	-
28	Przejazd	320	Gr. 1, St. 1	-
29	Przejazd	324	Gr. 4, St. 1	-
30	Podniesienie	332	Gr. 4, St. 1	1
31	Przejazd	336	Gr. 1, St. 1	-
32	Opuszczenie	344	Gr. 1, St. 1	1
33	Przejazd	346	Gr. 3, St. 1	-
34	Podniesienie	354	Gr. 3, St. 1	3
35	Przejazd	357	Gr. 5, St. 1	-
36	Opuszczenie	365	Gr. 5, St. 1	3
37	Przejazd	370	Gr. 1, St. 1	-
38	Przejazd	421	Gr. 1, St. 1	-
39	Przejazd	425	Gr. 4, St. 1	-
40	Podniesienie	433	Gr. 4, St. 1	2
41	Przejazd	437	Gr. 1, St. 1	-

Lp.	Operacja	Czas końca [s]	Położenie	<i>k</i>
42	Opuszczenie	445	Gr. 1, St. 1	2
43	Przejazd	522	Gr. 1, St. 1	-
44	Przejazd	526	Gr. 4, St. 1	-
45	Podniesienie	534	Gr. 4, St. 1	3
46	Przejazd	538	Gr. 1, St. 1	-
47	Opuszczenie	546	Gr. 1, St. 1	3
48	Koniec	546	Gr. 1, St. 1	-

Tabela 3.16 Tekstowa wersja harmonogramu z rysunku 3.6 dla drugiego dźwigu.

Lp.	Operacja	Czas końca [s]	Położenie	<i>k</i>
1	Początek	0	Pozycja 2F	-
2	Przejazd	200	Gr. 6, St. 1	-
3	Przejazd	202	Gr. 5, St. 1	-
4	Podniesienie	210	Gr. 5, St. 1	1
5	Przejazd	212	Gr. 6, St. 1	-
6	Opuszczenie	220	Gr. 6, St. 1	1
7	Przejazd	280	Gr. 6, St. 1	-
8	Podniesienie	288	Gr. 6, St. 1	1
9	Przejazd	291	Gr. 4, St. 1	-
10	Opuszczenie	299	Gr. 4, St. 1	1
11	Przejazd	301	Gr. 5, St. 1	-
12	Przejazd	303	Gr. 5, St. 1	-
13	Podniesienie	311	Gr. 5, St. 1	2
14	Przejazd	313	Gr. 6, St. 1	-
15	Opuszczenie	321	Gr. 6, St. 1	2
16	Przejazd	381	Gr. 6, St. 1	-
17	Podniesienie	389	Gr. 6, St. 1	2
18	Przejazd	392	Gr. 4, St. 1	-
19	Opuszczenie	400	Gr. 4, St. 1	2
20	Przejazd	402	Gr. 5, St. 1	-
21	Przejazd	404	Gr. 5, St. 1	-
22	Podniesienie	412	Gr. 5, St. 1	3
23	Przejazd	414	Gr. 6, St. 1	-
24	Opuszczenie	422	Gr. 6, St. 1	3
25	Przejazd	482	Gr. 6, St. 1	-
26	Podniesienie	490	Gr. 6, St. 1	3
27	Przejazd	493	Gr. 4, St. 1	-
28	Opuszczenie	501	Gr. 4, St. 1	3
29	Przejazd	503	Gr. 5, St. 1	-
30	Koniec	546	Gr. 5, St. 1	-

3.5. Parametry problemów testowych

W następnych podrozdziałach opisano pewne problemy harmonogramowania dźwigów, które zaczerpnięto z literatury. Każdy z problemów testowych zawiera opis parametrów systemu produkcyjnego, definicje realizowanych procesów technologicznych, parametry scenariuszy używanych podczas harmonogramowania oraz opis warunków przeprowadzanego testu.

Zamieszczono również wszelkie założenia poczynione podczas tworzenia harmonogramów dla poszczególnych systemów produkcyjnych.

Tabela ze scenariuszami wybranymi do harmonogramowania, zawiera parametry scenariusza takie jak ładowność i długość cyklu, ale również długość trwania harmonogramu cząstkowego, który uzyskuje się poprzez rozwinięcie cyklogramu dla zamówienia jednego, pięciu oraz dziesięciu produktów. Gdy rozważana jest różna liczba dźwigów, dla każdej liczności dźwigów wybrano osobne scenariusze produkcji.

3.5.1. PhU-1

Jest to przykład zdefiniowany w pracy [66]. Jest to jeden z najczęściej badanych przykładów systemu produkcyjnego z transportem dźwigowym. Analizowany jest w kilku wersjach, w zależności od sposobu rozwiązania. Obejmuje jedną galwanotechniczną linię produkcyjną realizującą jeden proces technologiczny. System produkcyjny składa się z jednej kolumny.

Tabela 3.17 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	1/2
Liczba procesów technologicznych N	1
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	1
Szerokość strefy kolizyjnej b [m]	0.5
Czas podnoszenia $\overline{t_{n,i}}$ [s]	9
Czas opuszczania $\underline{t_{n,i}}$ [s]	11
Liczba stanowisk L	12

Linia produkcyjna nie zawiera żadnych grup wielolicznych. Stanowisko nr 6. jest wielofunkcyjne, bierze udział w przetwarzaniu etapu drugiego oraz czwartego.

Tabela 3.18 Definicja procesu PhU-1.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	120	$+\infty$	1
2	Etap 1	150	200	5
3	Etap 2	90	120	6
4	Etap 3	120	180	7

Krok	Nazwa procesu	Czas		Numer grupy
		minimalny [s]	maksymalny [s]	
5	Etap 4	90	125	6
6	Etap 5	30	40	8
7	Etap 6	60	120	9
8	Etap 7	60	120	10
9	Etap 8	45	75	11
10	Etap 9	130	6000	12
11	Etap 10	120	6000	2
12	Etap 11	90	120	3
13	Etap 12	30	60	4
14	Rozładunek	–	–	1

Minimalny czas trwania procesu technologicznego TB_{PhU-1} to 00:22:19. Z podanego w publikacji [41] cyklogramu oraz tabeli czasów przejazdów dźwigów można ustalić tej podstawie położenia poszczególnych stanowisk roboczych:

Tabela 3.19 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej PhU–1 w [m].

Grupa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Położenie	0	6	8	10	11	14	16	19	22	24	26	29

W literaturze dla tak zdefiniowanego problemu, podano cyklogram o długości 512 sekund i ładowności 4. Przy użyciu metody [42] utworzono inne cyklogramy:

Tabela 3.20 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu PhU–1.

Liczba dźwigów	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowność	Czas trwania	Czas trwania	Czas trwania
				zamówienia z1 produktem	zamówienia z 5 produktami	zamówienia z 10 produktami
1	1	509	4	00:28:29	01:02:25	01:44:50
1	2	1182	2	00:22:26	01:41:14	03:19:44
2	1	357	5	00:26:32	00:50:20	01:20:05
2	2	361	5	00:25:06	00:49:10	01:19:15

Dla jednego oraz dwóch dźwigów przeprowadzono test, w którym obliczono ile produktów można wyprodukować w ciągu ośmiu godzin przetwarzania, przy założeniu, że co sto sekund jest zamawiany nowy produkt.

3.5.2. Matile–1

Jest to przykład zdefiniowany w pracy [61]. Obejmuje jedną galwanotechniczną linię produkcyjną realizującą jeden proces technologiczny. System produkcyjny składa się z jednej

kolumny. Praca dotyczy harmonogramowania w organizacji cyklicznej, jednak poprzez stworzenie rodziny procesów technologicznych na podstawie podanego w publikacji można wykonać badania również dla produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień. Praca jako jedna z niewielu zawiera również podany cyklogram, dzięki czemu będzie mógł być on użyty do testów.

Tabela 3.21 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	1
Liczba procesów technologicznych N	3
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	1
Szerokość strefy kolizyjnej b [m]	0.5
Czas podnoszenia $\overline{t_{n,i}}$ [s]	8
Czas opuszczania $\underline{t_{n,i}}$ [s]	8
Liczba stanowisk L	6

Linia produkcyjna nie zawiera żadnych grup wielolicznych, oraz stanowisk wielofunkcyjnych.

Tabela 3.22 Definicja oryginalnego procesu Matile-1.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	120	$+\infty$	1
2	Etap 1	80	100	4
3	Etap 2	10	10	5
4	Etap 3	80	100	6
5	Etap 4	100	120	3
6	Etap 5	120	140	2
7	Rozładunek	–	–	1

Aby zbadać zachowanie systemu produkcyjnego zostanie utworzona rodzina trzech procesów technologicznych, na podstawie zdefiniowanego w pracy [88]. Dwa dodatkowe procesy technologiczne mają identyczną liczbę etapów, sekwencję przetwarzania i różnią się jedynie czasem minimalnym i maksymalnym przetwarzania niektórych etapów. Tabela 3.23 przedstawia definicje dodatkowych procesów technologicznych.

Tabela 3.23 Definicja procesów Matile-2, Matile-3.

Krok	Nazwa procesu	Matile -2 czas minimalny [s]	Matile -2 czas maksymalny [s]	Matile -3 czas minimalny [s]	Matile -3 czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	120	$+\infty$	30	$+\infty$	1
2	Etap 1	80	100	40	100	4
3	Etap 2	10	10	40	40	5
4	Etap 3	80	100	80	100	6
5	Etap 4	160	200	120	200	3
6	Etap 5	220	300	40	60	2
7	Rozładunek	–	–	–	–	1

Minimalny czas trwania procesu technologicznego $TB_{Matile-1}$ to 00:08:22, $TB_{Matile-2}$ to 00:07:12, $TB_{Matile-3}$ to 00:11:02. Z podanego w publikacji cyklogramu można odczytać czasy przejazdów dźwigu. Na tej podstawie w Tabeli 3.24 podano położenia poszczególnych stanowisk roboczych.

Tabela 3.24 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej Matile-1 w [m].

Grupa	1	2	3	4	5	6
Położenie	0	2	4	6	8	9

W publikacji podano cyklogram o długości cyklu około 165 sekund i ładowności 4. Przy użyciu metody [38] utworzono dodatkowe cyklogramy oraz cyklogramy dla reszty procesów technologicznych z rodziny.

Tabela 3.25 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Matile-1.

Typ procesu	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowność	Czas trwania zamówienia z 1 produktem	Czas trwania zamówienia z 5 produktami	Czas trwania zamówienia z 10 produktami
Matile-1	1	160	4	00:08:44	00:19:24	00:32:44
Matile-1	2	296	2	00:08:52	00:28:36	00:53:16
Matile-1	3	310	2	00:09:05	00:29:45	00:55:35
Matile-2	1	178	3	00:07:50	00:19:42	00:34:32
Matile-2	2	202	3	00:07:50	00:21:18	00:38:08
Matile-3	1	260	3	00:11:32	00:28:52	00:50:32
Matile-3	2	428	3	00:11:36	00:40:08	01:15:48
Matile-3	3	426	2	00:11:22	00:41:06	01:18:16

Przeprowadzone testy mają podobny charakter do testów przeprowadzonych dla przypadku Kopfer-1. Dla proporcji ilościowej produktów, losowane jest 100 kolejek o różnej sekwencji zamówień. Podane wyniki oznaczają średnią długość z tych kolejek. Zbadano trzy proporcje

5xMatile-1;3xMatile-2;1xMatile-3, 10xMatile-1;3xMatile-2;1xMatile-3, 15xMatile-1;3xMatile-2;1xMatile-3.

3.5.3. Jiyin-1

Jest to przykład zdefiniowany w pracy [35]. Obejmuje jedną galwanotechniczną linię produkcyjną realizującą jeden proces technologiczny. System produkcyjny składa się z jednej kolumny. Praca dotyczy harmonogramowania w organizacji cyklicznej, ale jest jedną z niewielu prac gdzie podano przykład procesu technologicznego zawierającego jednocześnie kilka grup wielolicznych oraz kilka stanowisk wielofunkcyjnych. Linia zawiera dwie grupy stanowisk roboczych.

Tabela 3.26 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	1
Liczba procesów technologicznych N	3
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	1
Szerokość strefy kolizyjnej b [m]	2.0
Czas podnoszenia $\overline{t_{n,i}}$ [s]	6
Czas opuszczania $\overline{t_{n,i}}$ [s]	6
Liczba stanowisk L	9

Linia produkcyjna nie zawiera żadnych grup wielolicznych, oraz stanowisk wielofunkcyjnych.

Tabela 3.27 Definicja oryginalnego procesu Jiyin-1.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	220	360	1
2	Etap 1	240	360	4
3	Etap 2	50	100	5
4	Etap 3	50	100	6
5	Etap 4	50	100	7
6	Etap 5	1000	1200	8(4)
7	Etap 6	50	100	5
8	Etap 7	50	100	6
9	Etap 8	700	800	9(3)
10	Etap 9	260	360	3

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
11	Etap 10	280	360	2
12	Rozładunek	1	$+\infty$	1

Aby zbadać zachowanie systemu produkcyjnego zostanie utworzona rodzina trzech procesów technologicznych, na podstawie procesu zdefiniowanego w pracy [61]. Dwa dodatkowe procesy technologiczne różnią się jedynie brakiem jednego etapu procesu technologicznego oraz czasem przetwarzania niektórych etapów. Tabela 3.28 oraz Tabela 3.29 przedstawiają definicje dodatkowych procesów technologicznych.

Tabela 3.28 Definicja dodatkowego procesu Jiyin-2.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	1	360	1
2	Etap 1	240	360	4
3	Etap 2	50	100	5
4	Etap 3	50	100	6
5	Etap 4	50	100	7
6	Etap 5	50	100	5
7	Etap 6	50	100	6
8	Etap 7	700	800	9(3)
9	Etap 8	260	360	3
10	Etap 9	280	360	2
11	Rozładunek	1	$+\infty$	1

Tabela 3.29 Definicja dodatkowego procesu Jiyin-3.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	1	$+\infty$	1
2	Etap 1	120	360	4
3	Etap 2	50	100	5
4	Etap 3	50	100	6
5	Etap 4	50	100	7
6	Etap 5	1000	1200	8(4)
7	Etap 6	50	100	5
8	Etap 7	50	100	6
9	Etap 8	260	360	3

Krok	Nazwa procesu	Czas		Numer grupy
		minimalny [s]	maksymalny [s]	
10	Etap 9	280	360	2
11	Rozładunek	1	$+\infty$	1

Minimalny czas trwania procesu technologicznego $TB_{Jiyin-1}$ to 00:48:01, $TB_{Jiyin-2}$ to 00:31:11, $TB_{Jiyin-3}$ to 00:34:05.

Z podanego w publikacji cyklogramu można odczytać czasy przejazdów dźwigu. Na tej podstawie w Tabeli 3.30 podano położenia poszczególnych stanowisk roboczych.

Tabela 3.30 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej Jiyin-1 w [m].

Grupa	1	2	3	4	5	6	7	8(1)	8(2)	8(3)	8(4)	9(1)	9(2)	9(3)
Położenie	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

W publikacji podano cyklogram o długości cyklu 316 sekund i ładowności 12. Przy użyciu metody [38] utworzono cyklogramy dla wszystkich procesów technologicznych.

Tabela 3.31 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Jiyin-1.

Typ procesu	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowność	Czas trwania zamówienia z 1 produktem	Czas trwania zamówienia z 5 produktami	Czas trwania zamówienia z 10 produktami
Jiyin-1	1	308	12	00:56:54	01:17:26	01:43:06
Jiyin-1	2	328	11	00:58:25	01:20:17	01:47:37
Jiyin-2	1	308	7	00:34:42	00:55:14	01:20:54
Jiyin-3	1	320	8	00:41:13	01:02:33	01:29:13

Przeprowadzone testy mają podobny charakter do testów przeprowadzonych dla przypadku Kopfer-1 oraz Jegou-1. Dla proporcji ilościowej produktów, losowane jest 100 kolejek o różnej sekwencji zamówień. Podane wyniki oznaczają średnią długość z tych kolejek. Zbadano trzy proporcje 5xJiyin-1;3xJiyin-2;1xJiyin-3, 10xJiyin-1;3xJiyin-2;1xJiyin-3, 15xJiyin-1;3xJiyin-2;1xJiyin-3. Poza tym zostanie przeprowadzony test, w którym obliczono ile produktów typu Jiyin-1 można wyprodukować w ciągu ośmiu godzin przetwarzania, przy założeniu, że co sto sekund jest zamawiany nowy produkt.

3.5.4. Che-1

Jest to przykład zdefiniowany w pracy [14]. Obejmuje jedną galwanotechniczną linię produkcyjną realizującą jeden proces technologiczny. System produkcyjny składa się z jednej kolumny. Praca dotyczy harmonogramowania w organizacji cyklicznej, ale jest jedną z niewielu prac z zaawansowanym modelem kolizji dźwigów oraz jawnie podanym cyklogramem wyniku.

Tabela 3.32 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	3
Liczba procesów technologicznych N	3
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	1
Szerokość strefy kolizyjnej b [m]	0.5
Czas podnoszenia $\overline{t_{n,i}}$ [s]	11
Czas opuszczania $\underline{t_{n,i}}$ [s]	9
Liczba stanowisk L	14

Linia produkcyjna nie zawiera żadnych grup wielolicznych, oraz stanowisk wielofunkcyjnych.

Tabela 3.33 Definicja procesu Che-1.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	0	$+\infty$	1
2	Etap 1	56	68	2
3	Etap 2	56	86	3
4	Etap 3	143	146	4
5	Etap 4	127	140	5
6	Etap 5	137	184	6
7	Etap 6	148	193	7
8	Etap 7	112	133	8
9	Etap 8	86	129	9
10	Etap 9	144	164	10
11	Etap 10	72	78	11
12	Etap 11	79	110	12
13	Etap 12	128	140	13
14	Rozładunek	–	–	14

Aby zbadać zachowanie systemu produkcyjnego zostanie utworzona rodzina trzech procesów technologicznych, na podstawie zdefiniowanego w pracy [35]. Dwa dodatkowe procesy technologiczne mają identyczną liczbę etapów, sekwencję przetwarzania i różnią się jedynie czasem minimalnym i maksymalnym przetwarzania niektórych etapów. Tabela 3.34 przedstawia definicje dodatkowych procesów technologicznych.

Tabela 3.34 Definicja procesów Che-2, Che-3.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s] Che-2	Czas maksymalny [s] Che-2	Czas minimalny [s] Che-3	Czas maksymalny [s] Che-3	Numer grupy
1	Załadunek	0	$+\infty$	0	$+\infty$	1
2	Etap 1	56	68	20	60	2
3	Etap 2	56	86	20	60	3
4	Etap 3	143	146	143	146	4
5	Etap 4	127	140	127	140	5
6	Etap 5	137	184	137	184	6
7	Etap 6	300	400	148	193	7
8	Etap 7	112	133	112	133	8
9	Etap 8	86	129	86	129	9
10	Etap 9	144	164	144	164	10
11	Etap 10	72	78	72	78	11
12	Etap 11	79	110	140	180	12
13	Etap 12	128	140	128	140	13
14	Rozładunek	–	–	–	–	14

Minimalny czas trwania procesu technologicznego TB_{Che-1} to 00:26:34, TB_{Che-2} to 00:29:06, TB_{Che-3} to 00:26:23.

Na podstawie podanych w publikacji czasów można ustalić, że dla założonej prędkości dźwigu, stanowiska znajdują się w następujących położeniach:

Tabela 3.35 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej Che-1 w [m].

Grupa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Położenie	0	2	4	6	8	10	11	13	14	15	16	17	19	20

W publikacji podano cyklogram o długości cyklu 178 sekund i ładowności 8. Przy użyciu metody [38] utworzono dodatkowe cyklogramy oraz cyklogramy dla reszty procesów technologicznych z rodziny.

Tabela 3.36 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Che-1.

Typ procesu	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowność	Czas trwania zamówienia produktem z 1	Czas trwania zamówienia produktami z 5	Czas trwania zamówienia produktami z 10
Che-1	1	178	8	00:27:35	00:40:39	00:56:59
Che-1	2	295	6	00:28:11	00:47:51	01:12:26

Typ procesu	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowość	Czas trwania zamówienia z 1 produktem	Czas trwania zamówienia z 5 produktami	Czas trwania zamówienia z 10 produktami
Che-1	3	298	6	00:27:34	00:47:26	01:12:16
Che-1	4	402	5	00:27:09	00:53:57	01:27:27
Che-2	1	330	8	00:35:35	00:57:35	01:25:05
Che-2	2	369	5	00:29:37	00:54:13	01:24:58
Che-2	3	372	5	00:29:30	00:54:18	01:25:18
Che-3	1	195	9	00:28:05	00:41:05	00:57:20
Che-3	2	288	7	00:28:38	00:47:50	01:11:50
Che-3	3	362	5	00:28:02	00:52:10	01:22:20

Przeprowadzone testy mają podobny charakter do testów przeprowadzonych dla przypadku Kopfer-1. Dla proporcji ilościowej produktów, losowane jest 100 kolejek o różnej sekwencji zamówień. Podane wyniki oznaczają średnią długość z tych kolejek. Zbadano trzy proporcje 5xChe-1;3xChe-2;2xChe-3, 10xChe-1;3xChe-2;1xChe-3, 15xChe-1;3xChe-2;2xChe-3.

3.5.5. Jegou-1

Jest to przykład zdefiniowany w pracy [33]. Obejmuje jedną galwanotechniczną linię produkcyjną realizującą jeden proces technologiczny. System produkcyjny składa się z jednej kolumny. Jest to jedna z niewielu prac, gdzie podane są wyniki dla harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień, dla wielu dźwigów oraz grupy stanowisk roboczych. Rozwiązanie problemu harmonogramowania ze zmiennym strumieniem zamówień, proponowane w pracy [33], nie obsługuje grup stanowisk roboczych, autorzy definiują trzy procesy technologiczne. Procesy nie różnią się między sobą niczym, z wyjątkiem jednego stanowiska. W każdym z nich to stanowisko jest różne i reprezentuje inne stanowisko grupy stanowisk. W niniejszej rozprawie ta grupa procesów technologicznych zostanie zamieniona w jeden proces, w którym jeden z etapów realizowany jest przez grupę stanowisk roboczych.

Tabela 3.37 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	2
Liczba procesów technologicznych N	1
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	1
Szerokość strefy kolizyjnej b [m]	2.0
Czas podnoszenia $\overline{t_{n,i}}$ [s]	8

Parametr	Wartość parametru
Czas opuszczania $t_{n,i}$ [s]	8
Liczba stanowisk L	14

Linia produkcyjna zawiera jedną grupę wieloliczną. Grupa ma numer dziewięć i składa się z trzech stanowisk roboczych. Czasy podnoszenia, opuszczania, prędkość dźwigów, szerokość strefy kolizyjnej nie zostały podane w publikacji. Wartości tych parametrów zostały ustawione na najczęściej spotykane w liniach galwanotechnicznych.

Tabela 3.38 zawiera definicję procesu technologicznego Jegou-1. Etap 8 przeprowadzony jest w grupie trzech stanowisk. W publikacji badane jest kilka różnych konfiguracji. Podany proces technologiczny odpowiada konfiguracji, gdzie czasy maksymalne są równe 110% czasów minimalnych etapów procesu technologicznego.

Tabela 3.38 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Jegou-1.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	50	–	1
2	Etap 1	120	132	6
3	Etap 2	60	66	5
4	Etap 3	60	66	4
5	Etap 4	60	66	3
6	Etap 5	60	66	2
7	Etap 6	120	132	7
8	Etap 7	60	66	8
9	Etap 8	660	726	9(3)
10	Etap 9	60	66	10
11	Etap 10	60	66	11
12	Etap 11	60	66	12
13	Etap 12	60	66	13
14	Rozładunek	–	–	14

Tabela 3.39 prezentuje scenariusze produkcji, które wykorzystano do badań symulacyjnych.

Tabela 3.39 Scenariusz procesu technologicznego dla przykładu Jegou-1.

Długość cyklu	Ładowność	Czas trwania zamówienia produktem	Czas trwania zamówienia produktami	Czas trwania zamówienia produktami
252	8	00:27:48	00:44:36	01:05:36

W pracy [38] przeprowadzono test, w którym obliczono ile produktów można wyprodukować w ciągu ośmiu godzin przetwarzania, przy założeniu, że co sto sekund jest zamawiany nowy produkt. W prezentowanej konfiguracji uzyskano wydajność 62 produktów.

3.5.6. Kopfer-1

Jest to przykład zdefiniowany w pracy [64]. Obejmuje jedną galwanotechniczną linię produkcyjną realizującą cztery procesy technologiczne. System produkcyjny składa się z jednej kolumny. Jest to jeden z niewielu dla problemu ze zmiennym strumieniem zamówień przykładów opisanych w literaturze.

Tabela 3.40 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	1
Liczba procesów technologicznych N	4
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	1
Czas podnoszenia $\overline{t_{n,i}}$ [s]	13
Czas opuszczania $\underline{t_{n,i}}$ [s]	12
Liczba stanowisk L	19

Linia produkcyjna nie zawiera żadnych grup wielolicznych, oraz stanowisk wielofunkcyjnych. Kolejne stanowiska oddalone są od siebie o dwa metry, tym samym czas przejazdu między sąsiednimi stanowiskami jest równy dwie sekundy. Nazwy etapów procesów technologicznych pozostawiono tak jak w oryginale.

Tabela 3.41 Definicja procesu CAA.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	–	–	1
2	Chromic acid anodising (CAA)	1380	1560	2
3	CAA rinse 1	180	240	3
4	CAA rinse 2	180	240	4

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
5	CAA rinse 3	900	$+\infty$	5
6	Circulation rinse	180	$+\infty$	7
7	Drying	900	$+\infty$	6
8	Rozładunek	–	–	1

Tabela 3.42 Definicja procesu YAL.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	–	–	1
2	Yellow alodining (YAL)	120	180	8
3	YAL rinse 1	180	240	9
4	YAL rinse 2	180	240	10
5	Circulation rinse	180	∞	7
6	Drying	900	∞	6
7	Rozładunek	–	–	1

Tabela 3.43 Definicja procesu SAD.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	–	–	1
2	Sulphuric acid anodising (SAA)	4200	4380	14
3	SAA rinse 1	120	180	15
4	SAA rinse 2	120	∞	16
5	Dyeing	900	1200	19
6	Dyeing rinse	180	∞	18
7	Sealing dyeing	2400	2700	17
8	Sealing rinse 1	120	180	12
9	Sealing rinse 2	120	∞	11
10	Circulation rinse	180	∞	7
11	Drying	900	∞	6
12	Rozładunek	–	–	1

Tabela 3.44 Definicja procesu SAS.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	–	–	1

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
2	Sulphuric acid anodising (SAA)	4200	4380	14
3	SAA rinse 1	120	180	15
4	SAA rinse 2	120	∞	16
5	Sealing	2400	2700	13
6	Sealing rinse 1	120	180	12
7	Sealing rinse 2	120	∞	11
8	Circulation rinse	180	∞	7
9	Drying	900	∞	6
10	Rozładunek	–	–	1

Minimalny czas trwania procesu technologicznego CAA to 01:05:34, YAL to 00:28:41, SAD to 02:39:01, SAS to 02:20:06. Do badań wykorzystywane są następujące scenariusze produkcji:

Tabela 3.45 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Kopfer-1.

Typ procesu	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowość	Czas trwania zamówienia z 1 produktem	Czas trwania zamówienia z 5 produktami	Czas trwania zamówienia z 10 produktami
CAA	1	1434	3	01:11:13	02:46:49	04:46:19
CAA	2	1438	3	01:10:43	02:46:35	04:46:25
CAA	3	1452	3	01:06:49	02:43:37	04:44:37
YAL	1	960	3	00:33:01	01:37:01	02:57:01
YAL	2	969	2	00:31:34	01:36:10	02:56:55
YAL	3	1726	1	00:28:45	02:23:49	04:47:39
SAD	1	4271	4	04:25:52	09:10:36	15:06:31
SAD	2	9511	1	02:39:15	13:16:19	1.02:32:39
SAS	1	4271	4	3:50:08	8:34:52	14:30:47
SAS	2	8370	1	2:20:19	11:41:39	23:23:19

W pracy [64] podane są między innymi wyniki dla testu, w którym dla określonej proporcji zamówień np. 8xCAA;2xYAL;1xSAD;1xSAS budowana jest kolejka 40 produktów o losowej kolejności. Całe zamówienie jest znane z góry, nie jest testowany aspekt wpływu czasu rzeczywistego na harmonogramowanie. Podane wyniki są uśrednieniem stu tak wylosowanych kolejek.

3.5.7. DEGEM-1

Jest to przykład zdefiniowany w pracy [37]. Obejmuje jedną galwanotechniczną linię produkcyjną realizującą jeden proces technologiczny. System produkcyjny składa się z jednej kolumny. Dla podanego przykładu w pracy [69] podano wyniki dla jednego, dwóch oraz trzech dźwigów. Dzięki temu będzie można porównać wydajność również dla różnej liczby dźwigów.

Tabela 3.46 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	1/2
Liczba procesów technologicznych N	1
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	0.7
Szerokość strefy kolizyjnej b [m]	1.0
Czas podnoszenia $\overline{t_{n,i}}$ [s]	8
Czas opuszczania $\overline{t_{n,i}}$ [s]	8
Liczba stanowisk L	9

Czasy podnoszenia, opuszczania, prędkość dźwigów, szerokość strefy kolizyjnej nie zostały podane w publikacji. Wartości tych parametrów zostały ustawione na najczęściej spotykane w liniach galwanotechnicznych. Tabela 3.47 zawiera definicję procesu technologicznego DEGEM-1, nazwy etapów procesu technologicznego pozostawiono w pisowni oryginalnej.

Tabela 3.47 Definicja procesu DEGEM-1.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	–	–	1
2	Soap water	180	300	2
3	Rinsing I	60	120	3
4	Phosphorous acid	300	300	4
5	Rinsing II	30	60	5
6	Coating	15	90	6
7	Rinsing III	30	60	7
8	Drying	120	180	8
9	Rozładunek	–	–	9

Minimalny czas trwania procesu technologicznego TB_{DEGEM} to 00:14:34 W związku z brakiem danych odnośnie położenia stanowisk roboczych, czy czasów trwania przejazdów przyjęto, że linia

składa się z jednakowej wielkości stanowisk roboczych rozstawionych co 0.7 metra. W ten sposób, przy założonej prędkości dźwigu, przejazd z grupy i do grupy j trwa $|i - j|$ sekund.

W pracy [69] podano kilka różnych długości cykli rozwiązań znalezionych przez autorów, jednak jedynie kilka nadaje się do porównania. Rozwiązania o długości cyklu 250 sekund wydają się błędne, gdyż przy etapie procesu technologicznego „Phosphorous acid” o minimalnej długości 300 sekund, nie ma możliwości produkcji tego rodzaju produktów częściej niż raz na 300 sekund. Do badań wykorzystywane są następujące scenariusze produkcji:

Tabela 3.48 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu DEGEM-1.

Lp.	Liczba dźwigów.	Długość cyklu [s]	Ładowność	Czas trwania zamówienia z 1 produktem	Czas trwania zamówienia z 5 produktami	Czas trwania zamówienia z 10 produktami
1	1	338	3	00:15:13	00:37:45	01:05:55
2	1	354	3	00:14:48	00:38:24	01:07:54
1	2	330	4	00:20:28	00:42:28	01:09:58
2	2	338	4	00:18:10	00:40:42	01:08:52
3	2	346	4	00:17:45	00:40:28	01:09:18
4	2	614	4	00:14:34	00:55:30	01:46:40
1	3	330	4	00:19:12	00:41:12	01:08:42
2	3	338	4	00:19:28	00:42:00	01:10:10

Dla jednego, dwóch oraz trzech dźwigów przeprowadzono test, w którym obliczono ile produktów można wyprodukować w ciągu ośmiu godzin przetwarzania, przy założeniu, że co sto sekund jest zamawiany nowy produkt.

3.5.8. Copper

Kolejne dwa przypadki testowe (Copper, BlackOxide) zostały zaczerpnięte z pracy doktorskiej [55]. Są to przykłady rzeczywistych linii galwanotechnicznych. We wspomnianej pracy przykłady te badane są w kontekście pracy w organizacji cyklicznej.

Test Copper obejmuje jedną galwanotechniczną linię produkcyjną realizującą jeden proces technologiczny. System produkcyjny składa się z jednej kolumny, dostępny jest jeden dźwig.

Tabela 3.49 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	1
Liczba procesów technologicznych N	1

Parametr	Wartość parametru
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	0.53
Szerokość strefy kolizyjnej b [m]	2.0
Liczba stanowisk L	12

Linia produkcyjna zawiera dwie grupy wieloliczne. Grupa nr 12 zawiera sześć stanowisk oraz grupa nr 4 składa się z dwóch stanowisk.

Tabela 3.50 Definicja oryginalnego procesu.

Krok	Nazwa procesu	Czas podnoszenia [s]	Czas opuszczania [s]	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	4	–	60	$+\infty$	1
2	Etap 1	4	8	240	420	6
3	Etap 2	8	8	60	180	7
4	Etap 3	8	8	60	120	8
5	Etap 4	8	8	60	180	9
6	Etap 5	8	12	120	300	11
7	Etap 6	9	9	1800	3000	12(6)
8	Etap 7	9	8	60	180	10
9	Etap 8	8	8	120	300	5
10	Etap 9	8	9	600	840	4(2)
11	Etap 10	8	8	45	$+\infty$	3
12	Etap 11	8	8	120	$+\infty$	2
13	Rozładunek	–	4	60	–	1

Minimalny czas trwania procesu technologicznego TB_{Copper} to 00:58:07.

Tabela 3.51 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej Copper w [m].

Grupa	1	2	3	4(2)	4(1)	5	6	7	8	9	10	11	12(1)	12(6)
Położ.	0	1.67	2.28	3.02	3.60	4.22	4.76	5.31	6.28	5.73	6.93	7.54	8.17	11.13

W publikacji podano cyklogram o długości cyklu 320 sekund i ładowności 14. Przy użyciu metody [69] utworzono cyklogram dla procesu technologicznego Copper. Cyklogram jest gorszy od podanego w publikacji, jednak spełnia ograniczenia procesowe w przeciwieństwie do cyklogramu o długości 320. W pracy źródłowej zaznaczone jest, że w grupie nr 4 czas przetwarzania to 599.1s jednak uznano, że cyklogram można uznać za poprawny.

Tabela 3.52 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu.

Typ procesu	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowność	Czas trwania z 1 zamówienia produktem	Czas trwania z 5 zamówieniami produktami	Czas trwania z 10 zamówieniami produktami
Copper	1	356	14	01:13:00	01:36:44	02:06:24

Przeprowadzone testy mają sprawdzić ile produktów typu Copper można wyprodukować w ciągu ośmiu godzin przetwarzania przy założeniu, że co sto sekund jest zamawiany nowy produkt.

3.5.9. BlackOxide-1

Test BlackOxide-1 obejmuje jedną galwanotechniczną linię produkcyjną realizującą dwa niemal identyczne procesy technologiczne. System produkcyjny składa się z jednej kolumny, dostępny jest jeden dźwig.

Tabela 3.53 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	1
Liczba procesów technologicznych N	2
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	1
Szerokość strefy kolizyjnej b [m]	2.0
Czas podnoszenia $\overline{t_{n,i}}$ [s]	8
Czas opuszczania $\underline{t_{n,i}}$ [s]	8
Liczba stanowisk L	12

Linia produkcyjna zawiera jedną grupę wieloliczną. Grupa nr 2 zawiera dwa stanowiska robocze.

Tabela 3.54 Definicja procesu BlackOxide-1.

Krok	Nazwa procesu	Czas podnoszenia [s]	Czas opuszczania [s]	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	6	–	120	$+\infty$	1
2	Etap 1	9		180	240	12
3	Etap 2	5	8	60	90	11
4	Etap 3	8	6	60	240	10
5	Etap 4	9	8	60	90	9
6	Etap 5	3	12	60	120	8

Krok	Nazwa procesu	Czas podnoszenia [s]	Czas opuszczania [s]	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
7	Etap 6	9	9	120	180	7
8	Etap 7	4	8	60	90	6
9	Etap 8	9	8	120	145	5
10	Etap 9	3	9	60	90	4
11	Etap 10	10	8	90	120	3
12	Etap 11	3	8	240	420	2(2)
13	Rozładunek	–	8	120	–	1

Tabela 3.55 Definicja procesu BlackOxide-2.

Krok	Nazwa procesu	Czas podnoszenia [s]	Czas opuszczania [s]	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Załadunek	6	–	60	$+\infty$	1
2	Etap 1	9		180	240	12
3	Etap 2	5	8	50	90	11
4	Etap 3	8	6	60	240	10
5	Etap 4	9	8	50	90	9
6	Etap 5	3	12	60	120	8
7	Etap 6	9	9	120	180	7
8	Etap 7	4	8	60	90	6
9	Etap 8	9	8	120	180	5
10	Etap 9	3	9	40	90	4
11	Etap 10	10	8	35	120	3
12	Etap 11	3	8	240	422	2(2)
13	Rozładunek	–	8	60	–	1

Minimalny czas trwania procesu technologicznego TB_{BO-1} to 00:21:45, TB_{BO-2} to 00:20:10.

Tabela 3.56 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej BlackOxide-1 w [m].

Grupa	1	2(1)	2(2)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Położenie	0	3.00	3.40	4.1	5.2	6.4	8.0	9.0	10.0	11.1	12.5	13.3	14.3

W publikacji podano cyklogram o długości cyklu 269 sekund i ładowności 7 dla procesu BlackOxide-1, nie podano rozwiązania dla procesu BlackOxide-2. Przy użyciu metody [69] utworzono cyklogramy dla obu procesów technologicznych. Uzyskano porównywalny wynik

w przypadku procesu BlackOxide-1. Różnica wynika z zaokrągleń (zawsze w górę) czasów przejazdu dźwigu do pełnej sekundy.

Tabela 3.57 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu BlackOxide-1.

Typ procesu	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowność	Czas trwania zamówienia z 1 produktem	Czas trwania zamówienia z 5 produktami	Czas trwania zamówienia z 10 produktami
BlackOxide-1	1	293	6	00:25:46	00:45:18	01:09:43
BlackOxide-2	1	270	7	00:28:56	00:46:56	01:09:26
BlackOxide-2	2	297	6	00:26:54	00:46:42	01:11:27

Przeprowadzone testy mają podobny charakter do testów przeprowadzonych dla przypadku Kopfer-1. Dla proporcji ilościowej produktów, losowane jest 100 kolejek o różnej sekwencji zamówień. Podane wyniki oznaczają średnią długość z tych kolejek. Zbadano trzy proporcje 1xBlackOxide-1;1x BlackOxide-2, 2x BlackOxide-1;3x BlackOxide-2, 3x BlackOxide-1;2x BlackOxide-2.

3.5.10. Linia galwanotechniczna-1

Jest to rzeczywista linia galwanotechniczna, opisana w pracy [55]. Jest to jedna z niewielu przykładów systemu produkcyjnego z wieloma kolumnami. Linia ta pracuje w organizacji cyklicznej. Była ona jedną z galwanotechnicznych linii produkcyjnych, do której cyklogramy, wygenerowane przez algorytm harmonogramowania stworzony przez autora niniejszej rozprawy, zostały wdrożone do produkcji. Wcześniejsze cyklogram, utworzony przez eksperta dziedzinowego, miał długość cyklu równy 195 sekund dla ośmiu dźwigów. Natomiast przy użyciu algorytmu tworzenia cyklogramów opisanego w pracy [38] uzyskano cyklogram o długości 180 sekund dla sześciu dźwigów, co jest znaczną oszczędnością i poprawą wydajności tego systemu produkcyjnego. Jest to również największy pod względem liczby etapów procesu technologicznego, dźwigów, stanowisk, grup wielolicznych przykład analizowany w tej rozprawie.

Tabela 3.58 Parametry systemu produkcyjnego.

Parametr	Wartość parametru
Liczba dźwigów H	6
Liczba kolumn C	2
Liczba procesów technologicznych N	1
Prędkość dźwigów $v \left[\frac{m}{s} \right]$	0.7

Parametr	Wartość parametru
Szerokość strefy kolizyjnej b [m]	2.0
Czas podnoszenia $\overline{t_{n,i}}$ [s]	8
Czas opuszczania $\underline{t_{n,i}}$ [s]	8
Liczba stanowisk L	37

Linia produkcyjna zawiera sześć grup wielolicznych. Stanowisko załadowczo-rozładowcze składa się z czterech maszyn, grupa nr 4 oraz grupa nr 26 zawierają po dwa stanowiska robocze, grupa nr 10 zawiera trzy stanowiska, grupa nr 32 oraz grupa nr 34 zawierają po cztery stanowiska robocze. Brak jest stanowisk wielofunkcyjnych. Linie uzupełniają dwa transporty poprzeczne. Są one reprezentowane odpowiednio przez grupy nr 2, 18 dla pierwszego oraz grupy nr 17, 37 dla drugiego. Grupy nr 2 oraz 17 znajdują się w pierwszej kolumnie, natomiast 18 oraz 37 znajdują się w drugiej kolumnie.

Tabela 3.59 Definicja procesu LG-1.

Krok	Nazwa procesu	Czas podnoszenia [s]	Czas opuszczania [s]	Czas min. [s]	Czas maks. [s]	Numer grupy
1	Załadunek	8	–	–	$+\infty$	1(4)
2	Odtłuszczenie chemiczne I	10	8	140	$+\infty$	3(2)
3	Odtłuszczenie natryskowe	8	8	60	$+\infty$	4
4	Odtłuszczenie chemiczne II	10	8	140	$+\infty$	5
5	Odtłuszczenie anodowe I	10	8	140	$+\infty$	6
6	Płukanie gorące I	8	8	20	$+\infty$	7
7	Płukanie I	8	8	20	$+\infty$	8
8	Płukanie II	8	8	20	$+\infty$	9
9	Trawienie katodowe	10	8	400	$+\infty$	10(3)
10	Płukanie odzyskowe	10	8	30	$+\infty$	11
11	Płukanie po trawieniu I	10	8	20	$+\infty$	12
12	Płukanie po trawieniu II	8	8	30	$+\infty$	13
13	Odtłuszczenie anodowe II	10	8	100	120	14
14	Płukanie po odtłuszczeniu I	10	8	30	$+\infty$	15
15	Płukanie po odtłuszczeniu II	8	8	20	$+\infty$	16
16	Stanowisko I	8	8	20	$+\infty$	17/37
17	Neutralizacja	8	8	20		36
18	Płukanie po neutralizacji	8	8	15	75	35

Krok	Nazwa procesu	Czas podnoszenia [s]	Czas opuszczania [s]	Czas min. [s]	Czas maks. [s]	Numer grupy
19	Niklowanie wyrównawcze	10	8	660	+∞	34(4)
20	Płukanie odzyskowe po niklowaniu	8	8	20	80	33
21	Niklowanie wyblyszczające	11	8	660	+∞	32(4)
22	Płukanie odzyskowe po niklowaniu wyblyszczającym	3	8	10	100	31
23	Płukanie po niklowaniu wyblyszczającym I	3	8	10	100	30
24	Płukanie po niklowaniu wyblyszczającym II	3	8	10	100	29
25	Płukanie po niklowaniu wyblyszczającym III	3	8	10	100	28
26	Kondycjonowanie	8	8	70	140	27
27	Chromowanie	11	8	280	+∞	26(2)
28	Płukanie odzyskowe po chromowaniu I	9	8	30	+∞	25
29	Płukanie odzyskowe po chromowaniu II	8	8	30	+∞	24
30	Płukanie odzyskowe po chromowaniu III	8	8	30	+∞	23
31	Płukanie odzyskowe po chromowaniu IV	8	8	30	+∞	22
32	Płukanie demi. I	8	8	20	+∞	21
33	Płukanie demi. II	8	8	20	+∞	20
34	Płukanie gorące II	13	8	20	+∞	19
35	Stanowisko II	8	8	20	+∞	18/2
36	Rozładunek	–	8	60	+∞	1(4)

Minimalny czas trwania procesu technologicznego TB_{LG-1} to 01:02:47. Wszystkie stanowiska mają szerokość równą 0.6 metra, w grupach są zsunięte tak, że kolejne stanowiska w ramach grupy rozpoczynają się odpowiednio o wielokrotność 0.6 metra od położenia początku grupy, podanego w tabeli 3.60.

Tabela 3.60 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej [m].

Grupa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Położenie	0.05	2.53	7.75	9.13	9.88	10.58	11.28	11.98	12.71	13.61
Numer kolumny	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Grupa	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Położenie	15.75	16.46	17.16	17.86	18.56	19.26	20.02	2.53	3.23	3.93
Numer kolumny	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Grupa	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Położenie	4.63	5.33	6.03	6.73	7.43	8.13	9.43	10.13	10.83	11.53
Numer kolumny	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Grupa	31	32	33	34	35	36	37			
Położenie	12.23	12.93	15.42	16.15	18.62	19.32	20.02			
Numer kolumny	2	2	2	2	2	2	2			

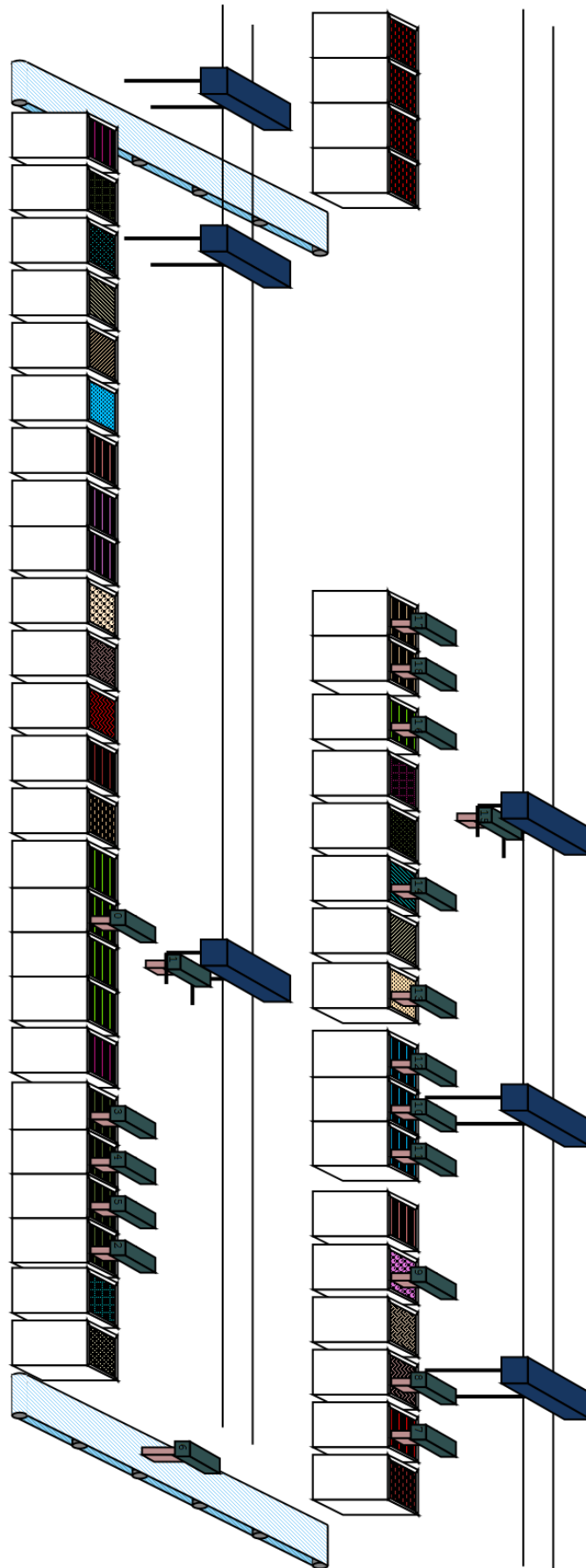
Przy użyciu metody [38] utworzono cyklogramy dla obu procesów technologicznych.

Tabela 3.61 Scenariusze dla procesów technologicznych LG-1.

Typ procesu	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowność	Czas trwania zamówienia z 1 produktem	Czas trwania zamówienia z 5 produktami	Czas trwania zamówienia z 10 produktami
LG-1	1	180	36	01:39:17	01:51:53	02:06:05
LG-1	2	185	34	01:32:29	01:44:49	02:00:13
LG-1	3	192	33	01:32:48	01:45:36	02:01:35

Na linii galwanotechnicznej został przeprowadzony test wydajności pracy w czasie rzeczywistym, oraz badanie wpływu czasu zamówienia na kryterium.

Rysunek 3.7 przedstawia widok systemu produkcyjnego LG-1 w systemie badawczym. Przetwarzane jest dziewiętnaście produktów, w tym jeden znajduje się w trakcie transportu poprzecznego.



Rysunek 3.7 Widok linii galwanotechnicznej w systemie badawczym, podczas pracy w czasie rzeczywistym

Rozdział 4. Badania symulacyjne rzeczywistej linii produkcyjnej

W rozdziale 3 zostały przeprowadzone testy działania algorytmu harmonogramowania w wielu różnych sytuacjach, dla wielu różnych systemów produkcyjnych. W niniejszym rozdziale, zostanie opisana przykładowa linia galwanotechniczna, zlokalizowana we Wrocławiu. Linia ta produkuje głównie elementy łożysk na potrzeby rynku AGD. Podjęta współpraca z właścicielem pozwoliła na uzyskanie danych procesowych, oraz danych dotyczących zarówno linii produkcyjnej jak i wykonywanej na niej produkcji. Aktualnie linia ta pracuje w cyklicznej organizacji zamówień, jednak rozważane jest wdrożenie systemu harmonogramowania w czasie rzeczywistym, a co za tym idzie wprowadzenie również możliwości produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień.

Na linii wykonywane są dwa procesy technologiczne, chromowanie oraz niklowanie. Podobnie jak w przypadkach analizowanych w poprzednim rozdziale, produkty dwóch typów są zamawiane w określonej proporcji. W ciągu tygodnia działania linii produkcyjnej produkowana jest pewna liczba produktów obu typów. Na podstawie danych historycznych, ustalono na potrzeby testów, dwie najczęściej występujące proporcje 4:1 oraz 3:2, co oznacza, że średnio na cztery chromowane produkty przypada jeden niklowany oraz analogiczna dla proporcji 3:2. Innym wnioskiem, który można wyciągnąć z analizy raportów produkcji jest bardzo rzadko zdarzające się przebrojenie linii, czyli zmiana produkowanego typu produktu. Praktycznie nie zdarza się, aby nie wyprodukowano, choć dziesięciu produktów danego typu. Wynika to zapewne z kosztów związanych z przebrojeniem w cyklicznej organizacji produkcji. Na potrzeby badań założono minimalną wielkość zamówienia, równą pięć produktów określonego typu.

Również na potrzeby testów zostało przygotowane kilka historycznych kolejek produkcji, wykonanych w cyklicznej organizacji. Pozwoli to na porównanie wydajności w przypadku wdrożenia systemu harmonogramowania w czasie rzeczywistym. Zostały również przeprowadzone pozostałe rodzaje testów z poprzedniego rozdziału.

4.1. Parametry systemu produkcyjnego

Opisywana linia galwanotechniczna składa się z jednej kolumny, dwóch dźwigów oraz dwudziestu grup. W tym jedna grupa wieloliczna, tj. grupa nr 8 składająca się z trzech stanowisk. Tabele 4.1 oraz 4.2 zawierają dane obu procesów technologicznych.

Tabela 4.1 Definicja procesu technologicznego „Chromowanie”.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Stanowisko załadowcze	40	+∞	1
2	Odtłuszczenie chemiczne	300	420	10
3	Płukanie ciepłe I	30	90	11
4	Odtłuszczenie elektrochemiczne	60	180	12
5	Płukanie ciepłe II	30	90	13
6	Płukanie I	20	80	14
7	Płukanie kaskadowe I	20	80	15
8	Płukanie kaskadowe II	20	80	16
9	Trawienie anodowe	150	210	9
10	Chromowanie techniczne	1200	1300	8(3)
11	Płukanie odzyskowe	20	80	7
12	Płukanie II	20	80	6
13	Płukanie z redukcją chromu	20	80	5
14	Płukanie III	20	80	4
15	Płukanie z ochroną czas.	20	80	3
16	Odmuch w wannie	30	90	2
17	Rozładunek	30	–	1

Tabela 4.2 Definicja procesu technologicznego „Niklowanie”.

Krok	Nazwa procesu	Czas minimalny [s]	Czas maksymalny [s]	Numer grupy
1	Stanowisko załadowcze	30	+∞	1
2	Płukanie I	20	80	4
3	Trawienie anodowe	150	300	9
4	Płukanie kaskadowe	20	80	16
5	Dekapowanie	180	300	20
6	Płukanie II	20	80	19
7	Płukanie demineralizacyjne	80	120	18
8	Niklowanie	200	300	17
9	Płukanie odzyskowe	20	80	7
10	Odmuch w wannie	50	90	2
11	Rozładunek	30	+∞	1

Minimalny czas trwania procesu technologicznego TB_{Chrom} to 00:37:20, TB_{Nikiel} to 00:15:24. Wszystkie czasy podnoszenia oraz opuszczania trwają osiem sekund.

Tabela 4.3 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej [m].

Grupa	1	2	3	4	5	6	7	8(1)	8(2)	8(3)	9
Położenie	0.00	0.64	1.26	1.88	2.50	3.13	3.78	4.55	5.45	6.35	7.16
Grupa	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Położenie	7.84	8.46	9.12	9.78	10.40	10.97	11.49	12.41	12.84	13.54	14.24

Maksymalna prędkość dźwigów to $0.7 \left[\frac{m}{s} \right]$ a szerokość strefy kolizyjnej to 2 metry. oznacza to, że w większości przypadków dźwigi muszą zachowywać co najmniej dwie grupy stanowisk odstępu. Oznacza to również, że dźwigi mogą się znajdować ponad danym stanowiskiem w odstępie co najmniej 3 sekund w domenie czasu, czyli jeśli jeden dźwig odjedzie z danego stanowiska to inny dźwig może się w nim znaleźć nie wcześniej niż po trzech sekundach. Łatwo zatem wykazać, że w organizacji cyklicznej minimalna długość cyklu to 410 sekund dla chromowania, oraz 219 sekund dla niklowania. Minimalna długość cyklu jest odpowiednikiem części e^* w dolnym oszacowaniu długości harmonogramu dla kolejki zadań. Oznacza to tyle, że produkt może być wprowadzany do systemu produkcyjnego nie częściej niż 410 oraz 219 sekund, w zależności od typu. W przeciwnym wypadku zasób krytyczny danego procesu nie jest w stanie obsłużyć produktów, aby nie zostały złamane nałożone ograniczenia.

4.2. Przygotowanie systemu harmonogramowania

Przy użyciu metody opisanej w pracy [38], wygenerowano początkowy zbiór cyklogramów, tj. 23 cyklogramy o długościach cyklu od 415 sekund do 459 sekund o ładowności 6 lub 7 dla chromowania oraz trzy cyklogramy o długości 231 sekund o ładowności 5, 256 sekund o ładowności 5 oraz 365 sekund o ładowności 3 dla niklowania.

Wykonano symulację działania linii produkcyjnej o charakterze losowym, gdzie wyprodukowano tysiąc produktów w obu proporcjach (4:1, 3:2). Podczas symulacji, dla każdego nowego segmentu sprawdzono wartość kryterium dla każdego z cyklogramów. Następnie dla cyklogramu, który minimalizował był kryterium, do ciągu uczącego dodawano wzorzec. Obliczano cechy opisujące system produkcyjny oraz jako klasę wskazywano cyklogram minimalizujący kryterium. Po ukończeniu symulacji wybrano jedynie te cyklogramy, które nadają się na scenariusze produkcji. To znaczy reprezentują znaczącą część sytuacji, z którymi można mieć do czynienia podczas produkcji. Jako scenariusze produkcji zostały wybrane cyklogramy zaprezentowane w tabeli 4.4.

Tabela 4.4 Scenariusze dla procesów technologicznych wrocławskiej linii galwanotechnicznej.

Typ procesu	Lp.	Długość cyklu [s]	Ładowność	Czas trwania zamówienia z 1 produktem	Czas trwania zamówienia z 5 produktami	Czas trwania zamówienia z 10 produktami
Chromowanie	1	415	7	00:43:48	01:11:28	01:46:03
Chromowanie	2	421	7	00:44:24	01:12:28	01:47:33
Chromowanie	3	427	6	00:42:41	01:11:09	01:46:44
Chromowanie	4	450	6	00:41:54	01:11:54	01:49:24
Niklowanie	1	231	5	00:17:53	00:33:17	00:52:32
Niklowanie	2	356	3	00:17:45	00:42:05	01:12:30

Przeprowadzono kolejną symulację działania linii produkcyjnej dla tysiąca produktów, tworząc tym samym docelowy ciąg uczący. W ten sposób przygotowano system harmonogramowania, który poddany został testom sprawdzającym wydajność produkcji, czas trwania harmonogramowania oraz wpływu czasu zamówienia na kryterium.

4.3. Wyniki

Pierwsza grupa testów związana jest z porównaniem dotychczasowej wydajności pracy systemu w cyklicznej organizacji zamówień z wynikami uzyskanymi przy pomocy proponowanego systemu harmonogramowania.

Tabela 4.5 Porównanie wartości kryterium dla produkcji jednego typu produktu.

Problem testowy	Chromowanie przez 08:00:00, przy założeniu, że co 100 sekund do kolejki dodawany jest nowy produkt	Niklowanie przez 08:00:00 przy założeniu, że co 100 sekund do kolejki dodawany jest nowy produkt
Wynik w organizacji cyklicznej	59 produktów w 07:56:54	102 produkty w 07:56:54
Wynik algorytmu selekcji scenariuszy	69 produktów w 07:59:33, 59 produktów w 07:24:58	121 produktów w 07:59:53
Różnica	O 16.94 % więcej produktów w 08:00:00, o 00:31:56 krócej wyprodukowanie 59 produktów	O 18.62 % więcej produktów w 08:00:00, o 01:10:00 krócej wyprodukowanie 102 produktów
Współczynnik zrównoleglenia	4.98	3.88
Dolne ograniczenie kryterium	07:55:11; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 0.91%	07:39:24; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 4.45%

Tabela 4.6 Porównanie wartości kryterium dla historycznych przebiegów produkcji.

Problem testowy	Kolejka 26xC; 29xN; 48xC; 8xN	Kolejka 40xC; 10xN	Kolejka 30xC; 20xN
Wynik w organizacji cyklicznej	13:37:45	06:32:42	06:03:12
Wynik algorytmu selekcji scenariuszy	12:28:14	06:05:19	05:34:39
Różnica	O 8.5% krócej, tj. o 01:09:31	O 6.97% krócej, tj. o 00:27:23	O 7.86% krócej, tj. o 00:28:33
Współczynnik zrównoleglenia	4.45	4.50	4.26
Dolne ograniczenie kryterium	11:07:19; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 12.12%	05:22:51; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 13.15%	04:50:21; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 15.25%

Pierwsza grupa testów pokazuje, że dla linii wrocławskiej, organizacja ze zmiennym strumieniem zamówień, w każdym sprawdzonym przypadku jest lepsza od organizacji cyklicznej. Wydajność tworzonych harmonogramów w niewielkim stopniu różni się od dolnego ograniczenia kryterium i jest ona od 7-18% lepsza od historycznych przebiegów produkcji.

Druga grupa testów bada pracę systemu harmonogramowania dla kolejek produktów o losowej sekwencji, zadanej proporcji liczności produktów chromowanych oraz niklowanych oraz dla różnych długości kolejek. Podczas losowania kolejek uwzględnia się ograniczenie, że zamówienie danego typu produktów ma pięć lub więcej produktów określonego typu.

Tabela 4.7 Zestawienie wyników wygenerowanych przebiegów produkcji.

Problem testowy	Średnia długość harmonogramu	Średnia liczba segmentów	Współczynnik zrównoleglenia	Dolne ograniczenie kryterium	
Kolejka produktów proporcji średnia ze 100 losowych sekwencji.	100 dla 4:1, 100	12:30:02± 00:24:38	5.25	4.39	11:04:09; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 13.02%

Problem testowy	Średnia długość harmonogramu	Średnia liczba segmentów	Współczynnik zrównoleglenia	Dolne ograniczenie kryterium
Kolejka produktów proporcji 4:1, średnia ze 100 losowych sekwencji.	60 07:29:46± dla 00:23:00	3.13	4.40	06:45:08; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 11.26%
Kolejka produktów proporcji 4:1, średnia ze 100 losowych sekwencji.	40 05:01:44± dla 00:08:56	2.07	4.37	04:38:53; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 8.72%
Kolejka produktów proporcji 3:2, średnia ze 100 losowych sekwencji.	100 13:29:03± dla 00:29:10	10.86	3.53	10:10:32; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 32.66%
Kolejka produktów proporcji 3:2, średnia ze 100 losowych sekwencji.	60 07:55:27± dla 00:26:02	6.02	3.61	06:14:33; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 27.09%
Kolejka produktów proporcji 3:2, średnia ze 100 losowych sekwencji.	40 05:12:05± dla 00:22:22	3.84	3.67	04:13:54; tj. znalezione rozwiązanie jest dłuższe od dolnego ograniczenia kryterium o 23.19%

Na podstawie wyników z tabeli 4.7 można zaobserwować, że wraz ze wzrostem liczby produktów, średnia długość harmonogramu jest coraz dłuższa oraz jest ona coraz bardziej oddalona od dolnego ograniczenia kryterium. Zmniejsza się również współczynnik zrównoleglenia systemu produkcyjnego. Mimo to, wygenerowane harmonogramy są bardzo zbliżone do teoretycznego minimum. Co ciekawe mimo iż w proporcji 4:1 więcej jest produktów o dłuższym czasie przetwarzania, zarówno średnia długość harmonogramów jak i odległość w stosunku do dolnego ograniczenia wypadają korzystniej niż w przypadku proporcji 3:2. Można to po części wytłumaczyć średnią liczbą segmentów, która jest wyższa w przypadku proporcji 3:2.

Poza tym w tabeli 4.5 w wierszu zawierającym dolne ograniczenie kryterium widać, że znalezione scenariusze dla niklowania są stosunkowo gorsze od znalezionych dla chromowania. Tym samym większa proporcja produktów niklowanych powoduje również większe odstępstwo znalezionych harmonogramów od dolnego ograniczenia kryterium. Może to również być wynikiem samego oszacowania.

Trzecia grupa testów polega na zbadaniu pracy systemu harmonogramowania w czasie rzeczywistym oraz zmierzenie wartości mających wpływ na osiągnięte wyniki. Są to testy dwójakiego rodzaju: pierwszy bada czas harmonogramowania oraz wydłużenie harmonogramu dla coraz to większych zamówień; drugi bada podobne współczynniki dla różnych czasów dodania nowego zamówienia w trakcie produkcji. Wydłużenie harmonogramu jest to różnica wartości kryterium przed testem i po teście. Test polega na tym, że generowana jest kolejka o zadanej długości oraz proporcji oraz losowej sekwencji zamówień. Do tej kolejki dodawany jest nowy segment, w teście pierwszym o różnej liczbie elementów, w teście drugim w różnym czasie. W drugim teście, czas wprowadzenia jest to czas wprowadzenia do systemu ostatniego z dotychczasowych produktów. Wyniki zawierają średnią ze stu tak przeprowadzonych testów.

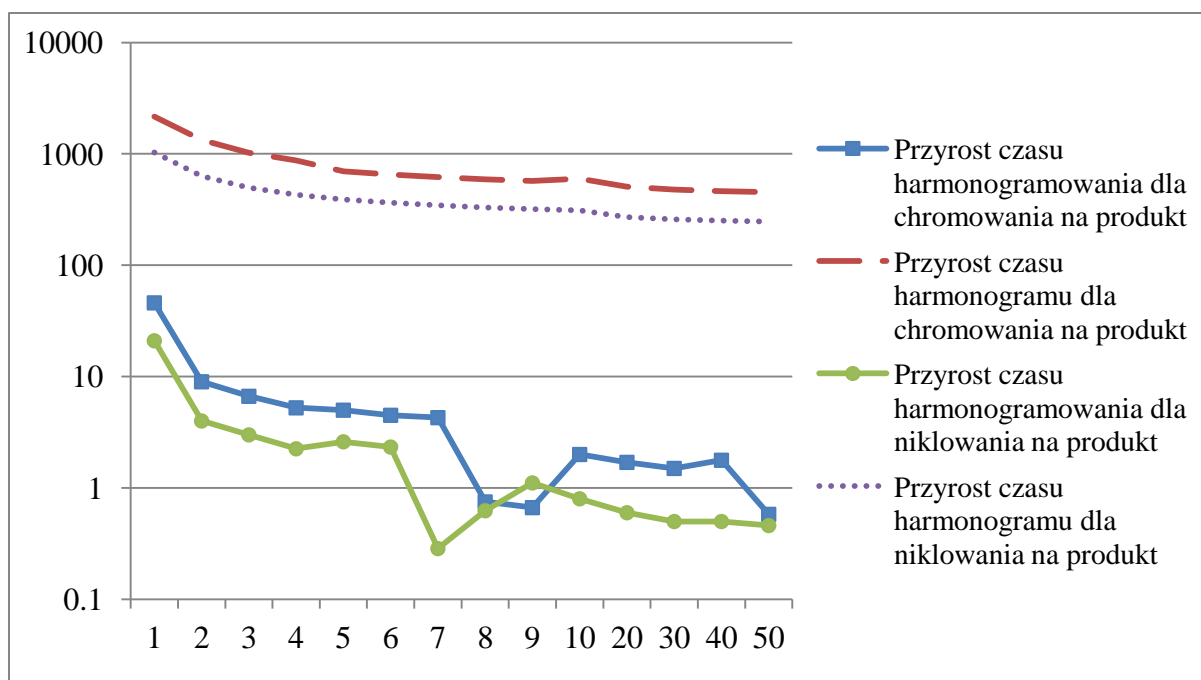
Tabela 4.8 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych wielkości segmentu dla procesu chromowania.

4:1				3:2			
Adaptacje	Wydłużenie	Czas	Czas	Adaptacje	Wydłużenie	Czas	Czas
	harm.	harm.	harm.		harm.	harm.	harm.
1	0	00:36:06	00:00:46	1	0	00:36:06	00:00:53
2	0	00:44:22	00:00:18	2	0	00:44:22	00:00:24
3	0	00:51:17	00:00:20	3	0	00:51:17	00:00:22
4	0	00:58:12	00:00:21	4	0	00:58:12	00:00:25
5	0	00:58:12	00:00:25	5	0	01:05:07	00:00:27
6	0	01:05:07	00:00:27	6	0	01:12:02	00:00:30
7	0	01:12:02	00:00:30	7	0	01:18:57	00:00:06
8	0	01:18:57	00:00:06	8	0	01:25:52	00:00:06
9	0	01:25:52	00:00:06	9	0	01:32:47	00:00:23
10	0	01:39:42	00:00:20	10	0	01:39:42	00:00:33
20	0	02:48:52	00:00:34	20	0	02:48:52	00:00:50
30	0	03:58:02	00:00:45	30	0	03:58:02	00:00:50
40	0	05:07:12	00:01:11	40	0	05:07:12	00:00:54
50	0	06:16:22	00:00:29	50	0	06:16:22	00:01:38

Tabela 4.9 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych wielkości segmentu dla procesu niklowania.

4:1	Adaptacje	Wydłużenie harm.	Czas harm.	3:2	Adaptacje	Wydłużenie harm.	Czas harm.
1	0	00:17:07	00:00:21	1	0	00:17:07	00:00:24
2	0	00:20:58	00:00:08	2	0	00:20:58	00:00:15
3	0	00:24:49	00:00:09	3	0	00:24:49	00:00:12
4	0	00:28:40	00:00:09	4	0	00:28:40	00:00:12
5	0	00:32:31	00:00:13	5	0	00:32:31	00:00:13
6	0	00:36:22	00:00:14	6	0	00:36:22	00:00:14
7	0	00:40:13	00:00:02	7	0	00:40:13	00:00:02
8	0	00:44:04	00:00:05	8	0	00:44:04	00:00:05
9	0	00:47:55	00:00:10	9	0	00:47:55	00:00:10
10	0	00:51:46	00:00:08	10	0	00:51:46	00:00:14
20	0	01:30:16	00:00:12	20	0	01:30:16	00:00:19
30	0	02:08:46	00:00:15	30	0	02:08:46	00:00:13
40	0	02:47:16	00:00:20	40	0	02:47:16	00:00:15
50	0	03:25:46	00:00:23	50	0	03:25:46	00:00:23

Test przeprowadzono przy założeniu, że produkty są zamawiane na sto sekund przed wprowadzeniem ostatniego produktu z dotychczasowej kolejki. Jako dotychczasowe kolejki służyły kolejki 40 produktów o losowej sekwencji zamówień z poprzedniego badania. Kolejki składały się z segmentów nie krótszych niż pięć produktów. Wyniki podane są dla stu losowych kolejek. Kolumna „Wydłużenie harm.” zawiera różnicę między średnią długością harmonogramów po uwzględnieniu nowego zamówienia a średnią długością harmonogramów przed jego dodaniem. Przeprowadzony test pokazuje, że wraz z ze zwiększeniem liczby zamawianych produktów długość harmonogramowania w nieznacznym stopniu rośnie. Układanie harmonogramu dla niklowania trwa krócej, co można wyjaśnić mniejszą liczbą etapów procesu technologicznego. Podczas badań ani jeden przykład nie wymagał ponownej aktualizacji. Wyniki dla obu analizowanych proporcji są identyczne.



Rysunek 4.1 Czasy trwania harmonogramowania w stosunku do horyzontu czasowego harmonogramowania dla procesów niklowania oraz chromowania

Rysunek 4.1 przedstawia, podobnie jak w rozdziale 3.2.3.2 wykresy przyrostu czasu harmonogramowania oraz czasu trwania harmonogramu, w zależności od liczby nowo zamówionych produktów. System harmonogramowania ma prawo działać w czasie rzeczywistym, ponieważ horyzont czasowy harmonogramu oddala się w większym stopniu, niż trwa proces układania harmonogramu.

Tabela 4.10 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów zamówienia względem czasu wprowadzenia dla chromowania.

4:1	Adaptacje	Wydłużenie	Czas	3:2	Adaptacje	Wydłużenie	Czas
		harm.	harm.			harm.	harm.
500	0	01:05:08	00:00:04	500	0	01:05:08	00:00:04
600	0	01:05:08	00:00:03	600	0	01:05:12	00:00:03
700	0	01:05:20	00:00:01	700	0	01:05:24	00:00:01
800	0	01:07:39	00:00:01	800	0	01:08:02	00:00:01
900	0	01:08:58	00:00:01	900	0	01:08:56	00:00:01
1000	0	01:10:23	00:00:01	1000	0	01:10:36	00:00:01
1100	0	01:11:28	00:00:01	1100	0	01:11:28	00:00:01
1200	0	01:11:38	00:00:01	1200	0	01:11:36	00:00:01
1300	0	01:13:18	00:00:01	1300	0	01:13:18	00:00:01

W pierwszej i piątej kolumnie tabeli 4.10 znajdują się wartości czasu dodania nowego zamówienia do kolejki. Są to czasy względem czasu wprowadzenia ostatniego produktu

z dotychczasowej kolejki. Segment pięciu produktów przeznaczonych do chromowania ma długość około 01:11:09. W przypadku chromowania czas adaptacji mniejszy niż 500 sekund nie ma wpływu na otrzymywany wynik, który wydłuża się zawsze o 01:05:08. Dzieje się tak dlatego, że wcześniejsze wprowadzenie produktu niż 500 sekund od wprowadzenia ostatniego produktu z dotychczasowej kolejki skutkuje brakiem możliwości znalezienia poprawnego rozwiązania. Wraz ze wzrostem czasu zamówienia do 1200 sekund uzyskiwany harmonogram jest coraz mniej wydajny. Jest to konsekwencja coraz późniejszego wprowadzenia produktów nowego typu, czyli wynika wprost z ograniczenia (2.18) oraz jego konsekwencji. Coraz mniejszy czas harmonogramowania, odnotowany w kolumnie „Czas harm.”, ma związek z coraz mniejszym zakresem przesunięć segmentu do analizy. Od zamówienia około 1100 sekund po wprowadzeniu ostatniego dotychczasowego wzwyż, czas trwania wynikowego harmonogramu jest równy wprost 01:11:09 plus każda sekunda ponad te 1100 sekund. Zgodnie z oczekiwaniami test pokazuje, że coraz późniejsze dodawanie nowego zamówienia ma niekorzystny wpływ na kryterium. Im później zostaje dodane nowe zamówienie tym mniejszy obszar decyzyjny dla algorytmu harmonogramowania. Mimo to, uzyskanie najlepszej wydajności jest stosunkowo łatwe. Nawet jeśli nowe zamówienie nie zostało wyspecyfikowane aż do 500 sekund po wprowadzeniu ostatniego produktu, nadal można uzyskać najlepszy wynik.

Tabela 4.11 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów zamówienia względem czasu wprowadzenia dla niklowania.

4:1	Adaptacje	Wydłużenie	Czas	3:2	Adaptacje	Wydłużenie	Czas
		harm.	harm.			harm.	harm.
2400	0	00:32:31	<00:00:01	2400	0	00:32:31	<00:00:01
2420	0	00:32:31	<00:00:01	2420	0	00:32:31	<00:00:01
2430	0	00:32:37	<00:00:01	2430	0	00:32:37	<00:00:01
2440	0	00:33:17	<00:00:01	2440	0	00:33:17	<00:00:01
2470	0	00:33:17	<00:00:01	2470	0	00:33:17	<00:00:01
2480	0	00:33:27	<00:00:01	2480	0	00:33:27	<00:00:01
2500	0	00:33:47	<00:00:01	2500	0	00:33:47	<00:00:01
2600	0	00:35:27	<00:00:01	2600	0	00:35:27	<00:00:01

Dla niklowania uzyskano podobne rezultaty jak w przypadku chromowania. Różnica polega jedynie na tym, że o ile w przypadku chromowania przy odpowiednio wcześnie dodanym zamówieniu nowy segment może być krótszy o około 00:06:30, to w przypadku niklowania można zyskać jedynie 00:00:46. Można jednak podać przykład kolejki, gdzie proces niklowania udaje się lepiej wpasować w produkcję. Tabela 4.12 zawiera wyniki dla różnych czasów zamówienia względem czasu wprowadzenia ostatniego produktu do systemu produkcyjnego.

W dotychczasowej kolejce znajdują się dwa produkty przeznaczone do chromowania. Nowe zamówienie składa się z jednego produktu przeznaczonego do niklowania.

Tabela 4.12 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów dla kolejki 2xC, 1xN.

Przesunięcie	Adaptacje	Wydłużenie harmonogramu	Czas harmonogramowania	Czas trwania harmonogramu
1100	0	00:00:00	<00:00:01	00:48:31
1180	0	00:00:00	<00:00:01	00:48:31
1181	0	00:17:08	<00:00:01	01:05:38
2430	0	00:17:13	<00:00:01	01:05:44
2440	0	00:17:53	<00:00:01	01:06:24
2470	0	00:17:53	<00:00:01	01:06:24
2500	0	00:18:23	<00:00:01	01:06:54
2600	0	00:20:03	<00:00:01	01:08:34

Dolne ograniczenie kryterium dla takiej kolejki to 00:38:08. Zamówienie produktu wymagającego niklowania, aż do 1180 sekund po wprowadzeniu drugiego produktu wymagającego chromowania skutkuje tym, że nowe zamówienie nie zmienia czasu trwania wynikowego harmonogramu.

4.4. Omówienie praktycznego przykładu

Uzyskane wyniki dla rzeczywistego obiektu harmonogramowania okazały się nawet lepsze niż dla przykładów analizowanych w rozdziale 3. Dla losowych sekwencji zamówień, najgorszy wynik był tylko o jedną trzecią gorszy niż dolne oszacowanie kryterium. Pozostawia to niewielkie pole do poprawienia harmonogramów, o ile to możliwe. System harmonogramowania bez problemu obsługuje linię produkcyjną w czasie rzeczywistym, na maszynie testowej, co pokazuje rysunek 4.1. W porównaniu do historycznych przebiegów i wydajności w pracy cyklicznej uzyskano harmonogramy o 6%–18% bardziej wydajne.

W prezentowanym przykładzie, wdrożenie organizacji ze zmiennym strumieniem zamówień pozwoliło na lepsze wykorzystanie zasobów oraz dało możliwość mniej kosztownej realizacji produkcji dwóch procesów technologicznych.

Rozdział 5. Podsumowanie

W ramach rozprawy zaproponowano system harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla systemów produkcyjnych z transportem dźwigowym oraz elastycznymi czasami przetwarzania. W skład tego wchodzi algorytm harmonogramowania oparty o metody rozpoznawania. Stworzone algorytmy charakteryzują się jedynie liniową złożonością obliczeniową w stosunku do jedyne go zmieniającego się w czasie parametru mającego wpływ na czas harmonogramowania.

Opracowano algorytm zdolny do synchronizacji ze środowiskiem systemu produkcyjnego, w którym obsługuje się nowe zamówienia oraz zapewnia poprawne wdrożenie zaktualizowanego harmonogramu do systemu produkcyjnego. System harmonogramowania dzieli nowe zamówienia na części, które są następnie parametrem zadania harmonogramowania. System estymuje czas trwania rozwiązywania zadania harmonogramowania przez algorytm selekcji scenariuszy, ustala horyzont czasowy i inicjuje rozwiązywanie zadania harmonogramowania. Po ukończeniu harmonogramowania, system bada możliwość implementacji nowego harmonogramu do systemu produkcyjnego.

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz przykładu rzeczywistego systemu produkcyjnego wynika, że proponowany system harmonogramowania ma zdolność pracy w czasie rzeczywistym. Biorąc pod uwagę, że badania przeprowadzono na umiarkowanie szybkiej maszynie oraz to, że proces harmonogramowania trwał o dwa rzędy wielkości krócej niż długość wytworzonego harmonogramu, można wnioskować, że system ten może sprawdzić się w wielu systemach produkcyjnych.

Wykonane badania pokazały również, że wygenerowane wyniki są w większości przypadków lepsze od wyników otrzymywanych w literaturze. W przypadku harmonogramowania rzeczywistej linii galwanotechnicznej, wyniki były lepsze od stosowanych przez użytkowników tej linii. Pokazano również, że wyniki te są bardzo bliskie teoretycznemu maksimum wydajności.

Utworzony algorytm harmonogramowania obejmuje wszystkie spotykane w literaturze oraz niemal wszystkie spotykane w praktyce cechy charakterystyczne systemów produkcyjnych o transporcie dźwigowym. Obsługiwane jest wiele dźwigów, przy zaawansowanym modelu kolizji oraz prostym modelu ruchu. Nie jest ograniczona swoboda w definicji procesu

technologicznego. Dopuszczone są grupy stanowisk oraz stanowiska wielofunkcyjne. Obsługiwana jest produkcja wielu procesów technologicznych oraz rodzin produktów. System pozwala na znajdowanie harmonogramów dla zamówień jednokrotnych jak również dla zamówień spływających w czasie rzeczywistym. Proponowana metoda jest jedynym znanym autorowi rozwiązaniem pozwalającym na pracę w organizacji ze zmiennym strumieniem zamówień dla linii wielokolumnowych. Jest to oryginalny wkład autora w dziedzinę harmonogramowania dźwigów.

Algorytm harmonogramowania opiera się na kilku heurystykach, które w kontrolowany sposób zmniejszają liczbę zmiennych decyzyjnych problemu. W oryginalnym zadaniu harmonogramowania występuje problem alokacji, wymagający ustalenia wartościowania zmiennej $h_{k,i}$. Wymaga to sprawdzenia $H^{I''}$ możliwości. Do ustalenia wartości zmiennych $t_{k,i}$ oraz $\bar{t}_{k,i}$ należy ustalić odpowiednie czasy rozpoczęcia i zakończenia etapów procesu technologicznego, co jest odpowiednikiem rozwiązania problemu plecakowego [38]. Pozostaje odszukanie poprawnej marszruty dźwigów oraz alokacja produktów do stanowisk w ramach grup wielolicznych ($a_{k,i}$). Dzięki zastosowaniu procedury rozwijania cyklogramów, zmienne $h_{k,i}$, $t_{k,i}$, $\bar{t}_{k,i}$ oraz $a_{k,i}$ sprzężone są do jedynie jednej zmiennej τ_{seg} , której dziedzina jest dodatkowo w dużym stopniu pomniejszona przez nałożone ograniczenia. Przy pomocy metod rozpoznawania wybiera się scenariusz, który decyduje o tym, w jaki sposób liczbowo sprzężone są parametry scenariusza ze zmiennymi zadania harmonogramowania. Algorytm uzupełnia heurystyczna metoda marszrutowania dźwigów, dzięki której odszukuje się odpowiednie dopasowanie nowych operacji systemu produkcyjnego w stosunku do dotychczasowych operacji.

5.1. Plan dalszych badań

W ramach opracowanego rozwiązania dokonywano wyboru scenariusza dla kolejnego segmentu, przy użyciu danych opisujących stan systemu produkcyjnego. Odpowiada to optymalizacji lokalnej, gdzie przeprowadza się optymalizację jedynie jednego kroku naprzód. Można dokonać modyfikacji problemu rozpoznawania, aby wybierać scenariusze uwzględniając kolejne segmenty, oraz dotychczasowe segmenty.

Uzupełnieniem badań oraz zaimplementowanego systemu badawczego byłoby wykorzystanie modelu ruchu dźwigu, innego niż prosty. Model uwzględniający przyspieszenie wprowadziłby dodatkowy stopień realizmu systemu harmonogramowania.

W rozprawie nie odnoszono się do problemu optymalnego doboru kolejności zamówień. Z badań wynikało, że kolejność zamówień ma znaczny wpływ na osiągnięte rezultaty. Opracowanie algorytmu wspierającego użytkownika w dodawaniu zamówień pozwoliłoby na osiągnięcie jeszcze lepszych rezultatów.

Spis najważniejszych oznaczeń

Symbol	Opis
\mathbb{R}	zbiór liczb rzeczywistych
\mathbb{N}	zbiór liczb naturalnych
n	indeks typów produktów
l	indeks grup stanowisk roboczych
h	indeks dźwigów dostępnych na linii
k	indeks produktów w kolejce
c	indeks zbioru kolumn
\mathcal{N}	zbiór zdefiniowanych procesów technologicznych – typów produktów
\mathcal{L}	zbiór grup stanowisk roboczych dostępnych w systemie produkcyjnym
\mathcal{H}	zbiór dźwigów pracujących na linii
\mathcal{C}	zbiór kolumn stanowisk roboczych
\mathcal{X}	kolejka produktów do przetworzenia
N	liczba zdefiniowanych procesów technologicznych
L	liczba grup stanowisk roboczych
C	liczba kolumn, które tworzą system produkcyjny
K	liczba produktów w kolejce produktów do przetworzenia
$G_l \in \{G_1, \dots, G_L\}$	liczba stanowisk w l -tej grupie roboczej
$P_{l,y}$	położenie w osi dźwigów względem początku linii produkcyjnej stanowiska y -tego grupy l -tej
C^H	relacja określająca przynależność dźwigu do kolumny
C^L	relacja określająca przynależność stanowiska roboczego do kolumny
b	szerokość strefy kolizyjnej dźwigów
v	prędkość maksymalna przemieszczania się dźwigów
$m_{n,i}$	czas minimalny i -tego etapu przetwarzania n -tego typu produktu
$M_{n,i}$	czas maksymalny i -tego etapu przetwarzania n -tego typu produktu
$\bar{t}_{n,i}$	czas podnoszenia i -tego etapu przetwarzania n -tego typu produktu

Symbol	Opis
$\underline{t}_{n,i}$	czas opuszczania i -tego etapu przetwarzania n -tego typu produktu
$\bar{t}_{k,i}$	czas oznaczający chwilę podniesienia k -tego produktu w i -tym etapie procesu technologicznego $n = z(k)$
$\underline{t}_{k,i}$	czas oznaczający chwilę opuszczenia k -tego produktu w i -tym etapie procesu technologicznego $n = z(k)$
$h_{k,i}$	Numer dźwigu dokonującego podniesienia k -tego produktu w i -tym etapie procesu technologicznego. Również numer dźwigu dokonującego opuszczenia k -tego produktu w $i+1$ -szym etapie procesu technologicznego
$a_{k,i}$	numer stanowiska roboczego w grupie realizującej i -ty etap, k -tego produktu
$U(h, \tau)$	położenie h -tego dźwigu w chwili τ
TB_n	czas trwania całego n -tego procesu technologicznego

Spis Ilustracji

Rysunek 1.1 Podstawowe operacje systemu harmonogramowania	20
Rysunek 1.2 Widok linii produkcyjnej	25
Rysunek 1.3 Operacja transportowa dźwigu.....	26
Rysunek 1.4 Linia produkcyjna z wieloma kolumnami.....	29
Rysunek 1.5 Różne układy procesów technologicznych dla linii wielokolumnowych.....	30
Rysunek 2.1 Poglądowy obraz sposobu działania systemu harmonogramowania.....	51
Rysunek 2.2 System harmonogramowania z uwzględnieniem segmentacji.....	83
Rysunek 2.3 Figury reprezentujące operacje dźwigu w przestrzeni kolizyjnej	85
Rysunek 2.4 Wycinek harmonogramu z oznaczonymi strefami kolizyjnymi.....	85
Rysunek 2.5 Zarys algorytmu układania marszrut.....	87
Rysunek 2.6 Strategie marszrut.....	88
Rysunek 2.7 Figury reprezentujące operacje dźwigu w przestrzeni kolizyjnej dla modelu ruchu z przyspieszeniem.....	89
Rysunek 3.1 Zależność czasu trwania obliczeń od liczby kroków procesu technologicznego	100
Rysunek 3.2 Zależność czasu trwania obliczeń od czasu trwania procesu technologicznego $M_{n,i}$...	102
Rysunek 3.3 Zależność czasu obliczeń od liczby zamówionych produktów K	104

Rysunek 3.4 Długości harmonogramu dla 10692 kolejek, posortowane rosnąco od najkrótszej	114
Rysunek 3.5 Czasy harmonogramowania w stosunku do horyzontu czasowego harmonogramowania	119
Rysunek 3.6 Elementy graficznej reprezentacji harmonogramu	123
Rysunek 3.7 Widok linii galwanotechnicznej w systemie badawczym, podczas pracy w czasie rzeczywistym	148
Rysunek 4.1 Czasy trwania harmonogramowania w stosunku do horyzontu czasowego harmonogramowania dla procesów niklowania oraz chromowania	157

Spis Tabel

Tabela 2.1 Parametry rozwiązywanego zadania harmonogramowania	53
Tabela 2.2 Zmienne decyzyjne zadania harmonogramowania	55
Tabela 2.3 Zmienne decyzyjne cyklicznego zadania harmonogramowania	65
Tabela 2.4 Opis przestrzeni cech \mathcal{X}_n opisujących rozpoznawany stan procesu	75
Tabela 2.5 Cyklogramy wybrane jako scenariusze produkcji ze zmiennym strumieniem zamówień	77
Tabela 2.6 Parametry losowania przykładów uczących	78
Tabela 2.7 Priorytety strategii układania marszrut	88
Tabela 2.8 Opis parametrów związanych z wielkością problemu	91
Tabela 3.1 Założenia testu zależności czasu obliczeń od liczby maksymalnej liczby kroków I	99
Tabela 3.2 Wyniki dla testu zależności czasu obliczeń od liczby maksymalnej liczby kroków I , czas obliczeń w sekundach	99
Tabela 3.3 Założenia testu zależności czasu obliczeń od wielkości zbioru przesunięć \mathcal{F}	100
Tabela 3.4 Wyniki dla testu zależności czasu obliczeń od wielkości zbioru przesunięć \mathcal{F} , czas obliczeń w sekundach	101
Tabela 3.5 Założenia testu zależności czasu obliczeń od wielkości zamówienia K	102
Tabela 3.6 Średni czas obliczeń w sekundach dla wielkości zamówienia K	103
Tabela 3.7 Porównanie wartości kryterium dla przykładów przedstawionych w literaturze	108
Tabela 3.8 Zrównoleglenie oraz dolne ograniczenie kryterium systemu produkcyjnego dla przykładów przedstawionych w literaturze	109
Tabela 3.9 Wyniki przeprowadzonych testów dla danych syntetycznych	110
Tabela 3.10 Zrównoleglenie oraz dolne ograniczenie kryterium systemu produkcyjnego dla danych syntetycznych	111
Tabela 3.11 Badanie wpływu zastosowania metod rozpoznawania na jakość harmonogramów	115
Tabela 3.12 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów nowego zamówienia dla testu Linia galwanotechniczna-1, do kolejki 10 produktów dodano jeden nowy	116
Tabela 3.13 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów nowego zamówienia dla testu Linia galwanotechniczna-1, do kolejki 10 produktów dodano pięć nowych	117
Tabela 3.14 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych wielkości segmentu dla procesu LG-1	117
Tabela 3.15 Tekstowa wersja harmonogramu z rysunku 3.6 dla pierwszego dźwigu	124
Tabela 3.16 Tekstowa wersja harmonogramu z rysunku 3.6 dla drugiego dźwigu	124

Tabela 3.17 Parametry systemu produkcyjnego.....	125
Tabela 3.18 Definicja procesu PhU-1.....	125
Tabela 3.19 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej PhU-1 w [m].	126
Tabela 3.20 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu PhU-1.	126
Tabela 3.21 Parametry systemu produkcyjnego.....	127
Tabela 3.22 Definicja oryginalnego procesu Matile-1.....	127
Tabela 3.23 Definicja procesów Matile-2, Matile-3.	128
Tabela 3.24 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej Matile-1 w [m].	128
Tabela 3.25 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Matile-1.....	128
Tabela 3.26 Parametry systemu produkcyjnego.....	129
Tabela 3.27 Definicja oryginalnego procesu Jiyin-1.	129
Tabela 3.28 Definicja dodatkowego procesu Jiyin-2.	130
Tabela 3.29 Definicja dodatkowego procesu Jiyin-3.	130
Tabela 3.30 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej Jiyin-1 w [m].	131
Tabela 3.31 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Jiyin-1.	131
Tabela 3.32 Parametry systemu produkcyjnego.....	132
Tabela 3.33 Definicja procesu Che-1.....	132
Tabela 3.34 Definicja procesów Che-2, Che-3.....	133
Tabela 3.35 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej Che-1 w [m].	133
Tabela 3.36 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Che-1.....	133
Tabela 3.37 Parametry systemu produkcyjnego.....	134
Tabela 3.38 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Jegou-1.....	135
Tabela 3.39 Scenariusz procesu technologicznego dla przykładu Jegou-1.	136
Tabela 3.40 Parametry systemu produkcyjnego.....	136
Tabela 3.41 Definicja procesu CAA.....	136
Tabela 3.42 Definicja procesu YAL.	137
Tabela 3.43 Definicja procesu SAD.....	137
Tabela 3.44 Definicja procesu SAS.	137
Tabela 3.45 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu Kopfer-1.	138
Tabela 3.46 Parametry systemu produkcyjnego.....	139
Tabela 3.47 Definicja procesu DEGEM-1.....	139
Tabela 3.48 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu DEGEM-1.....	140
Tabela 3.49 Parametry systemu produkcyjnego.....	140
Tabela 3.50 Definicja oryginalnego procesu.	141
Tabela 3.51 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej Copper w [m].	141
Tabela 3.52 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu.	142
Tabela 3.53 Parametry systemu produkcyjnego.....	142
Tabela 3.54 Definicja procesu BlackOxide-1.	142
Tabela 3.55 Definicja procesu BlackOxide-2.	143
Tabela 3.56 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej BlackOxide-1 w [m].	143
Tabela 3.57 Scenariusze poszczególnych procesów technologicznych dla przykładu BlackOxide-1. .	144
Tabela 3.58 Parametry systemu produkcyjnego.....	144
Tabela 3.59 Definicja procesu LG-1.....	145
Tabela 3.60 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej [m].....	147
Tabela 3.61 Scenariusze dla procesów technologicznych LG-1.	147

Tabela 4.1 Definicja procesu technologicznego „Chromowanie”	150
Tabela 4.2 Definicja procesu technologicznego „Niklowanie”	150
Tabela 4.3 Położenia stanowisk dla linii produkcyjnej [m].....	151
Tabela 4.4 Scenariusze dla procesów technologicznych wrocławskiej linii galwanotechnicznej.	152
Tabela 4.5 Porównanie wartości kryterium dla produkcji jednego typu produktu.	152
Tabela 4.6 Porównanie wartości kryterium dla historycznych przebiegów produkcji.....	153
Tabela 4.7 Zestawienie wyników wygenerowanych przebiegów produkcji.	153
Tabela 4.8 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych wielkości segmentu dla procesu chromowania.	155
Tabela 4.9 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych wielkości segmentu dla procesu niklowania.....	156
Tabela 4.10 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów zamówienia względem czasu wprowadzenia dla chromowania.....	157
Tabela 4.11 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów zamówienia względem czasu wprowadzenia dla niklowania.	158
Tabela 4.12 Zestawienie wyników harmonogramowania w czasie rzeczywistym dla różnych czasów dla kolejki 2xC, 1xN.....	159

Bibliografia

- [1]. Ada, C., C. Chengbin, and C. Feng, *Multicyclic Hoist Scheduling with Constant Processing Times*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002. **18**(1): p. 69-80.
- [2]. Agarwal and A., *Augmented Neural Networks for Task Scheduling*. European Journal of Operational Research, 2003. **151**(3): p. 481-502.
- [3]. Akyol, D. and G. Bayhan, *A Review on Evolution of Production Scheduling with Neural Networks*. Computers & Industrial Engineering, 2007. **53**(1): p. 95-122.
- [4]. Akyol, D.E., *Application of Neural Networks to Heuristic Scheduling Algorithms*. Computers & Industrial Engineering, 2004. **46**(4): p. 679-696.
- [5]. Angkasith, V. and J. Pongsue. *Design of Time-Way for "H" Configuration of Electroplating Machine*. in *2010. WKDD '10. Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2010. p. 138-141.
- [6]. Banaszak, Z. and J. Józefczyk. *Evolutionary Algorithm with Learning for Scheduling of Manufacturing Tasks with Moving Executors*. 2001. Wrocław. p. 187-194.
- [7]. Baptiste, P., B. Legeard, and C. Varnier. *Hoist Scheduling Problem: An Approach Based on Constraint Logic Programming*. in *1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1992. p. 1139-1144 vol.2.
- [8]. Bhushan, S. and I.A. Karimi, *Heuristic Algorithms for Scheduling an Automated Wet-Etch Station*. Computers & Chemical Engineering, 2004. **28**(3): p. 363-379.
- [9]. Bishop, C., *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press, Oxford, 1996.

- [10]. Bloch, C. and M.A. Manier. *Notation and Typology for the Hoist Scheduling Problem*. in *IEEE SMC '99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. 1999. p. 475-480.
- [11]. Błażewicz, J., et al., *Handbook on Scheduling: From Theory to Applications*. 2007.
- [12]. Brucker, P. and T. Kampmeyer, *A General Model for Cyclic Machine Scheduling Problems*. *Discrete Applied Mathematics*, 2008. **156**(13): p. 2561-2572.
- [13]. Chauvet, F., et al., *On-Line Scheduling in a Surface Treatment System*. *European Journal of Operational Research*, 2000. **120**(2): p. 382-392.
- [14]. Che, A. and C. Chu, *Single-Track Multi-Hoist Scheduling Problem: A Collision-Free Resolution Based on a Branch-and-Bound Approach*. *International Journal of Production Research*, 2004. **42**(12): p. 2435 - 2456.
- [15]. Che, A. and C. Chu, *A Polynomial Algorithm for No-Wait Cyclic Hoist Scheduling in an Extended Electroplating Line*. *Operations Research Letters*, 2005. **33**(3): p. 274-284.
- [16]. Che, A. and C. Chengbin. *A Polynomial Algorithm for No-Wait Cyclic Multi-Hoist Scheduling*. in *2006 International Conference on Service Systems and Service Management*. 2006. p. 1156-1161.
- [17]. Che, A. and C. Chu, *Cyclic Hoist Scheduling in Large Real-Life Electroplating Lines*. *OR Spectrum*, 2007. **29**(3): p. 445-470.
- [18]. Che, A. and C. Chu, *Multi-Degree Cyclic Scheduling of a No-Wait Robotic Cell with Multiple Robots*. *European Journal of Operational Research*, 2009. **199**(1): p. 77-88.
- [19]. Cheng-Chung, C. and S.F. Smith. *A Constraint-Posting Framework for Scheduling under Complex Constraints*. in *1995. ETFA '95, Proceedings., 1995 INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation*. 1995. p. 269-280 vol.1.
- [20]. Cheng-Chung, C. and S.F. Smith, *Applying Constraint Satisfaction Techniques to Job Shop Scheduling*. *Annals of Operations Research*, 1997. **70**(1-4): p. 327-357.
- [21]. Cheng, C.-C. and S.F. Smith, *A Constraint-Posting Framework for Scheduling under Complex Constraints*, in *Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation (INRIA/IEEE)*. 1995: Belfort, France. p. 269–280.
- [22]. Chung-Yee, L., L. Lei, and M. Pinedo, *Current Trends in Deterministic Scheduling*. *Annals of Operations Research*, 1997. **70**(1-4): p. 1-41.
- [23]. Collart Dutilleul, S. and J.P. Denat. *P-Time Petri Nets and the Hoist Scheduling Problem*. in *1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. 1998. p. 558-563 vol.1.
- [24]. Dudek-Dyduch, E. and T. Dyduch, *Learning Algorithms for Scheduling Using Knowledge Based Model*, in *Artificial Intelligence and Soft Computing – Icaisc 2006*, L. Rutkowski, et al., Editors. 2006, Springer Berlin / Heidelberg. p. 1091-1100.

- [25]. El Amraoui, A., et al., *Robustness Integration in a Transport Scheduling Problem*. International Review of Automatic Control, 2009. **2**(4): p. 476-480.
- [26]. Fargier, H. and J. Lamothe, *Handling Soft Constraints in Hoist Scheduling Problems: The Fuzzy Approach*, in *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2001, Elsevier Science. p. 387-399.
- [27]. Fiedler, C., W. Meyer, and A. von Drathen. *Designing Transitory Routing Controllers for Hybrid Plants*. in *CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications*. 2005. p. 934-939.
- [28]. Fiedler, C. *Event-Driven Generation of Periodic Hoist Schedules*. in *SMC '06. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2006. p. 2717-2722.
- [29]. Fleury, G., M. Gourgand, and P. Lacomme, *Metaheuristics for the Stochastic Hoist Scheduling Problem (Shsp)*. International Journal of Production Research, 2001. **39**(15): p. 3419 - 3457.
- [30]. Frohlich, R. and S.C. Steneberg. *Optimal Cyclic Multiple Hoist Scheduling for Processes with Loops and Parallel Resources*. in *SMC 2009. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2009. p. 287-292.
- [31]. Haoxun, C., C. Chengbin, and J.M. Proth, *Cyclic Scheduling of a Hoist with Time Window Constraints*. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 1998. **14**(1): p. 144-152.
- [32]. Hindi, K.S. and K. Fleszar, *A Constraint Propagation Heuristic for the Single-Hoist, Multiple-Products Scheduling Problem*. Computers & Industrial Engineering, 2004. **47**(1): p. 91-101.
- [33]. Jégou, D., et al., *A Contract Net Based Intelligent Agent System for Solving the Reactive Hoist Scheduling Problem*. Expert Systems with Applications, 2006. **30**(2): p. 156-167.
- [34]. Jia-Wei, Y., et al. *Multiobjective Lot Scheduling and Dynamic Oht Routing in a 300-Mm Wafer Fab*. in *SMC 2008. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2008. p. 1608-1613.
- [35]. Jiyin, L., J. Yun, and Z. Zhili, *Cyclic Scheduling of a Single Hoist in Extended Electroplating Lines: A Comprehensive Integer Programming Solution*. IIE Transactions, 2002. **34**(10): p. 905.
- [36]. John, G. and P. Langley, *Estimating Continuous Distributions in Bayesian Classifiers*. Proceedings of the eleventh conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, 1995.
- [37]. Kats, V., E. Levner, and L. Meyzin, *Multiple-Part Cyclic Hoist Scheduling Using a Sieve Method*. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1999. **15**(4): p. 704-713.
- [38]. Kujawski, K., *Zagadnienie Optymalizacji Działania Wybranych Linii Produkcyjnych, Praca Dyplomowa*, in *Wydział Informatyki i Zarządzania*. 2006, Politechnka Wrocławska: Wrocław, Polska. p. 79.

- [39]. Kujawski, K. and J. Świątek, *Using Cyclogram Unfolding in Dynamic Hoist Scheduling Problem*, in *Proceedings of the International Conference on Systems Engineering ICSE'09*. 2009.
- [40]. Kujawski, K. *Classification Based Real-Time Scheduling: The Real-Life Electroplating Line Case Analysis* in *XVII International Conference on Systems Science 2010*. 2010. Wrocław, Poland.
- [41]. Kujawski, K. and J. Świątek, *Electroplating Production Scheduling by Cyclogram Unfolding in Dynamic Hoist Scheduling Problem*. *International Journal of Production Research*, 2010.
- [42]. Kujawski, K. and J. Świątek, *The Intelligent Scenario Selection in Dynamic Hoist Scheduling Problem: The Real-Life Electroplating Line Case*. *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the International Society for the Systems Sciences*, 2010.
- [43]. Kuntay, I., et al., *Environmentally Conscious Hoist Scheduling for Electroplating Facilities*. *Chemical Engineering Communications*, 2006. **193**(3): p. 273-292.
- [44]. Lamothe, J., M. Correge, and J. Delmas, *Hoist Scheduling Problem in a Real Time Context*, in *11th International Conference on Analysis and Optimization of Systems Discrete Event Systems*, G. Cohen and J.-P. Quadrat, Editors. 1994, Springer Berlin / Heidelberg. p. 586-592.
- [45]. Lamothe, J., M. Correge, and J. Delmas. *A Dynamic Heuristic for the Real Time Hoist Scheduling Problem*. in *ETFA '95 Proceedings. 1995 INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation*. 1995. p. 161-168 vol.2.
- [46]. Lamothe, J., C. Thierry, and J. Delmas, *A Multinhoist Model for the Real Time Hoist Scheduling Problem*, in *Engineering in Systems Application Multiconference*. 1996: Lille, France. p. 461–466.
- [47]. Lei, L. and T.-J. Wang, *The Minimum Common-Cycle Algorithm for Cyclic Scheduling of Two Material Handling Hoists with Time Window Constraints*. *Management Science*, 1991. **37**(12): p. 1629-1639.
- [48]. Leung, J. and Z. Guoqing, *Optimal Cyclic Scheduling for Printed Circuit Board Production Lines with Multiple Hoists and General Processing Sequence*. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 2003. **19**(3): p. 480-484.
- [49]. Leung, J.M.Y. and E. Levner, *An Efficient Algorithm for Multi-Hoist Cyclic Scheduling with Fixed Processing Times*. *Operations Research Letters*, 2006. **34**(4): p. 465-472.
- [50]. Levner, E. and V. Kats, *A Parametric Critical Path Problem and an Application for Cyclic Scheduling*. *Discrete Applied Mathematics*, 1998. **87**(1-3): p. 149-158.
- [51]. Levner, E., L. Meyzin, and A. Ptuskin, *Periodic Scheduling of a Transporting Robot under Incomplete Input Data: A Fuzzy Approach*. Vol. 98. 1998: Elsevier Science. 255-266.
- [52]. Levner, E., et al., *Complexity of Cyclic Scheduling Problems: A State-of-the-Art Survey*. 2010. **59**(2): p. 352-361.

- [53]. Mak, R.W.T., S.M. Gupta, and K. Lam, *Modeling of Material Handling Hoist Operations in a Pcb Manufacturing Facility*. Journal of Electronics Manufacturing, 2002. **11**(1): p. 33.
- [54]. Mangione, F., *Ordonnancement Des Ateliers De Traitement De Surface Pour Une Production Cyclique Et Mono-Produit*. 2003, POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE: GRENOBLE. p. 132.
- [55]. Manier, M.-A., *Contribution a L'ordonnancement Cyclique Du Systeme De Manutention D'une Ligne De Galvanoplastie*. 1994, Franche-Comte. p. 302.
- [56]. Manier, M.-A. and C. Bloch, *A Classification for Hoist Scheduling Problems*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2003. **15**(1): p. 37-55.
- [57]. Manier, M.-A. and S. Lamrous, *An Evolutionary Approach for the Design and Scheduling of Electroplating Facilities*. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms, 2008. **7**(2): p. 197-215.
- [58]. Manier, M.A. and S. Lamrous, *Design and Scheduling of Electroplating Facilities*, in *2006 International Conference on Service Systems and Service Management*. 2006. p. 1114-1119.
- [59]. Mańczak K., *Technika Planowania Eksperymentu*. 1976, Warszawa: WNT.
- [60]. Mascis, A. and D. Pacciarelli, *Job-Shop Scheduling with Blocking and No-Wait Constraints*. European Journal of Operational Research, 2002. **143**(3): p. 498-517.
- [61]. Matile, G.E., A.G.B. Tettamanzi, and M. Tomassini. *Evolutionary Design of Time-Way Charts for Plating Machines*. in *CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*. 1999. p. 1185 Vol. 2.
- [62]. Muszynski, W., Z. Banaszak, and I. Tomczuk-Pirog. *Automated Vehicles' Work Planning in Flexible Manufacturing Systems*. in *Emerging Technologies and Factory Automation, 2006. ETFA '06. IEEE Conference on*. 2006. p. 813-818.
- [63]. Ng, W.C., *A Branch and Bound Algorithm for Hoist Scheduling of a Circuit Board Production Line*. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 1996. **8**(1): p. 45-65.
- [64]. Paul, H.J., C. Bierwirth, and H. Kopfer, *A Heuristic Scheduling Procedure for Multi-Item Hoist Production Lines*. International Journal of Production Economics, 2007. **105**(1): p. 54-69.
- [65]. Pawlak, M., *Algorytmy Ewolucyjne Jako Narzędzie Harmonogramowania Produkcji 1999*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [66]. Phillips, L.W. and P.S. Unger, *Mathematical Programming Solution of a Hoist Scheduling Program*. AIIE Transactions, 1976. **8**(2): p. 219 - 225.
- [67]. Pinedo, M., *Scheduling : Theory, Algorithms, and Systems*. 3rd ed. 2008, New York ; London: Springer. xvii, 671 p.
- [68]. Pinedo, M.L. and SpringerLink, *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services*, in *Springer Series in Operations Research*. 2005, Springer Science+Business Media, Inc.: New York, NY.

- [69]. Riera, D. and N. Yorke-Smith, *An Improved Hybrid Model for the Generic Hoist Scheduling Problem*. Annals of Operations Research, 2002. **115**(1-4): p. 173-191.
- [70]. Rodošek, R. and M. Wallace, *A Generic Model and Hybrid Algorithm for Hoist Scheduling Problems*, in *Principles and Practice of Constraint Programming — Cp98*, M. Maher and J.-F. Puget, Editors. 1998, Springer Berlin / Heidelberg. p. 385-399.
- [71]. Russell, S.J. and P. Norvig, *Artificial Intelligence : A Modern Approach*. Prentice Hall Series in Artificial Intelligence. Vol. 2. 2003, Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall/Pearson Education. 1080.
- [72]. Sacha, K., *Systemy Czasu Rzeczywistego*. 2006, Warszawa: Oficyna wydawnicza politechniki warszawskiej.
- [73]. Sawik, T., *Planowanie I Sterowanie Produkcji W Elastycznych Systemach Montażowych*. 1996, Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. 256.
- [74]. Sianko, U., ed. *Poradnik Galwanotechnika*. 2002, WNT Warszawa.
- [75]. Spacek, P., M.-A. Manier, and A.E. Moudni, *Control of an Electroplating Line in the Max and Min Algebras*. International Journal of Systems Science, 1999. **30**(7): p. 759 - 778.
- [76]. Sriskandarajah, C., N.G. Hall, and H. Kamoun, *Scheduling Large Robotic Cells without Buffers*. Annals of Operations Research, 1998. **76**(0): p. 287-321.
- [77]. Sriskandarajah, C., et al., *Scheduling Multiple Parts in a Robotic Cell Served by a Dual-Gripper Robot*. Operations Research, 2004. **52**(1): p. 65-82.
- [78]. Subaï, C., P. Baptiste, and E. Niel, *Scheduling Issues for Environmentally Responsible Manufacturing: The Case of Hoist Scheduling in an Electroplating Line*. International Journal of Production Economics, 2006. **99**(1-2): p. 74-87.
- [79]. Tadeusiewicz, R. and M. Flasiński, *Rozpoznawanie Obrazów*. Współczesna Nauka I Technika. Vol. Wyd 1. 1991, Warszawa: Państwowe Wydawn. Nauk. 216.
- [80]. Varnier, C., O. Grunder, and P. Baptiste. *Improving the Productivity of Electroplating Lines by Changing the Layout of the Tanks*. in *Emerging Technologies and Factory Automation, 1995. ETFA '95, Proceedings., 1995 INRIA/IEEE Symposium on*. 1995. p. 441-450 vol.1.
- [81]. Wenwei, S., Z.B. Zabinsky, and R.L. Storch, *An Algorithm for Scheduling a Chemical Processing Tank Line*. Production Planning & Control, 1993. **4**(4): p. 323.
- [82]. Yan, P., et al. *An Algorithm for Optimal Cyclic Scheduling in a Robotic Cell with Flexible Processing Times*. in *IEEM 2008. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. 2008. p. 153-157.
- [83]. Yang, S. and W. Dingwei, *Constraint Satisfaction Adaptive Neural Network and Heuristics Combined Approaches for Generalized Job-Shop Scheduling*. Neural Networks, IEEE Transactions on, 2000. **11**(2): p. 474-486.

- [84]. Ye, L. and C. Yan. *Neural Network and Genetic Algorithm-Based Hybrid Approach to Dynamic Job Shop Scheduling Problem*. in *SMC 2009. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 2009. p. 4836-4841.
- [85]. Yih, Y., *An Algorithm for Hoist Scheduling Problems*. *International Journal of Production Research*, 1994. **32**(3): p. 501 - 516.
- [86]. Yun, J. and L. Jiyin, *Multihoist Cyclic Scheduling with Fixed Processing and Transfer Times*. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 2007. **4**(3): p. 435-450.
- [87]. Zhou, Z. and L. Li, *Single Hoist Cyclic Scheduling with Multiple Tanks: A Material Handling Solution*. *Computers & Operations Research*, 2003. **30**(6): p. 811-819.
- [88]. Zhou, Z. and J. Liu, *A Heuristic Algorithm for the Two-Hoist Cyclic Scheduling Problem with Overlapping Hoist Coverage Ranges*. *IIE Transactions*, 2008. **40**(8): p. 782 - 794.