

Politechnika Poznańska
Wydział Inżynierii Zarządzania

Joanna OLEŚKÓW-SZŁAPKA

**METODA OKREŚLANIA WIELKOŚCI PARTII
I HARMONOGRAMOWANIA PRODUKCJI
DLA ZMIENNEGO ASORTYMENTU WYROBÓW**

Praca doktorska wykonana w Katedrze Zarządzania Produkcją i Logistyki,
Politechnika Poznańska

Promotor:

Prof. dr hab. inż. MAREK FERTSCH

POZNAŃ 2014
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

The beginning is the most important part of work

Plato

Składam gorące podziękowania Panu

Profesorowi M. Fertschowi

za serdeczność, życzliwość

i ukierunkowanie w pracy

oraz wszystkim innym osobom,

które przyczyniły się do jej powstania.

Spis treści

Wstęp.....	4
Rozdział I. Wielkość partii produkcyjnej i jej miejsce w obszarze planowania i sterowania produkcją.....	8
1.1. Wprowadzenie do zagadnienia wielkości partii produkcyjnej.....	8
1.2. Rola wielkości partii produkcyjnej podczas tworzenia harmonogramu MRP	11
1.2.1. Charakterystyka i porównanie klasycznych metod określania wielkości partii Josepha Orlicky'ego	11
1.2.2. Problem określania wielkości partii i harmonogramowania w systemach informatycznych.....	27
1.3. Określanie wielkości partii w warunkach szczupłego wytwarzania.....	36
1.4. Czynniki produkcyjne mające wpływ na wybór odpowiedniej wielkości partii produkcyjnej i ustalania harmonogramu produkcji	45
Rozdział II. Podstawy algorytmów genetycznych	50
2.1. Wprowadzenie.....	50
2.2. Metody reprezentacji danych w algorytmach genetycznych.....	58
2.3. Populacja początkowa	60
2.4. Operatory genetyczne	63
2.5. Funkcja przystosowania	66
Rozdział III. Zaawansowane metody określania wielkości partii i harmonogramowania	68
3.1. Tendencje w obszarze tworzonych modeli określania wielkości partii.....	68
3.2. Charakterystyka wybranych modeli heurystycznych.....	74
3.3. Dynamiczne modele określania wielkości partii	82
3.4. Przykłady metaheurystyk w obszarze określania wielkości partii i harmonogramowania	87
3.5. Metody określania wielkości partii dla wieloetapowej produkcji (ang. multiechelon lub multi stage)	96
3.6. Wielopoziomowe określanie wielkości partii.....	98
3.7. Wady i zalety istniejących modeli w zależności od istniejących warunków produkcyjnych oraz uzasadnienie wyboru metody	101
Rozdział IV. Metodyka określania wielkości partii dla zmiennego asortymentu produkcji	104
4.1. Charakterystyka obszaru problemowego	104
4.1.1. Linia sprzęgieł.....	105
4.1.2. Podstawowe problemy na linii sprzęgieł.....	107

4.2. Założenia metodyki	113
4.3. Charakterystyka proponowanej metody harmonogramowania i określania wielkości partii ..	123
4.3.1. Założenia algorytmu genetycznego.....	123
a) Schemat symulacyjny	123
b) Funkcja celu.....	124
c) Operatory genetyczne	132
d) Wyniki symulacji – założenia.....	134
4.4. Wyniki badań	135
4.4.1. Wyniki badań dla wybranych zleceń produkcyjnych z harmonogramu na podstawie danych rzeczywistych z przedsiębiorstwa	135
4.4.2. Badania dla zmodyfikowanego harmonogramu – małe wielkości partii	140
a) wariant bez kumulacji wielkości partii	140
b) Wariant skumulowanych wielkości partii.....	150
c) inna sekwencja zleceń produkcyjnych z harmonogramu – małe wielkości partii	157
4.5. Analiza otrzymanych wyników i proponowane kierunki rozwoju metody.....	160
Zakończenie.....	168
Spis rysunków	172
Spis tabel	172
Spis wykresów.....	173
Bibliografia.....	174

Wstęp

Problematyka optymalizacji metod planowania produkcji skupiała uwagę wielu badaczy już od połowy lat pięćdziesiątych. Już wtedy wykształcały się dwa nurty badań. W pierwszym nurcie próbowano stworzyć metodę znajdowania rozwiązań optymalnych. Obiektem zainteresowania były tu przede wszystkim stworzone sztucznie problemy testowe lub znacznie uproszczone i ograniczone w rozmiarach problemy praktyczne. Jako metody optymalizacji stosowano tu głównie przeszukiwanie zupełne, programowanie całkowitoliczbowe, metodę podziałów i ograniczeń, programowanie dynamiczne. Drugi nurt badań stanowiły próby znalezienia metod poszukiwania rozwiązań zbliżonych do optymalnych dla problemów o rozmiarach i stopniu skomplikowania występujących w rzeczywistym przedsiębiorstwie. Stosowano tu głównie metody heurystyczne, a także systemy ekspertowe.

Zarządzanie zapasami i produkcją ma na celu poprawę poziomu obsługi klienta, minimalne inwestycje w zapasy i maksymalną efektywność operacyjną zakładu produkcyjnego. Cele te są w konflikcie między sobą. Podstawowymi pytaniami w zakresie zarządzania zapasami na które starają się odpowiedzieć przedsiębiorstwa to: ile? i kiedy?. Według Wight'a obecnie dużo większy nacisk jest kładziony na aspekt „kiedy”. Pozyskanie odpowiedniego materiału we właściwym miejscu w odpowiednim czasie może przynieść znaczące rezultaty nawet jeśli wielkość partii nie została naukowo obliczona. (Wight, 1984)

Jednym z ważniejszych problemów wyłaniających się w obszarze planowania operacyjnego jest problem określania wielkości partii (*ang. lot sizing problems*) oraz problem harmonogramowania produkcji (*ang. scheduling*).

Problem określania wielkości partii produkcyjnej ustala harmonogram rozmieszczenia w czasie produkowanych ilości tak, aby spełnić popyt przy minimalnym koszcie w oparciu o podany model zapotrzebowania oraz określa sposób rozmieszczenia w horyzoncie planistycznym wielkości partii produkcyjnych celem spełnienia zapotrzebowania klientów przy minimalnym koszcie całkowitym dla danego rozkładu zapotrzebowania. Jeśli wielkości partii są odpowiednio wybrane i rozmieszczone w czasie, proces produkcyjny powinien być opłacalny i przebiegać płynnie.

Głównym celem problemu określania wielkości partii jest zmniejszenie całkowitego kosztu produkcji (obejmującego koszt uruchomienia produkcji, koszt utrzymania zapasów, koszt nadgodzin itp.) podczas spełniania zamówień klientów uwzględniając ograniczoną

wydajność. Ten problem może być sklasyfikowany według różnych kryteriów takich jak struktura produktu (system jednopoziomowy, seryjny, montażowy, ogólny), struktur zdolności produkcyjnych (bez ograniczeń, ograniczony jeden zasób, ograniczonych wiele zasobów). Problem określania produkcyjnej wielkości partii określa najlepszą strategię uzupełniania tak aby wielkość uzupełnień i rozmieszczenie czasowe wielkości partii produkcyjnych spełniały minimalny koszt całkowity w oparciu o dany model zapotrzebowania. (Xie, Dong, 2002)

Problem określania wielkości partii ma duży potencjał w zakresie możliwych ulepszeń. Określanie wielkości partii związane jest z średnioterminowym planowaniem operacyjnym. Odpowiednia wielkość partii na początku horyzontu planistycznego umożliwia płynny i efektywny przepływ procesu produkcyjnego.

Rozwiązywanie problemu określania wielkości partii powinno obejmować poniższe czynniki: koszt utrzymania zapasów, koszt braków, jednostkowy koszt produkcji, ograniczenia wydajności, minimalna/maksymalna wielkość zamówienia, obniżki ilości itp. Co więcej, inną trudnością w obrębie określania wielkości partii jest wewnętrzny konflikt pomiędzy kosztem utrzymania i uzupełniania zapasów. Całkowity koszt obejmuje zarówno koszt uzupełniania jak i koszt uruchomienia produkcji. Jeśli rozmieszczenie w czasie i wielkość partii produkcyjnych zmniejsza się, koszt utrzymania zapasów również spada ale koszt uzupełniania wzrasta.

W środowisku wielopoziomowym i dynamicznym problem optymalnej wielkości partii staje się dużo bardziej złożony.

Chociaż zaproponowano szereg procedur, poczynając od wykorzystania prostych reguł decyzyjnych po złożone procedury optymalizacji angażujące techniki inteligentne, menedżer znajdzie niewiele porad w zakresie wyboru odpowiedniej procedury określania wielkości partii dla konkretnych warunków. Procedura, jaką menedżer wybiera zależy w gruncie rzeczy od uwagi jest położona na trzy kryteria: koszt utrzymywania zapasów, wydajność obliczeniowa oraz prostota proceduralna. Dlatego też powinna być przeprowadzona analiza poprawiająca zdolność kierowników do podejmowania lepszych decyzji w odniesieniu do rozwiązań kompromisowych w ramach ustalonych kryteriów.

W wyniku rosnącego zainteresowania rozwiązywaniem problemów optymalizacji przy wykorzystaniu algorytmów ewolucyjnych opracowanych zostało wiele algorytmów genetycznych do rozwiązywania rzeczywistych problemów.

Praca zajmuje się rozwiązywaniem problemu optymalnego harmonogramowania produkcji oraz określania wielkości partii w przedsiębiorstwie produkcyjnym posiadającym zmienny asortyment produkowanych wyrobów gotowych.

Koniecznym kryterium, jakie należy uwzględnić jest efektywny czas reakcji procesu. Określanie optymalnej wielkości partii musi przebiegać szybko i sprawnie, korzystając z wszystkich dostępnych danych, przy jednoczesnym dążeniu do zlikwidowania lub przynajmniej zminimalizowania przestojów produkcji. Wygenerowany harmonogram produkcji powinien zapewniać terminowość zleceń zgodnie z zamówieniami klienta, ewentualne wskazanie koniecznych opóźnień i uzgadnianie na tej podstawie możliwego terminu realizacji z klientem.

Istnieje wiele opracowanych procedur do wyznaczania wielkości partii i harmonogramowania. Ogólna klasyfikacja problemów określania wielkości partii, omówiona szczegółowo w wielu pracach (Katok i in. 1998; Xie, Dong 2002, Tabucanon i in. 1999) obejmuje następujące kryteria: ilość poziomów w systemie (jeden, wiele), ilość rozważanych wyrobów (jeden, wiele), rodzaj struktury BOM (jeden lub wiele poziomów), ograniczenia wydajności (istnieją lub nie, jedno lub wiele ograniczeń), cechy charakterystyczne popytu (stały, zmienny) itp. Szczegółowiej zostaną one omówione w dalszej części pracy.

Obecnie najczęściej stosowanymi technikami w przedsiębiorstwach produkcyjnych są klasyczne metody stworzone przez Josepha Orlycky'ego. Wyznaczają one wielkości partii dla pojedynczych wyrobów na pojedynczym poziomie w strukturze BOM i z braku lepszej alternatywy zakłada się, że popyt jest niezależny. Istniejące metody mają wiele podstawowych problemów, które ograniczają ich użyteczność w praktycznych sytuacjach. Wszystkie klasyczne metody w sytuacjach występowania potrzeb dyskretnych opierają się na założeniu pewności przyszłych potrzeb. Rzekoma pracochłonność ustalania wielkości partii może okazać się bezwartościowa przy odmiennym przebiegu wydarzeń. Metody te zwane dokładnymi, bazują na precyzyjnie określonych danych kosztowych, podczas gdy proces produkcyjnych w analizowanym przedsiębiorstwie wykazuje tendencje do istotnych zmian i jest dynamiczny.

Celem niniejszej pracy będzie więc opracowanie metody harmonogramowania produkcji i optymalizowania wielkości partii produkcyjnych, która pozwoli wykonywać to zadanie efektywnie dla warunków otoczenia zmiennego i dynamicznego, przy znacznie mniejszej ilości danych wejściowych i nakładzie czasu.

W pracy stworzono metodę określania wielkości partii przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego, w którym funkcją celu jest minimalizacja czasu ukończenia wszystkich zleceń produkcyjnych uwzględnionych w populacji początkowej.

Oprogramowanie opracowano w taki sposób, że wygenerowane wyniki gwarantują, iż zadania produkcyjne na poszczególnych maszynach w linii produkcyjnej i w kooperacji się nie pokrywają. Algorytm losuje optymalną konfigurację.

Algorytm genetyczny jest procedurą wyszukiwania, która naśladuje naturalne procesy ewolucji. Ponieważ jego zdolność daje rozwiązanie prawie optymalne i ucieka od punktów lokalnych, jest on szeroko stosowany w wielu aplikacjach. Metoda algorytmu genetycznego ma potencjał dla harmonogramowania produkcji i określania wielkości partii, albowiem wielu badaczy do tej pory udowodniło, że jest narzędzie to jest zdolne do rozwiązywania problemów o dużej skali, w których ilość alternatywnych rozwiązań jest duża.

Wiele współczesnych przemysłowych środowisk produkcyjnych ciągle polega na słabej wiedzy w zakresie planowania i sterowania produkcją. Optymalizacja w sensie algorytmicznym jest wykonywana bardzo rzadko albo wcale. Jednakże problem planowania i sterowania produkcją nie jest rzeczą nową. Zagadnienie to stało się tematem wielu badań naukowych ze względu na coraz większe jego znaczenie. Niektórzy uważają, że bazując na powszechnie uznawanej teorii oraz istniejących technikach rozwój narzędzi optymalizacji planowania produkcji dla określonych zastosowań produkcyjnych będzie przebiegał bez problemów i w prosty sposób. Jest to jednak błędne przekonanie. Rzeczywiste scenariusze zwykle różnią się od stworzonych modeli.

Rozdział I. Wielkość partii produkcyjnej i jej miejsce w obszarze planowania i sterowania produkcją

1.1. Wprowadzenie do zagadnienia wielkości partii produkcyjnej

Z planowaniem i operatywnym zarządzaniem produkcją związanych jest wiele specyficznych pojęć i wielkości. Większość z nich odnosi się zarówno do horyzontu strategicznego, jak i operacyjnego i znajduje zastosowanie w odniesieniu do planowania produkcji i projektowania struktur produkcyjnych oraz operacyjnego zarządzania produkcją. Jednym z tych pojęć jest pojęcie serii i partii produkcyjnej.

Pojęcia seria (zazwyczaj oznaczane N) używa się w odniesieniu do wyrobów finalnych. Rozróżniamy serie: konstrukcyjną, produkcyjną, montażową. Pojęcia partia (zazwyczaj oznaczenie n) używa się w odniesieniu do elementów składowych wyrobu. W produkcji używa się zwykle pojęcia partii produkcyjnej. (Głowacka-Fertsch, Fertsch, 2004)

W dalszej części pracy autorka posługiwać się będzie pojęciem partia produkcyjna.

Wielkość partii jest elementem określanym w obrębie planowania operacyjnego (o długim horyzoncie oddziaływania) realizowanego przez kierownictwo średniego szczebla. Celem tego poziomu jest sprawna realizacja założeń z poziomu strategicznego oraz budowa efektywnych procesów wytwarzania (Fertsch i in., 2011).

Partia produkcyjna jest jednym z parametrów wejściowych opisu procesu produkcyjnego i stanowi istotny czynnik występujący w procesie planowania potrzeb materiałowych. Jest to zagadnienie omawiane przez wielu naukowców i badaczy, którzy zarówno wprowadzają szereg modeli i metod określania wielkości partii, jak i badają wpływ wybranych metod na produkcję dla rzeczywistych warunków organizacyjno-produkcyjnych.

Istnieje szereg definicji partii produkcyjnej. Poniżej zostały wybrane ważniejsze z nich.

Według M. Brzezińskiego (Brzeziński, 2000) partia produkcyjna jest to liczba detali wykonywanych w ściśle określonej kolejności przy jednorazowym nakładzie czasu przygotowawczo-zakończeniowego. Wielkość (liczność) partii produkcyjnej jest niezmienna w fazie docelowej, ustabilizowanej produkcji. W fazie wcześniejszej mamy do czynienia z pojęciem partii rozruchowej, której wielkość zmienia się wraz z upływem czasu.

Według S. Lisa i in. (Lis, 1976) partią produkcyjną obróbczą lub obróbkową nazywamy zbiór prostych wyrobów (W^0 - wyrobów stopnia zerowego), wykonywanych na stanowisku roboczym przy jednorazowym nakładzie czasu przygotowawczo-zakończeniowego.

W obróbce partia produkcyjna może się dzielić na partie transportowe. Rozpatrując czynniki wpływające na wielkość partii produkcyjnej możemy stwierdzić, że jedne z nich przemawiają za jej zwiększeniem, inne zaś za zmniejszeniem.

Według J.Orlicky'ego (Orlicky, 1975) wielkość partii produkcyjnej należy dobierać tak, aby odpowiadała ona ilościowym zadaniom produkcyjnym (programom produkcyjnym) oraz ekonomicznym wymaganiom produkcji wykonywanej w realnych, techniczno-organizacyjnych warunkach przebiegu procesu produkcyjnego. Zatem przy jej wyborze zachodzi konieczność uwzględnienia wielu czynników, które wymagają odmiennych decyzji, przemawiających za zwiększaniem wielkości partii produkcyjnej lub na odwrót, wymagających jej minimalizacji.

Według Słownika Terminologii Logistycznej wielkość partii to liczba sztuk wyrobu tworząca partię wyrobów, która w angielskim tłumaczeniu jest określana jako *batch quantity* lub *lot size*. (Fertsch, 2006)

Według J.L. Burbidge'a (Burbidge, 1966) wielkość serii to (1) ilość części lub innych jednostek materiałowych w danej serii. (2) ilość części lub innych jednostek materiałowych w każdej serii, które składają się na plan produkcji lub na plan zaopatrzenia. (3) ilość jednostek materiału przesyłanych z jednego stanowiska na drugie. W produkcji liniowej wielkość serii równa się jeden.

Z kolei według J.Bursche'a (Bursche, 1963) partią produkcyjną nazywamy ilość przedmiotów obrabianych w kolejności na jednym stanowisku roboczym, bez przerw na wykonanie innych czynności produkcyjnych.

Według słownika APICS (Blackstone, 2008) partia (ang. *batch*) to (1) ilość ustalona w harmonogramie do wyprodukowania lub w produkcji (2) dla dyskretnych wyrobów partia jest planowana jako standardowa wielkość partii ale podczas produkcji wielkość ta może być rozbita na mniejsze partie, (3) dla produktów niedyskretnych partia jest ilością która jest planowana do wyprodukowania w określonym czasie a oparciu o wzór lub przepis który jest często opracowany aby wyprodukować określoną ilość wyrobów finalnych. Z kolei wielkość partii (ang. *lot size*) to ilość określonych wyrobów zamawianych z zakładu produkcyjnego lub od dostawcy lub wysyłana jako standardowa wielkość do procesu produkcyjnego.

W ramach niniejszej pracy autorka będzie opierać się na definicji, iż określana wielkość partii będzie to optymalna ilość wyrobów do wyprodukowania w określonej jednostce czasu, która pozwoli zminimalizować całkowity cykl produkcyjny.¹

¹ Kwestie związane z całkowitym cyklem produkcji i innymi czynnikami uwzględnianymi podczas określania wielkości partii będą zdefiniowane w dalszej części pracy.

Z wielkością partii produkcyjnej związane jest pojęcie taktu produkcji i rytm produkcji. Takt to okres powtarzalności partii. Z kolei rytm to powtarzający się regularnie okres między rozpoczęciem lub zakończeniem produkcji partii tych samych wyrobów (Słownik Terminologii Logistycznej, 2006).

W zależności od warunków organizacyjno-produkcyjnych kierownictwo może dążyć do zwiększenia lub zmniejszenia istniejących wielkości partii produkcyjnych.

Zwiększanie partii produkcyjnej może pociągać za sobą zarówno korzystne, jak i niekorzystne skutki. Do skutków korzystnych można zaliczyć (Brzeziński, 2000):

- zmniejszenie nakładów na ustawienie i przygotowanie produkcji w przeliczeniu na jednostkę produkcji,
- wykorzystanie w większym stopniu dysponowanego funduszu czasu pracy stanowisk roboczych, poprzez zmniejszenie czasu przebrojeń,
- zwiększenie wydajności pracy robotników w wyniku tzw. produkcyjnego uczenia się,
- polepszanie jakości produkcji w wyniku tzw. jakościowego uczenia się,
- zmniejszanie kosztów produkcji związane z wymienionymi wyżej czynnikami,
- uproszczenie organizacji i zarządzania produkcją, zwłaszcza planowania operatywnego, ewidencji produkcji, zarządzania dyspozytorskiego itp.

Z kolei do skutków niekorzystnych należą (Brzeziński, 2000):

- wydłużanie cyklu produkcyjnego,
- zwiększenie zapasów produkcji w toku, potrzebnej powierzchni i pomieszczeń produkcyjno-magazynowych,
- wzrost zamrożenia środków obrotowych i odsetek od kredytu na środki obrotowe, opodatkowania zapasów itp.,
- zmniejszenie elastyczności procesu produkcyjnego i jego adaptabilności.

Niestety wszystkie znane w literaturze przedmiotu sposoby, określają w zasadzie, tylko szacunkowo najkorzystniejszą wielkość partii produkcyjnej i dlatego w praktyce najczęściej wyniki obliczeń powinny być korygowane o różnego rodzaju dodatkowe czynniki i aspekty nie objęte przez procedury obliczeniowe zastosowanych metod.

Do obliczania wielkości partii produkcyjnej można stosować wiele różnych metod. Przy czym w praktyce najczęściej jeśli w ogóle stosowane są klasyczne metody bazujące na minimalizacji kosztów produkcji i magazynowania określające dopuszczalny stosunek czasu przygotowawczo-zakończeniowego do czasu jednostkowego oraz metody uzależnione od sposobu organizacji produkcji w danym przedsiębiorstwie.

Istnieje wiele algorytmów, heurystyk oraz metod bazujących na sztucznej inteligencji wykorzystywanych w obszarze określania wielkości partii. Na wielkość partii wpływa wiele różnych czynników takich jak: typ produkcji, orientacja przepływu materiałów, elastyczność systemu, organizacja procesu produkcyjnego. Tematyka ta zostanie rozwinięta w kolejnych podrozdziałach bardziej szczegółowo.

1.2. Rola wielkości partii produkcyjnej podczas tworzenia harmonogramu MRP

1.2.1. Charakterystyka i porównanie klasycznych metod określania wielkości partii Josepha Orlicky'ego

Klasycznymi metodami określania wielkości partii nazywa się metody opisane przez Josepha Orlicky'ego w książce *Material requirements planning. The way of new life in production and inventory management* wydanej w 1975 roku. Wersja polska książki została wydana w 1981 roku.

Klasycznymi metodami określania wielkości partii omawianymi przez Josepha Orlicky'ego są (Orlicky, 1975):

1. Stała wielkość partii (ang. *fixed order quantity*)
2. Ekonomiczna wielkość partii (ang. *economic order quantity*)
3. Partia na partię (ang. *lot for lot*)
4. Partia pokrywająca zapotrzebowanie okresowe (ang. *fixed period requirements*)
5. Zmienna wielkość partii (stały cykl zamawiania) (ang. *period order quantity*)
6. Minimalny koszt jednostkowy (ang. *least unit cost*)
7. Minimalny koszt całkowity (ang. *least total cost*)
8. Partia okresowo bilansowana (ang. *part period balancing*)
9. Algorytm Wagner Whitin

Dokonując podziału spośród powyższych metod można wyróżnić takie, które ustalają stałe wielkości zamówień dla wszystkich okresów planistycznych, w których są one uruchamiane; oraz takie, które ustalają zmienne wielkości uruchamianych partii tzn. ustalają taką wielkość, która równa się sumie potrzeb netto w określonej liczbie kolejnych okresów planistycznych. W ten sposób zapobiega się powstawaniu „resztek” tzn. ilości, które tkwią w zapasach przez pewien czas, albo nie starczą na pokrycie całych potrzeb kolejnego okresu, a w konsekwencji generują zbędne i niewskazane koszty (Oleśków, 2004).

Czułość algorytmów porównywanych metod różni się w zależności od kształtowania się następujących czynników (Orlicky, 1975, Oleśków 2004):

- zmienności potrzeb netto,
- długotrwałości horyzontu planistycznego,
- długotrwałości okresu planistycznego,
- stosunku kosztu zaopatrzenia do kosztu produkcji (a więc i utrzymania zapasów).

Zmienność popytu składa się z niejednorodności (zmieniającego się rozmiaru okresowego popytu) i nieciągłości (przerw w wyniku okresów bez popytu).

Długość horyzontu planistycznego, to znaczy, żądana widoczność, oczywiście wpływa na porównywalne przedstawienie różnych algorytmów. Krótsze planowane okresy (np. tygodnie zamiast miesięcy) spowodowane przez mniejsze zapotrzebowania na okres, umożliwiają technice określania wielkości partii na bliższe dotarcie do najlepszej równowagi między kosztami produkcji i magazynowania. Stosunek koszt produkcji/ jednostkowy bezpośrednio wpływa na częstość zamawiania a także na wielkość partii.

W dalszej części niniejszego podrozdziału zostaną szczegółowiej omówione klasyczne metody określania wielkości partii.² Przy czym ich przykłady obliczeniowe można znaleźć między innymi Orlicky (1975), Oleśków (2003), Domański (2013).

Stała wielkość partii (*Fixed order quantity*)

Polityka stałej wielkości partii może być wykorzystana dla każdego wyrobu w systemie MRP, ale w praktyce, jeśli w ogóle chcemy stosować tę technikę, powinno być to ograniczone tylko do wybranych wyrobów. Technika ta będzie odpowiednia dla wyrobów z kosztem zamawiania wystarczająco wysokim, dla których zamawianie zgodnie z rzeczywistym zapotrzebowaniem netto będzie nieuzasadnione. Stała wielkość partii dla danego wyrobu może być określana na podstawie dotychczasowego doświadczenia planistów produkcji lub być dobierana całkowicie przypadkowo (Oleśków-Szłapka, 2010).

Wielkość ta może obrazować czynniki nie brane pod uwagę w obliczeniach przez żaden z istniejących klasycznych algorytmów określania wielkości partii związane ze konkretnymi funkcjami lub procesami, cyklem życia wyrobów, opakowaniem, magazynowaniem itp. Kiedy używamy tą zasadę określania wielkości partii, wielkość

² Opis metod na podstawie J. Orlicky, Material requirements planning. The new way of life production and inventory management, McGraw-Hill 1975 s.196-215 oraz własnych opracowań autorki.

zamówienia będzie rosła, kiedy będzie taka potrzeba, aby zrównoważyć nieoczekiwane wysokie zapotrzebowanie netto w okresie, na którego pokrycie jest przeznaczone zamówienie.

Ogólną zasadą stosowaną przy tworzeniu wszystkich harmonogramów planowania zapotrzebowania materiałowego jest przyjęcie dostawy zawsze o 1 jednostkę terminowania wcześniej niż pojawi się zapotrzebowanie netto.

Ekonomiczna wielkość partii (Economic order quantity)

Metodę tą można traktować, jako szczególny przypadek poprzedniej metody, w którym stała wielkość partii jest określana na podstawie rachunku ekonomicznej wielkości partii według jednej ze znanych formuł obliczeniowych.

Pierwszą pracą definiującą problem określania wielkości partii była praca Harris'a (Harris, 1913) „*How many parts to make at once*”, w której zawarte zostały wskazówki odnośnie określania ekonomicznej wielkości partii (Quadt, 2004).

Polityka ekonomicznej wielkości partii (EWP), chociaż nie stworzona dla warunków planowania zapotrzebowania materiałowego MRP, może łatwo zostać włączona w system. Idea ekonomicznej wielkości partii polega na poszukiwaniu optimum dwu grup kosztów:

- kosztów utrzymania zapasów (magazynowania),
- kosztów składania zamówień (koszty przygotowania produkcji).

Koszty magazynowania są to koszty takie jak koszt składowania oraz koszt utraconej szansy, które są z założenia wprost proporcjonalne do wielkości serii.

Koszty przygotowania produkcji obejmują nakłady takie jak koszt ustawienia, transportu materiałów, transportu materiałów, koszty zamówień itp. Koszty przygotowania produkcji są uznawane jako stałe dla każdej serii, tak, że koszt na jednostkę spada gwałtownie z początku, a później wolniej, w miarę wzrostu wielkości serii i w miarę rozkładania się tych kosztów na większą liczbę produkowanych jednostek.

Dodanie dwóch wymienionych kosztów daje łączny koszt, w którego krzywej jeden punkt odpowiadający minimum stanowi ekonomiczną wielkość partii (Burbidge, 1966).

Formułę obliczania EWP przedstawia równanie 1.

$$Q = \sqrt{\frac{2 K_{zp} U}{I K_j}} \quad \text{Równanie 1}$$

gdzie::

K_{zp} - Koszt uruchomienia produkcji/ koszt zamówienia

K_j - Koszt jednostkowy wytworzenia

I - Koszt utrzymania zapasów rocznie (współczynnik)

U - Średnie roczne zapotrzebowanie (określane na podstawie zapotrzebowania brutto)

W przypadku ekonomicznej wielkości partii zakłada się, że popyt przyszły jest znany i niezmienny, niestety w większości rzeczywistych przypadków kształtuje się to odmiennie. Im bardziej popyt jest zmienny i niejednorodny tym EWP jest mniej skuteczna.

Większość dyskretnych metod określania wielkości partii nie opiera się na rocznym zużyciu, ale zakładają one pewną minimalną widzialność dla każdej partii w planowanym harmonogramie zamówień, zawierając ostatnią z nich. W większości przypadków, jednak, wielkość ostatniej partii jest skrócona przez bliskość drugiego końca horyzontu planistycznego (Orlicky, 1975).

Najważniejszymi wskazówkami w zakresie określania wielkości partii przy wykorzystaniu ekonomicznej wielkości partii są następujące (Swamidass, 2000; Whithmann, 1913):

- Przeważnie wielkości partii powinny być określone w dolnym zakresie ekonomicznej wielkości partii. Zmniejsza to wymagania kapitałowe, ułatwia produkcję i pozwala na bardziej elastyczne harmonogramowanie.
- Kiedy konkretna maszyna jest wąskim gardłem i musi pracować przy maksymalnej wydajności, należy ustalić wielkość partii w górnym zakresie ekonomicznej wielkości partii. Zwiększa to bufor przed i za operacją wąskiego gardła, ale daje więcej czasu na produkcję i zmniejsza czas uruchomienia.
- Kiedy pewien element wyposażenia musi być obsługiwany przez personel i utrzymywany kiedy jest zepsuty, i kiedy maszyna ta nie jest wąskim gardłem, wielkości partii należy ustalić w zakresie EWP lub nawet poniżej tej wielkości. Zmniejsza to wielkość zapasów, ale nie zwiększa kosztu uruchomień.
- Zakładając pewną rozmytość liczb, należy ustalić wielkość partii jako np “dzienna produkcja”, “2 kontenery” lub jakieś inne przybliżone wielkości.
- Podejmuj decyzje z nastawieniem na najniższe możliwe wielkości partii EWP nie obejmuje niepoliczalnych kosztów większych wielkości partii takich jak jakość

i elastyczność harmonogramowania. Dodatkowo większość systemów obliczeniowych niedoszacowuje koszty utrzymania zapasów.

O.W. Wight przeprowadził badanie według którego około 80% praktyków w zakresie zarządzania produkcją i zapasami przynajmniej raz wykorzystało metodę ekonomicznej wielkości partii, jednak tylko 20% z nich zauważyło jakiekolwiek efekty zastosowania tej metody. Większość ludzi postrzega EWP jako formułę matematyczną zamiast metodę zarządzania zapasami. Aby stosować metodę z pomyślnym skutkiem należy zwrócić uwagę na poniższe kwestie (Wight, 1984):

- a) Rzeczywiste koszty magazynowania i zamawiania nie są liniowe
- b) Dobre wyniki nie zostaną osiągnięte dopóki nie będzie osoby odpowiedzialnej, która przyczyni się do ich osiągnięcia. Z drugiej strony koszty mogą bardzo szybko wzrosnąć.
- c) Wszelkie efekty wykorzystania EWP pojawią się z powodu zagregowanych kosztów magazynowania i zamawiania nie przez indywidualną wielkość partii. Fakt, że każda wielkość partii jest ekonomiczna nie oznacza, że sumaryczny wynik będzie ekonomiczny czy nawet praktyczny.

Zastosowanie EWP wymaga przeprowadzenia poniższych działań (Wight, 1984):

1. Zidentyfikować grupy wyrobów, takich jak np. wszystkie śruby, opakowania, dla których obliczenie ekonomicznych wielkości partii wydaje się najbardziej istotne.
2. Obliczyć ekonomiczne wielkości partii dla tych pozycji, przeliczyć je na pieniądze, zsumować i podzielić wynik na pół. Ostateczny wynik jest średnim całkowitym kosztem inwestycji w wielkość partii, które wpływają na nowe zamawiane ilości
3. Podzielić nowe wielkości partii na prognozy rocznych zapotrzebowań, oszacować jak wiele będzie ponownych zamówień, przekształcić to na czasy uruchomienia produkcji, ilość ządań zakupu, pieniądze, lub jakieś inne znaczące parametry. Ponowne zsumować wyniki.
4. Przejść ponownie procesu omówiony w punkcie 2 i 3 dla obecnych wielkości partii.
5. Porównać zagregowane zapasy wielkości partii, które byłyby generowane przez obecne wielkości partii z nowymi wielkościami partii. Porównać zagregowanych godzin uruchomienia produkcji (setup), zlecenia zakupu lub inne miary całkowitej ilości zamówień które mają być złożone dla obecnych wielkości partii i nowych wielkości partii. Odpowiedzieć na pytanie czy wyniki są pożądane i korzystne.

6. W przypadku gdy nowe wielkości partii generują wyższe poziomy zapasów niż jest to wskazane, zwiększyć koszt utrzymania zapasów używany we wzorze na EWP. Zmniejszyć to wielkość partii do bardziej praktycznego poziomu. Koszt utrzymania zapasów powinien być wielkością kontrolną we wzorze EWP. Z powodu zależności pomiędzy kosztami utrzymania zapasów i zamawiania, koszt magazynowania używany w formule musi być często dostosowywany aby otrzymać zagregowany zapasy wielkości partii i w konsekwencji zagregowany koszt zamawiania spada do zakresu który generuje praktyczne i zyskowe wyniki.
7. Przypisać odpowiedzialność do osoby która będzie sprawdzała czy wyniki są rzeczywiście osiągane.

Przeprowadzono niezliczoną ilość modyfikacji, aby dostosować model ekonomicznej wielkości partii do różnych rzeczywistych warunków. Ponieważ założenia w niej są bardzo restrykcyjne, opracowano inne modele. Pierwszym który warto wspomnieć jest problem harmonogramowania ekonomicznej wielkości partii (*economic lot scheduling problem-ELSP*) (Elmaghraby, 1978; Rogers, 1958), gdzie pojawiły się ograniczenia wydajności.

Ponieważ niewystarczające zasoby są zwykle współdzielone przez kilka wyrobów, ELSP jest problemem jednopoziomowym dotyczącym wielu wyrobów. Jednakże ciągle zakłada się w nim stały popyt. Jest to również model ciągły i horyzont planistyczny jest nieskończony. Optymalne rozwiązanie ELSP jest problemem NP trudnym. Dlatego też w tym obszarze dominują różnego rodzaju heurystyki i metaheurystyki.

ELSP jest jednym z najstarszych szeroko przebadanych problemów. Problem dotyczy utworzenia harmonogramu dla więcej niż jednego produktu produkowanych na jednej maszynie. Standardowymi założeniami są: koszty i czasy uruchomienia nie zależą od sekwencji produkcji, każdy produkt ma określone i stałe tempo produkcji i zapotrzebowanie, horyzont planistyczny jest nieskończony, tylko jeden wyrób może być w danym momencie produkowany na maszynie, koszt utrzymania zapasów jest proporcjonalny w stosunku do ilości zapasów (Rogers, 1958; Maxwell, 1964). Rogers w czwartym tomie *Management Science* zdefiniował problem i opracował metodę obliczania wielkości produkcji. Zastosował on wzór na EWP do każdego z wyrobów oddzielnie i następnie podkreślił, że ponieważ wiele produktów dzieli jeden zasób niemożliwa będzie produkcja każdego wyrobu zgodnie ze wzorem na EWP. (Rogers, 1958).

Innymi pracami omawiającymi problem ELSP są prace Eilon (1959), Hanssmann (1962). Inne modyfikacje modelu EWP zostały omówione w podrozdziale 3.2.

Do obliczania wielkości partii można również stosować uproszczony wzór bazujący na stosunku czasów przygotowawczo zakończyeniowych do czasów jednostkowych wymnożonych przez współczynnik q który przyjmuje wartości od 0,02-0,15 w zależności od kosztowności i gabarytów przedmiotu. Dla przedmiotów kosztownych choć małych, a także dla wielkich gabarytowo, a więc też kosztownych i zajmujących duże powierzchnie składowe przyjmujemy wielkości najwyższe (równanie 2) (Boszko, 1973).

$$n_{ek} = \frac{T_{pz}}{T_j q} \text{ [szt/partię]} \quad (\text{Równanie 2})$$

Wzór w równaniu 2 ma pewien słaby punkt albowiem czas przygotowawczo-zakończyeniowy nie przy każdej operacji występuje tylko raz. W przypadkach gdy występuje wielostrumieniowość wykonania operacji zamiast t_{pz} mamy $s \cdot t_{pz}$. (Boszko, 1973)

Partia na partię (Lot for lot)

Metoda ta, czasami określana jako zamawianie dyskretnie, jest najprostszą metodą określania wielkości partii. Zapewnia pokrycie zapotrzebowań netto, a planowane wielkości zamówień są zawsze równe wielkościom pokrywanych zapotrzebowań netto. Wielkości zamówień są z konieczności dynamiczne; co oznacza, że muszą być ciągle ponownie obliczane, kiedy tylko zapotrzebowania netto się zmieniają. Wykorzystanie tej metody minimalizuje koszt magazynowania. Jest często używana dla kosztownych nabywanych wyrobów, i dla każdego innych wyrobów, nabywanych lub produkowanych, które mają stosunkowo wysoce niestąły popyt (Orlicky, 1981).

Metoda ta zasadniczo jest stosowana przede wszystkim w warunkach produkcji jednostkowej i małoseryjnej oraz w przypadkach nawet dużych partii jednorazowo uruchamianych i nie pojawiających się w innych okresach poza bieżącym (Oleśków-Szłapka, 2010). Metoda ta ma również uzasadnienie dla wyrobów produkowanych na zamówienie których popyt jest na tyle niestabilny że nieopłacalne i nieuzasadnione jest utrzymywanie ich zapasów.

Metoda partii pokrywającej zapotrzebowanie okresowe (*Fixed Period Requirements*)

Metoda ta odpowiada zasadzie zamawiania „X miesięczny zapas”. Jej racjonalną podstawą jest to, iż okres pokrycia może być określony przypadkowo lub intuicyjnie. Użytkownik określa ile okresów horyzontu planistycznego powinno pokryć planowane zamówienie.

Podczas, gdy w podejściu stałej wielkości partii wielkość jest stała i przerwy między zamówieniami różne, w stałym cyklu zamawiania przerwa między zamówieniami jest stała i wielkości zamówień mogą być różne (Orlicky, 1975).

Na przykład gdyby ustalona przerwa między zamówieniami wynosiła 2 to zgodnie z tą metodą zamawianie ma miejsce co drugi okres. Gdyby w jednym z okresie wielkość potrzeb była równa 0 wówczas odstęp między zamówieniami ulega wydłużeniu.

Przerwa między zamówieniami jest wielkością ustalaną przez planistę biorąc pod uwagę rozkład zapotrzebowania i inne przesłanki mające wpływ na właściwą długość przerwy między kolejnymi zamówieniami (częstość i wielkość zapotrzebowania, minimalna i maksymalna wielkość zamówienia, poziom zapasu zabezpieczającego, koszt zamawiania itp.).

Zmienna wielkość zamówień (*Period order quantity*)

Technika ta popularnie znana jako period order quantity - POQ, opiera się na logice klasycznej EOQ, zmodyfikowanej dla wykorzystania w warunkach dyskretnego zmiennego popytu.

Wykorzystując znany przyszły popyt przedstawiany przez harmonogram zapotrzebowań netto dla danego wyrobu, ekonomiczna wielkość partii jest obliczana według standardowej formuły, określając ilość zamówień, które powinny być umiejscowione w ciągu roku. Ilość planowanych okresów składających się na rok jest następnie dzielona przez tę ilość w celu określenia przerwy między zamówieniami. Technika POQ jest identyczna do omawianej, z wyjątkiem tego, że przerwa między zamówieniami jest obliczana. (Orlicky, 1981).

Zgodnie z tą metodą konieczne jest wykonanie obliczeń mających na celu ustalenie przerwy między kolejnymi zamówieniami. W tym celu obliczamy ekonomiczną wielkość partii.

Obydwie z tych technik o stałych przerwach unikają nadmiernych zapasów starając się zmniejszyć koszt magazynowania. Z tego powodu, POQ jest bardziej skuteczna niż EOQ,

ponieważ koszt uruchomienia produkcji jest taki sam, ale koszt magazynowania jest zwykle niższy w metodzie POQ.

Potencjalna trudność w tym podejściu może się pojawić jeżeli nieciągłe zapotrzebowania netto będą rozmieszczone w taki sposób iż określone przerwy między zamówieniami okażą się nieodpowiednie.

W porównaniu z niektórymi innymi technikami określania wielkości partii opisanymi poniżej, skuteczność POQ - tak jak EOQ, z której się wywodzi - okazuje się stosunkowo niska w przypadku nieciągłego, niejednolitego popytu (Orlicky, 1981).

Najmniejszy koszt jednostkowy (*Least Unit Cost*)

Metoda ta zakłada minimalizację łącznych kosztów magazynowania i produkcji. Ma charakter iteracyjny, ponieważ bada się w niej kilka wariantów w celu znalezienia rozwiązania optymalnego.

Podczas określania wielkości zamówienia, technika najmniejszego kosztu jednostkowego (LUC) pyta, w praktyce, czy ta ilość powinna zrównoważyć zapotrzebowania netto pierwszego okresu, czy powinna zostać zwiększona, aby pokryć zapotrzebowań następnych okresów, czy jednego okresu po nim, itd.

Ograniczenie podejścia LUC jest związane z faktem, iż technika ta dotyczy tylko jednej partii w czasie. Koszt jednostkowy zmienia się, czasami bardzo znacznie pomiędzy różnymi partiami. Odpowiednie koszty alternatywne pomiędzy kolejnymi partiami mogą być czasami tak określone, aby zmniejszyć całkowity koszt dwóch lub większej liczby partii.

Praktyczne walory metody najmniejszego kosztu jednostkowego są więc uzależnione od wiarygodności parametrów kosztowych. Uproszczony wariant tej metody polega na zastąpieniu kosztów magazynowania maksymalną pojemnością magazynowania lub ograniczeniem maksymalnej wielkości zapasów (Oleśków-Szłapka, 2010).

Przykłady obliczania wielkości partii metodą najmniejszego kosztu jednostkowego oraz tworzenia harmonogramu przy wykorzystaniu tej metody znajdują się między innymi w pozycjach (Orlicky J. 1981, Oleśków-Szłapka J. 2009, Tibben-Lembke, 2002, Czerska 2001).

Najmniejszy koszt całkowity (*Least Total Cost*)

Technika najmniejszego kosztu całkowitego (LTC) opiera się na przekonaniu, że suma kosztu uruchomienia produkcji i kosztów magazynowania (kosztu całkowitego) dla wszystkich partii w ciągu planowanego horyzontu będzie minimalizowana, jeśli koszty te są do siebie tak przybliżone, jak to tylko możliwe, tak samo jak w klasycznym podejściu EOQ.

Powyższe założenie jest realizowane przez odpowiedni dobór wielkości partii, zgodnie z którym jednostkowe koszty produkcji powinny być jak najbliższe jednostkowemu kosztom magazynowania.

Podejście LTC przy określaniu wielkości partii jest generalnie preferowane nad LUC, ale jego obrońcy wysuwają następujące argumenty, takie jak- wyniki ograniczonych symulacji, które nie są wystarczająco przekonujące.

Logika LTC ma słaby punkt w przesłaniu, że najmniejszy koszt całkowity jest w miejscu gdzie koszt magazynowania i koszt produkcji są równe. Jest to zgodne z EOQ, ale nie z podejściem dyskretnego określania wielkości partii które zakłada, że uszczuplenia zapasów mają miejsce na początku każdego okresu, jak zostało to już wspomniane.

W większości przypadków, jednak, składnik kosztu produkcji najmniejszego kosztu jednostkowego będzie większy niż składnik kosztu magazynowania, jest to zatem tendencyjne na rzecz większych zamawianych ilości często większych niż plan produkcji zamawianego okresu. Stosowanie tej metody traci wówczas sens.

Przykłady obliczania wielkości partii metodą najmniejszego kosztu jednostkowego oraz tworzenia harmonogramu przy wykorzystaniu tej metody znajdują się między innymi w pozycjach (Orlicky J. 1981, Oleśków-Szłapka J. 2009, Czerska 2001).

Metoda partii okresowo bilansowanej (*Part Period Balancing*)

Metoda ta opiera się na identycznych założeniach, jak omawiana metoda najmniejszego kosztu całkowitego a obliczanie wielkości zamówień jest podobne. Dodatkowo tutaj jest zastosowanie dodatkowej regulacji nazywanej spojrzenie patrz w przód/ patrz w tył (*look ahead/ look back*). Ma to uniemożliwić trzymanie zapasów pokrywających najwyższe zapotrzebowania przez dłuższe okresy czasu, i uniknąć zamówień będących przypisywanych do okresów z niskimi zapotrzebowaniami. Regulacje są wykonywane tylko wtedy, kiedy poprawiają istniejącą sytuację. Test „sposrzenie w przód” zawsze rozpoczyna omawianą procedurę. Jeśli staje się on zawodny należy przeprowadzić test „sposrzenie w tył”. W tym

przypadku przedmiotem sprawdzenia jest możliwość dodania wielkości potrzeb z ostatniego okresu, objętego przez dane zamówienie, do następnej partii, czyli możliwość zmniejszenia wielkości pierwszej partii (Orlicky, 1981).

Mankamentem obydwu tych metod jest ograniczenie horyzontu planistycznego, nie sięgają one bowiem dostatecznie daleko w przód.

Algorytm Wagner-Whitin (*Wagner-Whitin Algorithm*)

Model dynamicznej wielkości partii jest uogólnieniem modelu ekonomicznej wielkości zamówienia który uwzględnia iż zapotrzebowanie na wyrób może zmieniać się w rozważanym okresie czasu. Model ten był wprowadzony przez H.M. Wagner i T.H. Whitin w 1958 roku (Wagner, Whitin, 1958).

Technika ta zawiera procedurę optymalizacji opartą na modelu programowania dynamicznego. Ocenia ona wszystkie możliwe sposoby zamawiania w celu pokrycia zapotrzebowań netto w każdym okresie horyzontu planistycznego. Jej celem jest osiągnięcie optymalnej strategii zamawiania dla wejściowego planu zapotrzebowań netto. Algorytm Wagner-Whitin (W-W) osiąga ten cel w rzeczywistości bez potrzeby specjalnego rozważania każdej z możliwych strategii.

Algorytm określa horyzont planistyczny podzielony na skończoną ilość okresów każdy ze znanym popytem który musi być zaspokojony. Można zamówić (wyprodukować) nieograniczoną ilość w każdym okresie. Struktura kosztów składa się ze stałych liniowych kosztów produkcji (zamawiania) i kosztów utrzymania z założenia proporcjonalnych do poziomu zapasów na końcu okresu. Wszystkie parametry tj. popyt, koszty uruchomienia, zmienne koszty uzupełniania i utrzymania mogą się różnić w każdym okresie (Federgruen, Tzur, 1991).

Wagner-Whitin problem zakłada skończony horyzont planistyczny, który jest podzielony na kilka dyskretnych okresów. Zapotrzebowanie jest podane dla okresu i może się zmieniać. Jednakże ograniczenia co do wydajności nie są brane pod uwagę, co oznacza że jest to problem odnoszący się do jednego wyrobu. Problem może być postrzegany jako problem najkrótszej drogi.

Podsumowując założenia modelu W-W dla EWP są następujące (Aggarwal, Park, 1993):

1. Produkcja chwilowa
2. Natychmiastowa dostawa
3. Popyt deterministyczny

4. Niezmienny popyt - WW omija to założenie
5. Znane koszty stałe uruchomienia
6. Pojedynczy wyrób lub rozdzielne wyroby

Model W-W pozwala na określanie wielkości partii dla pojedynczego wyrobu kiedy popyt, koszty utrzymania zapasów i koszty uruchomienia zmieniają się przez N okresów. Algorytm WW rzeczywiście minimalizuje złożony (całkowity) koszt produkcji i magazynowania, i jest on wykorzystywany jako standard pomiaru porównywalnych efektywności innych dyskretnych technik określania wielkości partii. Przez wielu badaczy algorytm W-W jest uznawany jako niepraktyczne podejście. Przez praktyków W-W jest postrzegany raczej jako filozofia rozwiązywania problemów niż technika decyzyjna w zakresie określania wielkości partii. Jego głównymi ujemnymi stronami, zwykle wymienianymi w literaturze, są wysoki ciężar obliczeniowy i trudności w wytłumaczeniu tego rozwiązania przeciętnemu użytkownikowi systemu MRP (Orlicky, 1975).

Pierwszy z tych dwóch argumentów jest w pewnym stopniu wyolbrzymiony. Podczas gdy prawda jest, iż istnieją zwykle dziesiątki tysięcy wyrobów w spisie w systemie MRP, dla których planowane zamówienia muszą być obliczone a zapotrzebowania na dany wyrób mają skłonność zmieniać się i powodować ponowne obliczenia. Czas obliczania, aktualnie rekord, który jest w pamięci głównej komputera, nie jest znaczący. Staje się on nawet mniej znaczący, w miarę jak technologia komputerowa rozwija się - są tutaj wymagane tylko mikrosekundy.

Drugi argument, jednak, jest całkowicie uzasadniony. Kompleksowość procedury powstrzymuje zrozumienie przez laika i działa jak przeszkoda do jej przyjęcia w praktyce. Wrodzona słabość algorytmu W-W leży w jego założeniu, że zapotrzebowania poza horyzontem planistycznym są zerowe. Technika jest zaprojektowana dla stacjonarnego horyzontu. Funkcjonuje to dobrze, na przykład, w przypadku projektowania części przez klienta w ograniczonej liczbie sytuacji, takich jak jednorazowy kontrakt z firmą na pewną ilość specjalnej maszyny, planu obejmującego dostawę. Ale w większości przypadków, horyzont planistyczny nie jest stały (nieruchomy), życie typowego wyrobu z wykazu jest całkiem długie, i dodatkowe zapotrzebowania są ciągle dostarczane w ciągu horyzontu planistycznego w ciągu mijającego czasu.

Podczas gdy ukazują się nowe zapotrzebowania na dalekim końcu horyzontu strategia zamawiania W-W może być skorygowana. Przynajmniej jedna partia na dalekim końcu serii jest tematem do ponownego obliczenia nawet, jeśli określone zapotrzebowania, które ona

pokrywa pozostają niezmiennione. Zasadność danej planowanej wielkości zamówienia obliczonej według tego podejścia może okazywać się ulotna - pozostając nie dłużej niż jeden okres planowania. Jest to oczywiście także zgodne z innymi algorytmami.

W praktyce, W-W optymalna strategia okazuje się być zła, jeśli musi być ciągle zmieniana. Z punktu widzenia planowania zapotrzebowania materiałowego, niestabilność w harmonogramowanie planowanych zamówień nie jest pożądana.

Do pewnego stopnia W-W jest bardziej wrażliwy niż inne metody określania wielkości partii na dodatkowe zapotrzebowania spowodowane przez wzrost horyzontu - zgodnie z celem jego optymalnej strategii - uniemożliwia to jego praktyczne zastosowanie.

Zaplanowana wielkość zamówienia określona przez którąś z wyżej wymienionych klasycznych metod określania wielkości partii w praktyce bardzo często musi być regulowana ze względu na praktyczne czynniki. Są to między innymi (Orlicky, 1975):

- ustalenie dolnej i górnej granicy partii,
- uwzględnienie poprawek na odpady,
- przyjęcie warunku zamawiania w ilości stanowiącej wielokrotność pewnej liczby (elementy zbiorowe),
- uwzględnienie współczynników rozkroju surowca.

Dolna i górna granica - każdy z omawianych algorytmów określania wielkości partii może być wcześniej ograniczony przez narzucenie dolnej i górnej granicy na ilość wyrobu, która będzie zamawiana. Granice te mogą być ustalane w ilościach absolutnych np. nie „mniejszych niż 50 i nie większych niż 400”, odnośnie do indywidualnych wyrobów magazynowanych. Ewentualne ograniczenia ilości mogą być ustalone w pokrywanych okresach, np. „nie mniej niż 4 tygodniowe i nie więcej niż 12 tygodniowe zapotrzebowania” lub „nie przekroczyć jednorocznego zapasu (dostawy)”. Poziomy te są często narzucane przez kierownictwo, wobec faktu, iż algorytm określania wielkości partii nie uwzględnia pewnych praktycznych przesłanek.

Dodatek związany z poprawkami i odpadami – wielkość dodawana do obliczonej wielkości partii przeznaczona na pokrycie oczekiwanego braku lub stratę w procesie aby zapewnić odpowiednią ilość dobrych części. Jest to istotne w przypadku dyskretnych metod określania wielkości partii. Poprawka na odpady zmienia się w zależności od wyrobu zgodnie

z istniejącym współczynnikiem braków. Odpady zazwyczaj są funkcją ilości różnych uruchomień produkcji, które są wymagane dla kompletacji partii, raczej niż ilości, która jest obrabiana. Z powodu tego czynnika może być używany poniższe równanie 3 tzw. „zmniejszającego się procentu”

$$Q = L + a \sqrt{L} \quad \text{Równanie 3}$$

gdzie:

Q – wielkość zamówienia,

L – wielkość partii dostawy obliczona na podstawie jednej z wyżej omawianych metod,

a- współczynnik występowania odpadów.

W systemach klasy MRP II/ERP wielkości braków są uwzględniane poprzez dodawanie ich do planowanych zamawianych wielkości zamówień. Ostatecznie w uruchamianych zamówieniu jest uwzględniana wielkość zawierająca również wielkość braków. Ilość ta może być pomniejszona w przypadku gdy wielkości braków są na bieżąco aktualizowane. Praktyka obejmowania wielkości możliwych braków w zapotrzebowaniach brutto wyrobów jest błędna, ponieważ zniekształca podstawowy związek macierzystych planowanych wielkości zamówień w stosunku do ilości zapotrzebowań brutto wyrobów składowych. Ponadto, to czy brak pojawi się w danej chwili nie jest oczywiste. Dopóki się on nie pojawi, system MRP powinien planować status wyrobu, jakby się nie miał pojawić.

Innym ograniczeniem, które może się nakładać na algorytm określania wielkości partii jest zapotrzebowanie, które w danym wyrobie będzie zamawiane w zwielokrotnionych niektórych ilościach. Może to być spowodowane uwarunkowaniami procesu, pakowanie (12 części do kartonu) itp. Wielkość partii przynoszona przez algorytm określania wielkości partii jest, w tych przypadkach, zwiększana w stosunku do najbliższej określonej wielokrotności.

Współczynniki rozkroju surowca - reprezentuje inne dostosowanie wielkości partii, którego przeprowadzenie jest wymagane w pewnych przypadkach. Algorytm określania wielkości partii, nie uzasadnia formy, w której surowiec przychodzi i tym samym nie uwzględnia problemów związanych z rozkrojem surowca (Orlicky, 1981).

Na przykład, jeśli pewien rozmiar cienkiej blachy jest rozkrawany na 5 części podczas produkcji danego wyrobu to ustalenie wielkości partii na poziomie 18 części może

spowodować powstanie nadwyżki materiału albo, co bardziej prawdopodobnie, cięcie przez operatora maszyny czterech blach na 20 części. Tak więc wielkość rzeczywistego zamówienia powinna wynosić 20 a nie 18 części.

W przypadkach gdzie więcej niż jeden rodzaj regulacji jest przeprowadzany w stosunku do wielkości zamówienia dla danego wyrobu, kilka regulacji jest wykonywanych kolejno według logicznej kolejności. Dodatki na braki, wielokrotności, i warunki rozkroju mają zwyczaj tworzyć nadwyżkę zapasów. Ta nadwyżka, jednakże, jest później stosowana w stosunku do późniejszych zapotrzebowań brutto. W każdym momencie, istnieje niewielka nadwyżka zapasów, ale nie nagromadza się ona.

Każda z technik określania wielkości partii przedstawiona powyżej jest niedoskonała i posiada swoje słabe strony i pewne niedoskonałości. Trudność w ocenianiu porównywalnych skuteczności tych technik leży w fakcie, iż przedstawianie algorytmów zmienia się, w zależności od danych wykorzystywanych zapotrzebowań netto i w stosunku do uruchomienia i kosztów jednostkowych.

Ponadto, niektóre techniki zakładają stopniowe, częściowo równomierne uszczuplanie zapasów, podczas gdy inne zakładają uszczuplanie dyskretnie, które wpływa na sposób, w jaki koszt magazynowania musi być obliczany dla celów porównania. Ignorując tę rozbieżność i opierając wszystkie koszty magazynowania na dyskretnym zużyciu na początku każdego okresu, przedstawienie algorytmów metod określania wielkości partii, nastawionych ekonomicznie, dla których wykorzystujemy ten sam zbiór danych jak w poprzednich przykładach wygląda porównywalnie następująco (szczegóły w tabeli 1).

Dane wejściowe do poniższej analizy porównawczej były następujące. Plan zapotrzebowania netto obejmuje 9 jednostek terminowania, 1JT- 35, 2JT-10, 4JT-40, 6JT-20, 7JT-5, 8JT-10, Koszt produkcji (100\$), i koszt jednostkowy (50\$). Zmiana w tych danych utworzyłaby inną kolejność. Na przykład, jeśli koszt produkcji byłby 300\$, POQ prześcignęłaby LTC i dorównała LUC w efektywności. Jeśli dane zapotrzebowań zostaną zmienione metoda EOQ może być równoważna z algorytmem W-W.

Tab. 1. Porównanie algorytmów określania wielkości partii dla konkretnych danych wejściowych

Algorytm	Ilość uruchomień	Koszt uruchomienia (produkcji)	Partio-okresy	Koszt magazynowania	Całkowity koszt
W-W	3	300	95	95	395
LUC	3	300	120	120	420
LTC	2	200	245	245	445
POQ	3	300	155	155	455
EOQ	3	300	206	206	506

Źródło: J. Orlicky, Planowanie potrzeb materiałowych. Nowy styl sterowania produkcją i zapasami, PWE, Warszawa 1981, s. 220

Nie pokazano tutaj najlepszego algorytmu określania wielkości partii, który mógłby być wybrany dla danego środowiska wytwarzania, dla klasy wyrobów, i w większości przypadków nawet dla pojedynczego specyficznego wyrobu.

Dla celów planowania zapotrzebowań materiałowych, podejście partia na partię powinno być używane gdzie to jest wykonalne, i w przypadkach znaczącego kosztu produkcji (typowego w produkcji części składowych), LUC, LTC, PPB, lub nawet POQ powinny dostarczać satysfakcjonujących wyników. Kiedy przychodzi do wyboru techniki określania wielkości partii (lub technik) włączanych do systemu MRP, według opinii autora żadne szczegółowe studia ani wyczerpujące debaty nie są wskazane - w praktyce, każdy algorytm określania wielkości partii jest tak dobry jak każdy inny.

Z wyjątkiem wrodzonych słabości i trudności znaczącego porównania pomiędzy algorytmami, uświadamiamy sobie ponad wszystko, że każda metoda określania wielkości partii jest narażona na unieszkodliwienie w wyniku możliwych zmian przyszłych zapotrzebowań. Kiedy planowane zamówienie jest uruchomione, wielkość zamówienia może okazać się błędna w świetle zmian w wielkości i/ lub umiejscowieniu czasowym zapotrzebowań netto.

Kiedy się to wydarzy, nie ważne jak zawile i z jaką precyzją obliczyliśmy wielkość partii. Wszystkie dyskretne algorytmy określania wielkości partii opierają się na ukrytym założeniu *pewności popytu*. Jest to prawdziwa pięta Achillesowa określania wielkości partii, ponieważ w większości przypadków, wzór przyszłego popytu nigdy nie jest pewny. Bardziej realne założenie byłoby takie, że plan zapotrzebowań w stosunku, do którego jest obliczana wielkość partii zmienia się.

Porównując relatywne efektywności algorytmu jednej metody określania wielkości partii z innym z pozostałych, jest możliwe określenie, który z tych dwóch jest lepszy w porównaniu do danego planu zapotrzebowań netto.

Kiedy okres czasu objęty przez ten plan przechodzi do historii, jednak, może okazać się algorytm pierwotnie osądzony jako mniej skuteczny będzie, w rzeczywistości, miał lepsze przedstawienie w świetle tego jak aktualnie zmienia się zapotrzebowania.

Błędna dokładność techniki określania wielkości partii jest unieważniana przez to, co aktualnie się dzieje, w porównaniu do tego było planowane, że się wydarzy.

Względnie aktualna skuteczność algorytmu określania wielkości partii może być określona tylko z perspektywy czasu.

1.2.2. Problem określania wielkości partii i harmonogramowania w systemach informatycznych

Zagadnienia związane z logiką planowania zapotrzebowania materiałowego w istniejących aplikacjach biznesowych oceniając dostępne na rynku systemy klasy ERP pozostały stosunkowo jednolite pomimo tego, iż systemy stają się coraz bardziej złożone. Kluczowe cechy charakterystyczne obejmują: koordynowanie wymagań odnośnie montażu i kupowanych komponentów w ramach uwolnienia zaplanowanych zamówień i minimalizowanie liczby rozruchów poprzez agregowanie wspólnych zapotrzebowań dla części. Pomimo zaawansowanego stopnia rozwoju istniejącego oprogramowania komercyjnego wykorzystującego logikę MRP jest ono często krytykowane ze względu na generowanie zbyt dużych zapasów robót w toku i długich czasów realizacji (Enns, 2001).

Planowane czasy realizacji i wielkości partii znacząco wpływają na cały proces planowania produkcji i wyniki w systemach produkcyjnych kontrolowane przez systemy ERP. Problem określania wielkości partii ma znaczący wpływ na zyskowność przedsiębiorstw, ale w wielu przypadkach jest rozważany zbyt późno. Systemy ERP przesyłają zapytania do swoich użytkowników odnośnie określenia wielkości partii (dane wejściowe do obliczeń systemu), ale większość z nich ma problemy z określeniem optymalnej wielkości partii rozważając następujące kwestie (Oleśków, 2007):

- jaka ilość powinna być uruchomiona w tym samym czasie dla każdego wyrobu?
- czy partie powinny być podzielone?
- kiedy powinna się rozpocząć produkcja poszczególnych wyrobów?

Zwykle większość kierowników planowania zapotrzebowania materiałowego stosuje częściowo arbitralne zasady takie jak „uruchomić wszystko 4 razy na miesiąc” równo dla wszystkich produktów, wielkość partii stosowana w systemie jest wielkością szacunkową bazującą na danych z przeszłości i wielkościach prognostycznych. Decyzje te wpływają na cały cykl produkcyjny, poziomy zapasów i poziomy obsługi klientów, które mogą dramatycznie wpływać na efektywność zarządzania wąskimi gardłami procesów produkcyjnych w przedsiębiorstwach.

Aby tego uniknąć należy rozważnie podejść do istniejących problemów określania wielkości partii i dokonać wyboru odpowiedniego narzędzia, które pozwoli jak najefektywniej zaplanować wielkości partii w rozważanym horyzoncie planistycznym przy uwzględnieniu wszystkich istniejących ograniczeń. Naukowe podejście do optymalizacji wielkości partii ma tutaj uzasadnienie.

Określanie wielkości partii produkcyjnej to jeden z elementów składowych operatywnego planowania produkcji. Planowanie produkcji jest złożonym zadaniem, które wymaga współpracy pomiędzy wieloma jednostkami funkcjonalnymi w każdej organizacji. W celu zaprojektowania wydajnego systemu produkcyjnego koniecznością jest dobra znajomość środowiska w kategoriach klientów, produktów i procesów wytwórczych. Odpowiednie planowanie produkcji w ramach tych jednostek jest kluczowym warunkiem, aby system produkcyjnym radził sobie z ograniczeniami wydajności i elastyczności i rozważał rzeczywiste ograniczenia zasobów (tj budżet, czas, siła robocza itp.) (Boppana et al., 2001)

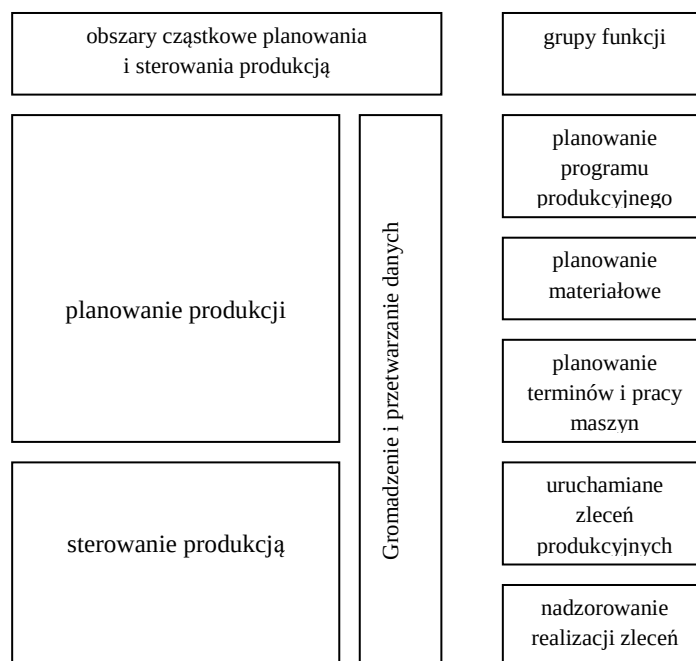
Chociaż takie planowanie występuje w przedsiębiorstwach bardzo często jest ono niewłaściwie zorganizowane ze względu na obecność wielu sprzecznych kryteriów. Dlatego też, konieczne są nowe narzędzia do planowania produkcji, aby uwzględnić wiele różnorodnych kwestii. Nowoczesna produkcja jest bardzo złożona między innymi w wyniku niepewności zapotrzebowań klientów, konkurujących rynków i szybkich rozwoju technologicznych. Zarządzanie produkcją w takich warunkach jest wyzwaniem. (Oleśków i in., 2005)

Dziedzina planowania i sterowania produkcji obejmuje całość działań, których celem jest ustalenie programów zbytu i produkcji, a także określenie wykonania tego programu z punktu widzenia ilości produkowanych wyrobów i terminów realizacji. Zgodnie z tym określeniem w ramach planowania i sterowania produkcji należy określić następujące zmienne decyzyjne i ich wartości:

- zapotrzebowanie na gotowe wyroby i odpowiednie wielkości produkcji,
- zlecenia produkcyjne,

- zamówienia u kooperantów i poddostawców,
- terminy realizacji zleceń i operacji produkcyjnych.

W podobny, jednak nieco bardziej szczegółowy sposób klasyfikuje funkcje planowania i sterowania produkcją Rolf Hackstein – patrz rys. 1.



Rys. 1. Funkcje realizowane w ramach planowania i sterowania produkcją
 Źródło: opracowanie własne na podstawie M. Pawlak, Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 1999, s. 12

Złożone zadanie planowania i sterowania procesem produkcyjnym można rozważać z punktu widzenia planowania i sterowania produkcją, koordynacji zadań, planowania zadań, kontroli maszyn i pracowników. W każdym przedsiębiorstwie system planowania produkcji ma za zadanie osiągnięcie celów zdefiniowanych przez zarząd.

Chcąc zdefiniować proces planowania można przytoczyć definicję W. Shen według którego planowanie jest procesem wyboru i ułożenia w odpowiedniej kolejności czynności w taki sposób, aby osiągnąć jeden lub więcej celów i spełnić określone ograniczenia. Procesem związanym z planowaniem jest harmonogramowanie – proces wyboru pomiędzy alternatywnymi planami i przypisania zasobów i określonych terminów do zestawu czynności w planie. Przydziały te muszą przestrzegać określonych zasad i ograniczeń odzwierciedlających tymczasowe relacje pomiędzy czynnościami i ograniczeniami wydajności współdzielonych zasobów (Shen, 1999).

W ramach planowania produkcji rozróżnia się następujące etapy (Pawlak, 1999):

1) planowanie programu produkcyjnego:

- prognozowanie zapotrzebowania na wyroby gotowe,
- prognozowanie zapotrzebowania na części i podzespoły,
- zgrubne planowanie programu produkcyjnego,
- zgrubne planowanie wyrobów, które będą konstruowane,
- określenie terminów dostaw,
- administrowanie zleceniami klientów,
- sterowanie procesami w sferze konstrukcji,
- sterowanie procesami w sferze planowania pracy.

2) planowanie materiałowe:

- określenie zapotrzebowania brutto,
- określenie zapotrzebowania netto,
- obliczenie ilości, jakie mają być zamówione i wyprodukowane,
- rozłożenie potrzeb w czasie,
- nadzorowanie wielkości zapasów w magazynach,
- przypisanie magazynowanych materiałów do zleceń,
- zamawianie materiałów i części,
- wybór dostawców,
- nadzorowanie realizacji zleceń materiałowych.

3) planowanie terminów i pracy maszyn

- planowanie terminów rozpoczęcia i zakończenia realizacji zleceń i operacji,
- określenie potrzebnych zdolności produkcyjnych (maszyn),
- wyrównanie (optymalizacja) wykorzystania zdolności produkcyjnych,
- planowanie kolejności wykonania,
- określenie dysponowanych zdolności produkcyjnych.

Planowanie i harmonogramowanie produkcji jest skomplikowanym problemem, zwłaszcza kiedy ma miejsce w środowisku otwartym i dynamicznym. System musi być w stanie dodać dodatkowe zadania wcześniej nie przewidywane, a czasami pozwala mu się omijać niektóre zadania. Również zasoby dostępne w celu wykonywania zadań są przedmiotem zmian. Pewne zasoby mogą stać się niedostępne, i wprowadza się dodatkowe zasoby.

Niestety wiele współczesnych przemysłowych środowisk produkcyjnych ciągle polega na

słabej wiedzy w zakresie planowania i sterowania produkcją, Optymalizacja w sensie algorytmicznym jest wykonywana niezwykle rzadko albo wcale. Jednakże problem planowania i sterowania produkcją nie jest rzeczą nową. Zagadnienie to stało się tematem wielu badań naukowych ze względu na coraz większe jego znaczenie. Niektórzy uważają, że bazując na powszechnie uznawanej teorii oraz istniejących technikach rozwój narzędzi optymalizacji planowania produkcji dla określonych zastosowań produkcyjnych będzie przebiegał bez problemów i w prosty sposób. Jest to jednak błędne przekonanie. Rzeczywiste scenariusze zwykle różnią się od stworzonych modeli.

Chociaż takie planowanie występuje w przedsiębiorstwach bardzo często jest niewłaściwie zorganizowane ze względu na obecność wielu sprzecznych kryteriów. Dlatego też, konieczne są nowe narzędzia do planowania produkcji aby uwzględnić te kwestie. Nowoczesna produkcja jest bardzo złożona między innymi w wyniku niepewności zapotrzebowań klientów, konkurujących rynków i szybkich rozwojów technologicznych. Zarządzanie produkcją w takich warunkach jest wyzwaniem.

Każda firma stara się maksymalizować swój wynik ekonomiczny generowany podczas prowadzonej przez siebie działalności. Zastosowanie zintegrowanych rozwiązań informatycznych pozwala osiągnąć ten cel. Nieodpowiednie planowanie i harmonogramowanie produkcji oraz zbyt wysoki poziom zapasów mogą znacząco wpływać na ogólne wyniki każdego przedsiębiorstwa produkcyjnego. Bez wątplenia problem określania wielkości partii stanowi obszar, w którym istnieje wiele możliwości jego poprawy. Określanie wielkości partii jest związane z średnioterminowym planowaniem operacyjnym.

Jedną z głównych decyzji związanych z planowaniem zapotrzebowania materiałowego w systemach ERP jest wybór odpowiedniej metody określania wielkości partii. W ciągu ostatnich lat wielu badaczy opracowało wiele modeli i oceniało wyniki różnych technik określania wielkości partii stawiając sobie za główny cel zaspokojenie popytu i minimalizowanie kosztów. Aby osiągnąć pożądany wynik konieczne jest znalezienie równowagi pomiędzy kosztami utrzymywania zapasów, kosztami uruchomienia i kosztami pojawienia się braków. Określanie wielkości partii wpływa zarówno na wielkość zamówień produkcyjnych jak i częstotliwość, z jaką są one uwalniane na zakład produkcyjny.

Chociaż logika będąca podłożem MRP jest bardzo prosta, należy pamiętać, iż wyniki procesu planowania wielkości partii mają znaczący wpływ na dochodowość całej organizacji, dlatego też decyzje w tym obszarze są bardzo ważne.

Istniejące systemy ERP dostarczają użytkownikom szerokie spektrum technik określania wielkości partii dla indywidualnych zapotrzebowań netto celem zminimalizowania całkowitych kosztów utrzymywania zapasów i zamawiania materiałów.

Istnieje wiele technik określania wielkości partii, przy czym wiele z nich bazuje albo na modelach ekonomicznej wielkości partii lub zmiennej wielkości partii i takie metody są najczęściej wykorzystywane w praktyce w przedsiębiorstwach produkcyjnych.

Teoretyczna struktura efektywnego rozwiązywania problemów określania wielkości partii w systemach ERP powinna spełniać poniższe wymagania:

- obejmować całą strukturę wyrobu – wielopoziomowy wymiar,
- być zdolna do radzenia sobie z systemami obejmującymi wiele wyrobów,
- brać pod uwagę ograniczenia wydajności,
- być zdolnym do radzenia sobie z wydłużającym się horyzontem planistycznym,
- radzić sobie ze zmiennym kosztem i zmiennym zapotrzebowaniem,
- redukować nerwowość systemu.

Przeprowadzono wiele badań porównujących istniejące techniki (Berry W.L., Callarman T.F. i Hamrin R.S., Axsater S.) i opracowujących ulepszone techniki określania wielkości partii.

Badania te ukazały, iż wybranie odpowiedniej techniki stanowi bardzo poważny problem.

Dla większości powszechnie wykorzystywanych technik określania wielkości partii w systemach ERP możemy zidentyfikować następujące ograniczenia (Stockton et al., 2004):

- ograniczone długości horyzontu planistycznego MRP, dla którego można znaleźć optymalne harmonogramy. Użyteczność wielu metod w praktycznych sytuacjach jest wątpliwa, ponieważ musi być rozważona duża ilość alternatywnych harmonogramów. Ponadto optymalne krótkoterminowe harmonogramy niekoniecznie wpływają na optymalizację zapasów w długim okresie czasu,
- ograniczone zastosowanie w przemyśle wytwórczym z powodu złożoności procedur wymaganych do wygenerowania optymalnych lub bliskich optimum harmonogramów. Bardzo często jest to trudne do zrozumienia przez personel w przedsiębiorstwach produkcyjnych,
- istniejące tradycyjne metody traktują problem określania wielkości partii jako proces jednoetapowy, ale MRP jest procesem wieloetapowym, dlatego też każda technika określania wielkości partii powinna rozważać wszystkie wyroby do których odnosi się

zapotrzebowanie, zarówno horyzontalnie jak i wertykalnie w ramach całych struktur wyrobów (BOM),

- brak wystarczających zasobów dla nieprzerwanego monitorowania efektywnego wyboru wielkości partii i zastosowania odpowiednich metod. Aby osiągnąć dobre rezultaty, należy ostrożnie dokonywać wyboru odpowiedniej metody określania wielkości partii dla każdego wyrobu/ okresu zapotrzebowania w procesie MRP i ponownego wyboru metod określania wielkości partii, gdy struktury wyrobu lub harmonogramy zapotrzebowania zmieniają się,
- wszystkie istniejące metody używają kosztów do zmierzenia efektywności określonej polityki określania wielkości partii, z wieloma metodami nakładającymi ograniczenia na rozważane typy kosztów. Nie jest powszechne rozważanie innych zmiennych lub ograniczeń takich jak dostępność kapitału roboczego lub przestrzeni magazynowej,
- brak zrozumienia kiedy zmiana istniejących technik określania wielkości partii w istniejącym oprogramowaniu MRP może doprowadzić do katastrofalnych konsekwencji takich jak pojawienie się nadmiernych kosztów utrzymywania zapasów.

Bez wątpienia główną wadą istniejących technik określania wielkości partii jest ich niezdolność do dostarczenia optymalnych rozwiązań w rozsądnym czasie obliczeniowym dla rzeczywistych problemów określania wielkości partii obejmujących złożone struktury produktów. Przez sformułowanie optymalne rozwiązanie należy rozumieć wielkość partii spełniającą określone kryteria, które mogą być odmienne w zależności od specyfiki wyrobu, warunków produkcyjnych, tendencji w obrębie popytu itp. Z założenia wielkość partii powinna minimalizować zbędne koszty związane z utrzymaniem zapasów, zamawianiem, niespełnionymi zamówieniami klientów, przestojami w produkcji.

Oprócz określania wielkości partii istotnym elementem optymalnego planowania i sterowania produkcją w przedsiębiorstwie produkcyjnym jest generowanie harmonogramu produkcji. Linie produkcyjne są obecnie wykorzystywane do wytwarzania wielu różnorodnych produktów tworzących rodziny produktów. Producentowi zależy na efektywnej produkcji minimalizującej całkowite koszty, całkowity cykl produkcji i modyfikacje ustawień linii produkcyjnej. Problemem jest znalezienie odpowiedniej sekwencji wytwarzanych modeli potrzebnych do spełnienia wymagań rynku. W przypadku linii montażowych pracujących w rytm taktu, czas potrzebny na wykonanie odpowiedniej pracy na każdej stacji ograniczony jest do pewnej maksymalnej wartości. Ze względu na ograniczenia wynikające z czasu cyklu, linie montażowe, podprocesy mogą posiadać różne wskaźniki taktu produkcji danego

asortymentu. W tym przypadku pojawia się problem rozmieszczenia i wyznaczenia wielkości buforów. Z jednej strony bowiem bufor zwiększają koszty linii, z drugiej usprawniają jej działanie i ich brak mógłby powodować zakłócenia procesu produkcji (Swoboda, 2014).

Planowanie i harmonogramowanie stara się efektywnie alokować zasoby podczas spełniania zamówień klientów i popytu na rynku, często przy znajdując kompromis pomiędzy konfliktowymi celami. Decyzje są przeważnie z obszaru operacyjnego (krótkoterminowego) i taktycznego (średnioterminowego) problemów planowania, takich jak poziomy obciążenia pracą, wielkości partii produkcyjnych, produkcyjne zasady sekwencjonowania.

Harmonogramowanie partii produkcyjnych, podobnie jak definiowanie ich wielkości, znajduje się w obszarze zainteresowania dużej liczby badań. W wielu zastosowaniach przemysłowych udowadnia się, że jednoczesne harmonogramowanie i określanie wielkości partii umożliwia efektywniejsze wykorzystanie zdolności produkcyjnych.

Pod pojęciem „harmonogramowanie produkcji” (szeregowanie zadań produkcyjnych) rozumie się określenie wielkości partii produkcyjnych oraz sporządzenie szczegółowego harmonogramu wraz z wszystkimi występującymi ograniczeniami. Harmonogram jest to „wykres lub opis poszczególnych operacji (zadań) uwzględniający jednostki terminowania, w których te operacje (zadania) będą wykonywane” (Sobaszek, 2013).

Równoczesne określanie wielkości partii i harmonogramowanie jest istotne kiedy jeśli podczas produkcji pojawiają się czasy przebrojeń i koszty przebrojeń zależne od czasu (Fandel, Stammen-Hegene, 2006).

Wielu producentów oddziela decyzje związane z określaniem wielkości partii od harmonogramowania i sekwencjonowania produkcji aby uprościć złożoność podejmowania decyzji. Często wpierw określa się kolejność produkcji a potem wielkości partii biorąc pod uwagę prognozę zapotrzebowania. Jednakże może okazać się że produkcja taka będzie mniej efektywna i bardziej kosztowna niż powinna być. Jeśli wyrób ma stosunkowo niski popyt należy rozważyć czy nie opłaca się produkować rzadziej, utrzymując pewien zapas i uwzględniając koszty związane z przebrojeniami maszyn.

Harmonogramowanie i określanie wielkości partii omawiane było przez wielu badaczy – Drexl i Kimms (1997), Meyr (2000), Karimi i inni (2003), Chan i inni (2013), Ferreira i inni (2012), Guimaraes i inni (2013), Clark i inni (2011). W czerwcu 2010 na 24-ej Europejskiej Konferencji on Operational Research w Lizbonie po raz pierwszy zorganizowano panel dotyczący określania wielkości partii i harmonogramowania obejmujący siedem sesji zawierających ponad 25 prezentacji, który jest co roku kontynuowany. (Clark i inni, 2014).

Ogólny problem określania wielkości partii i harmonogramowania (ang. *General Lot-sizing and Scheduling Problem – GLSP*) opracowany przez Fleischmanna i Meyra (Fleischmann, Meyr, 1997) minimalizuje koszty magazynowania i kosztów przebrojeń zależnych od czasu na pojedynczej maszynie o określonych zdolnościach produkcyjnych, pozwalając na wielokrotne przebrojenia w każdym pojedynczym okresie czasu. Meyr (2000) rozwinął model uwzględniając czasy przebrojeń zależne od sekwencji. Toso i inni (2009) zmienili model umożliwiając opóźnienia i inne niż trójkątne czasy przebrojeń, ale ciągle zakładają najwyżej jedną partię na wyrób w każdym okresie. Model Clark i innych umożliwia wiele partii (Clark i in., 2014).

W większości przedsiębiorstw produkcyjnych harmonogram produkcji tworzony jest w systemach klasy ERP.

Do głównych celów szeregowania zadań produkcyjnych zalicza się (Sobaszek, 2013):

- dotrzymanie terminów i unikanie opóźnień zakończenia pracy,
- ograniczenie czasu pomiędzy złożeniem zamówienia przez klienta do zakończenia transakcji,
- wykorzystanie zasobów pracy (wykorzystanie w pełni sprzętu oraz personelu).

Podczas rozwiązywania problemów praktycznych z obszaru harmonogramowania korzysta się podejścia ewolucyjnego. Proces harmonogramowania produkcji związany jest z występowaniem licznych problemów przeróżnej natury. Podział metod szeregowania zadań produkcyjnych wynikający z różnorodności stosowanych algorytmów wyróżnia (Pawlak, 1999, Sobaszek 2013):

- metody poszukujące dokładnych rozwiązań problemów (przeszukiwanie zupełne, przeszukiwanie losowe, programowanie całkowitoliczbowe)
- metody podziałów i ograniczeń
- systemy ekspertowe
- heurystyczne metody budowania harmonogramów (systemy dyspozytorskie, reguły priorytetów algorytmy przeszukiwania sąsiedztwa),
- metody zaliczane do algorytmów ewolucyjnych.

Problem określania wielkości partii i harmonogramowania jest zdecydowanie problemem NP.-trudnym.

W problemie tym zasadniczo zakłada się, że obróbka wyrobu na danej maszynie może się zacząć gdy skończyła się operacja na maszynie poprzedniej i w danym momencie obróbka

detalu może przebiegać na jednej maszynie. Założenie takie powoduje wzrost czasu przestoju maszyny w oczekiwaniu na obróbkę. Jednakże w wielu rzeczywistych sytuacjach produkty są przewożone na paletach i przenośnikach i nie ma ograniczeń żeby skończyć cały proces partii wyrobu i następnie przekazać ją na następne stanowisko.

Modele umożliwiające harmonogramowanie i określanie wielkości partii zostały omówione w dalszej części pracy w rozdziale 3.

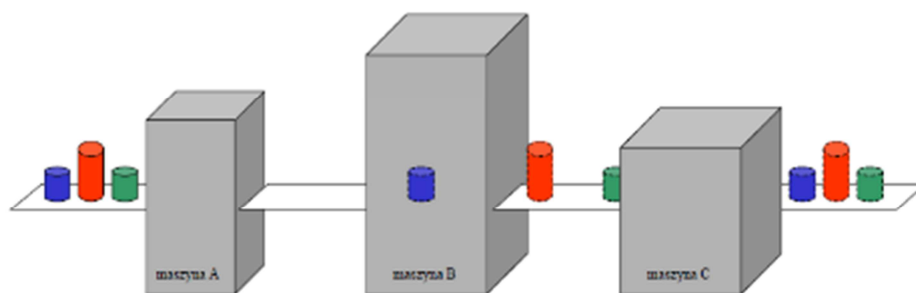
1.3. Określanie wielkości partii w warunkach szczupłego wytwarzania

Zgodnie z wytycznymi związanymi ze szczupłym wytwarzaniem (ang. *lean manufacturing*) w przedsiębiorstwie chcącym stosować zasady lean wielkość partii produkcyjnej powinna być jak najmniejsza. Polityki związane z określaniem wielkości partii wpływają na wyniki zakładów produkcyjnych, ale niestety bardzo często są stosowane zbyt późno.

Firmy, które wdrażają techniki lean bardzo często słyszą że idealną wielkością partii jest wielkość partii zbliżająca się do „1” tam gdzie to możliwe (przepływ jednej sztuki – ang. *one piece flow*). Taka wielkość partii zależy od osiągnięcia szybkich czasów przebrojeń.

Przepływ jednej sztuki polega na obróbce i przemieszczaniu produktów w procesie produkcyjnym sztuka po sztuce, w tempie określonym na podstawie zapotrzebowania i wymagań klientów.

Istota przepływu jednej sztuki została przedstawiona na rys. 2.



Rys. 2. Przepływ jednej sztuki (one piece flow)
Źródło: (J. Czerska, 2002)

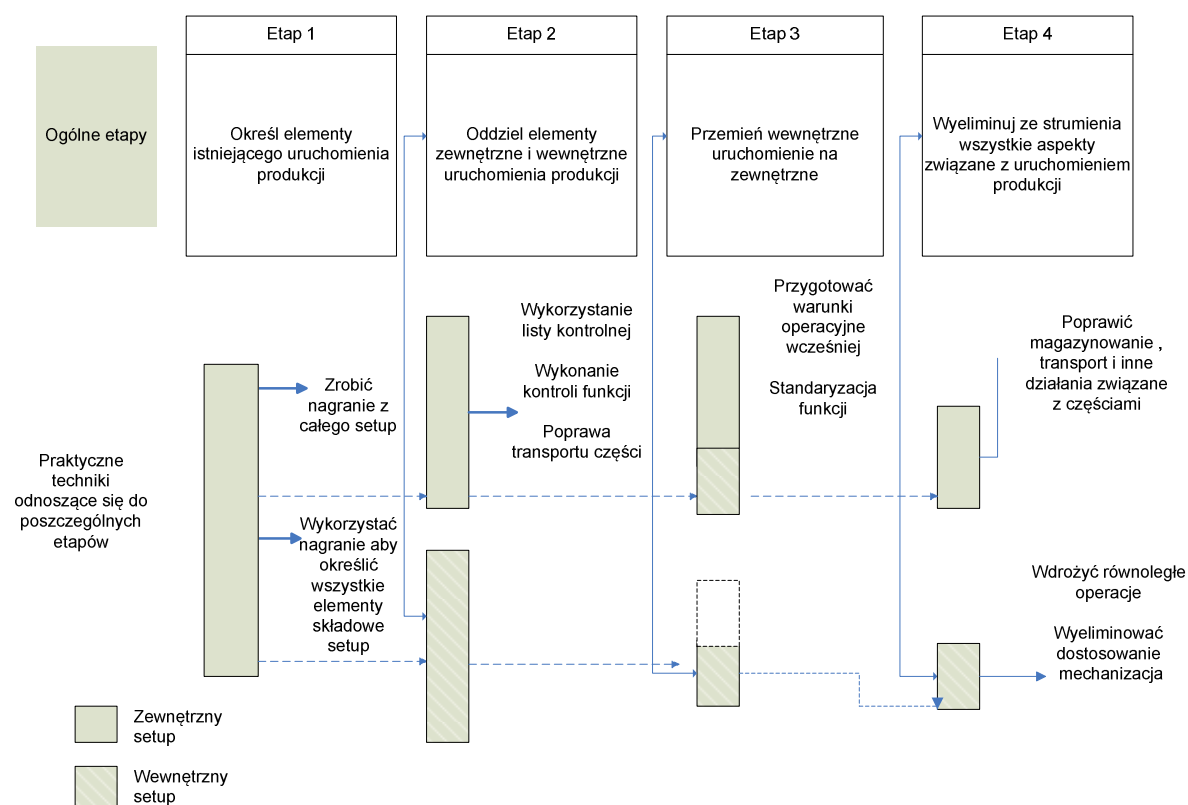
Stosując to rozwiązanie można skrócić długość cyklu produkcyjnego do 80%, zredukować wartość zapasów gotowych do 60%, zmniejszyć liczbę braków powstających w trakcie

produkcji do 90%, wyeliminować czynności niedodające wartości produktowi do 100%, a także zrównoważyć obciążenie pracowników bezpośrednio produkcyjnych oraz ograniczyć powierzchnię produkcyjną.(Czerska, 2002). *One Piece Flow* można wdrożyć praktycznie wszędzie, gdzie mamy do czynienia z powtarzalnością operacji i zabiegów.

Produkcja w systemie przepływu jednej sztuki (Kubik, 2010):

- umożliwia płynne dostawy towarów do klientów bez opóźnień,
- ogranicza środki potrzebne do składowania i transportowania towarów,
- zmniejsza ryzyko zniszczenia, uszkodzeń lub starzenia się produktów,
- ułatwia wykrywanie i rozwiązywanie problemów.

Zapewnienie przepływu jednej sztuki wymaga zminimalizowania czasów przygotowawczo-zakończeniowych tak aby produkcja była zrównoważona. Zminimalizowanie czasów przebrojeń jest możliwe do osiągnięcia poprzez wdrożenie techniki SMED (ang. *Single Minute Exchange of Die* – szybkie przebrojenie) (patrz rys.3). Technika ta została opracowana przez Shigeo Shingo. (Swamidass, 2000)



* Setup- czas przygotowawczo- zakończyeniowy, czas przebrojeń

Rys. 3. Etapy SMED dla szybkiej zmiany oprzyrządowania

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Swamidass Paul M., Encyclopedia of production and manufacturing management, SMED, Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 713

W niektórych przypadkach techniki SMED nie są możliwe ani nawet praktyczne.

Zastosowanie rozwiązań SMED pozwoli bardzo znacząco skrócić przebrojenie w niemal każdym przypadku. SMED to koncepcja teoretyczna i grupa technik, które umożliwiają przebrojenie i ustawienie maszyny w czasie krótszym niż 10 minut (Kubik Sz., 2010).

W tych przypadkach optymalna wielkość partii minimalizująca cykle produkcyjne jest szczególnie ważna.

Wykorzystując odpowiednią metodologię i oprogramowanie informatyczne kierownicy są w stanie osiągnąć optymalizację wielkości partii i dojść do równowagi pomiędzy poziomami zapasów, cyklami produkcji i wydajnością tak, aby osiągnąć lepsze poziomy obsługi klienta i miary związane z całkowitą wydajnością produkcji.

W rzeczywistych warunkach zarządzanie produkcją nastrocza dużo trudności. Nawet jeśli bazujemy na doskonałej wiedzy teoretycznej, konieczne jest odpowiednie doświadczenie aby dać sobie radę. Każde narzędzie minimalizujące straty produkcyjne jest bardzo pożądane. Problem określania wielkości partii produkcyjnej określa najlepszą strategię uzupełniania, która definiuje wielkość uzupełnień i rozmieszczenie czasowe partii produkcyjnych. Poszukiwanie optymalnego rozwiązania dla dynamicznych systemów produkcyjnych pod pewnymi założeniami ciągle jest procesem skomplikowanym i stosunkowo złożonym obliczeniowo. Wiele technik heurystycznych zostało zaproponowanych w różnych aspektach problemu określania wielkości partii, ale mogą one zagwarantować jedynie lokalne optima. (Oleśków-Szłapka, Sobiś, 2009) Wybrane techniki z tego obszaru zostaną omówione w podrozdziale 3.2.

W szczupłej produkcji odpowiednim typem produkcji są linie produkcyjne ze względu na takie korzyści jak: możliwość bezpośredniego przekazywania części z maszyny na maszynę, małe wydatki na transport, możliwe małe wielkości partii transportowych, brak zakłóceń pomiędzy dwoma częściami na tej samej maszynie, nie zbyt długie kolejki części czekających na obróbkę.

Strategia lean bazuje między innymi na ciągłym przepływie produkcji, który może być osiągnięty dzięki jednolitemu obciążeniu zakładu i harmonogramowaniu aby zrównoważyć przepływ z małą wielkością partii. System pull lub Kanban jest jedną z najefektywniejszych metod sterowania produkcją wyrobów składowych aby zaspokoić zapotrzebowania właśnie wtedy kiedy są potrzebne w montażu. Co więcej, zdolność szybkiego przeprowadzenia zmian i redukcji czasu setup z jednej części na inną jest krytyczna aby wdrożyć system pull w sytuacji kiedy liczne części i wyroby gotowe są produkowane. Szybkie zmiany zapewniają

zdolność do produkowania małych wielkości partii tak jak sygnalizują to karty kanban a także utrzymanie wysokiego wykorzystania maszyn i pracowników (Cincom, 2008).

Jak podkreślano w wielu badaniach (Liker, 2004; Schonberger i in., 1997; Whitmann, 1990; Womack, Jones, 1996) pomyślnie wdrożenie JiT i zasad szczupłego wytwarzania może prowadzić do zmniejszenia kosztów zapasów, poprawy jakości i lepszego wykorzystania parku maszynowego. Niezbędnym wymaganiem pomyślnego wdrożenia jest zdolność do uruchomienia małych wielkości partii o czym pisali już (Gregor i in. 2000, Fertsch 1998, Oleśków-Szłapka J. i Sobiś A 2009 i inni).

Wiadomość o redukcji zapasów prowadzącej do ciągłej poprawy przysłała z firmy Toyota. Toyota jest obecnie jednym z największych producentów samochodów na świecie. Jej systemy produkcyjne są doskonale wyjaśnione w książce Jeffrey'a Liker „Droga Toyoty”. Podkreśla on iż redukcja zapasów jest kluczowa aby osiągnąć to, co Toyota nazywa przepływem jednej sztuki. Ma to miejsce gdy każda osoba w procesie biznesowym pracuje tylko nad jedną sztuką w danym czasie – i tylko ma jedną sztukę dostępną aby nad nią pracować. Kiedy skończą pracę nad 1 sztuką, przekazują ją do kolejnej osoby i następna część do nich przychodzi od innej osoby wcześniej w całym łańcuchu produkcyjnym. Toyota nieustannie kładzie nacisk na eliminowanie problemów, ponieważ każdy problem powoduje zakłócenie przepływu i przestój w montażu samochodów. Przepływ jednej sztuki jest szybkim i elastycznym systemem produkcyjnym który poprawa wydajność. W porównaniu tradycyjna produkcja angażuje ludzi pracujących nad wieloma częściami lub partiami produkcyjnymi naraz zanim zostaną one przekazane do następnej osoby. Produkcja w partiach jest kłopotliwa, powolna i niewydajna – ale jest powszechnie rozpowszechniona i trudna do wyeliminowania (Mehra, Inman, 1992).

Przepływ jednej sztuki (ang. *one-piece-flow*) to przepływ wyrobów jeden za drugim w ilości zgodnej z zapotrzebowaniem klienta. W przeciwieństwie do produkcji partiami, przepływ jednostrumieniowy wymaga, aby wyroby przepływały przez maszyny pojedynczo w ciągu zapewniającym realizację zasady FIFO (pierwszy na wejściu, pierwszy na wyjściu).

Małe wielkości partii w szczupłej produkcji zmniejszają zmienność systemu i usprawniają produkcję. Jednakże literatura związana ze Szczupłym Wytwarzaniem dostarcza niewiele wskazówek w jaki sposób określać wielkość partii produkcyjnych.

Małe wielkości partii mogą zmniejszyć zapas robót w toku WIP (ang. *Work-in- process*) i cykl produkcyjny jeśli czasy uruchomienia się są dużo większe od jednostkowych czasów pracy. Zmniejszenie cyklu produkcyjnego pozwala producentowi szybciej odpowiedzieć na nowe zamówienia klienta i jakiekolwiek zmiany w popycie, a także zwiększa

prawdopodobieństwo zaspokojenia popytu on time. Małe wielkości partii mają skłonność do zmniejszania WIP ponieważ partia spędza mniej czasu w centrum obróbczym, powodując iż nowe nadchodzące partie krócej oczekują na dostępność maszyn. Jednakże zmniejszanie wielkości partii zbyt bardzo może czasami mieć przeciwny skutek i zwiększyć WIP ponieważ wykorzystanie maszyn może znacząco wzrosnąć w wyniku wzrostu czasów uruchomienia (setup). (Feldmann et al., 1994)

Carlson, Yao, and Girouard (1994) podają przykład, gdzie producent oprzyrządowania PCB produkował partie 100 sztuk lub więcej sztuk ponieważ czas uruchomienia wynosił 3 godziny na jedno uruchomienie produkcji. Jeśli wielkość partii jest zmniejszona to 5 płyt, czas setup przekłada się na około 36 minut na płytę. Problem określania odpowiedniej wielkości partii komplikuje fakt, iż ta sama linia montażowa PCB może produkować różne typy płyt, każda ma swoje własne unikalne czasy setup. Czynniki te zwiększają potrzebę wykorzystania analitycznych narzędzi które pomagają określić jak niska może być wielkość partii aby nie wpływała negatywnie na WIP.

W miarę jak przedsiębiorstwa przesuwają się w kierunku szczupłego wytwarzania, kierownicy potrzebują narzędzi analitycznych do określania wielkości partii. Zmniejszanie setup często może nieść z sobą koszt setup i tym samym obniżać znacząco wielkości partii. Skutki redukcji czasu przezbierania dla środowiska Make-To-Order (MTO- produkcja na zamówienie) i Make-To-Stock (MTS- produkcja na magazyn) są przedstawione w tabeli 2.

Tab. 2. Skutki zmniejszania czasu przezbierania na środowiska Make-To-Order (MTO) i Make-To-Stock (MTS)

Make to Stock	Make to order
• Zmniejszona optymalna wielkość partii • Szerszy zakres wielkości partii • Niższy całkowity koszt • Niższe zapasy	• Niższe minimalne wielkości partii • Wyższe granice zamówień powyżej minimum

Źródło: Strategos, Lot sizing and lean manufacturing strategy. January 2003, <http://jobfunctions.bnet.com/>.

Małe partie oznaczają mniejsze średnie zapasy i krótsze cykle produkcyjne (Dan Reid et al., 2007; Strategos, 2003)

- Małe partie z krótszymi czasami uruchomienia zwiększają elastyczność odpowiadania na zmiany popytu

- Dążenie do uruchomień jednocyfrowych < 10 minut
- Proces redukcji setup jest dobrze udokumentowany
- a) Zewnętrzne zadania – zrobić przygotowania gdy obecna praca ciągle trwa
- b) Wewnętrzne zadania – ułatwić, wyeliminować, skrócić etapy obejmujące rozmieszczenie, dostosowanie, umocowanie itp.
- Ostatecznym celem są pojedyncze wielkości partii.

Z punktu widzenia szczupłej produkcji, dwa czynniki prowadzą do redukcji wielkości partii w porównaniu z myśleniem tradycyjnym (Bicheno i in., 1997). Pierwszym jest fakt, iż koszty magazynowania są zwykle niedoszacowane, ponieważ nie bierze się pod uwagę czynników niematerialnych takich jak zapasy uwzględniające problemy jakościowe, zmniejszając widoczność i zwiększając straty w zakresie transportu, ruchu i czasu oczekiwania (lub cykli produkcyjnych). Drugim czynnikiem jest preferowanie w szczupłych zakładach nie tylko redukowania czasu przebrojenia poprzez czynności SMED ale również standaryzują operacje, tym samym zmniejszając zmiany czasu podczas zmian. Znaczenie tego ostatniego czynnika staje się oczywiste (Bicheno, 2000; Schonberger, Knod 1997).

Dwoma kluczowymi zmianami w przedsiębiorstwach mającymi prowadzić do przepływu jednej sztuki to poprawa obróbki materiałów i redukcja czasu przebrojeń. Firma może również wykorzystać analizę ekonomicznej wielkości partii, aby obliczyć pożądany czas przeobrażania (Womack, Jones, 1996).

Większość amerykańskich firm, które próbowały zmniejszyć czas przebrojeń odkryły, że można te czasy zmniejszyć o 75% bez znacznych inwestycji w rekonfigurację maszyn czy oprzyrządowania. Warunkiem koniecznym jest zapewnienie by wszystkie narzędzia potrzebne do zakończenia rozruchu były ułożone w centrum obróbczym zanim proces rozruchu się rozpocznie (Blackstone, 2008).

Wiele technik zostało zaproponowanych dla redukcji czasów przebrojeń (Shingo 1981, 1985; Onwubolu, 2002):

- zmniejszenie procesów rozruchu które świadczą, iż maszyna nie pracuje podczas okresu rozruchu,
- dążenie do osiągnięcia pojedynczego rozruchu (kiedy czas rozruchu jest zredukowany do 10 min i mniej),
- wyeliminowanie dostosowywania na tyle na ile jest to możliwe podczas procesu rozruchu,

- jeśli to możliwe unikanie rozruchu
- wykorzystanie standardowego oprzyrządowania
- wpływanie na zmiany w projekcie maszyn, lub wykorzystanie bardziej zaawansowanego sprzętu które zapewnia automatyczny rozruch lub rekonfigurację maszyn.

Kiedy czasy przebrojeń uniemożliwiają ustalenie wielkości partii na poziomie 1 sztuki, części muszą być produkowane w partiach współdzielących wspólny czas przebrojeń. Tradycyjnie wykorzystuje się regułę *“Every Part Every Interval”* (EPEI) aby ustalić wielkości partii. Podejście to inaczej nazywa się ang. *capacity-based lot sizing*. W tych obliczeniach kierownictwo ustala docelowe wykorzystanie wydajności np. 85% i następnie znajduje najmniejsze przerwy które umożliwiają takie wykorzystanie maszyn aby równało się ustalonemu celowi zakładając że każda część jest produkowana podczas takiej przerwy. Wielkość partii dla każdej części jest obliczana na podstawie prognoz popytu dla tej części w tej przerwie. Z powodu zmienności, technika ta nie może być stosowana w złożonych środowiskach wymagających zaangażowania aktywów (Invistics, 2012).

Podejście to jest niekorzystne ze względu na dwa czynniki. Po pierwsze odpowiednie wykorzystanie docelowe musi być optymalizowane w oparciu o zmienność. Zakład z dużą zmiennością może optymalizować wykorzystanie 70%, podczas gdy jeden z niższą zmiennością wykona lepiej przy poziomie 90%. Po drugie, odpowiednia wielkość partii dla każdej części zmienia się wraz ze zmianą zapotrzebowania na wyrób i ze zmianą zdolności produkcyjnych. Na przykład, jeśli zapotrzebowania na przepływ jednej sztuki zwiększa się, optymalna wielkość partii dla wyrobów na tej ścieżce zwiększa się,. Jedynie poprzez optymalizowanie wielkości partii aby odzwierciedlić tę zmienność przeciwdziała w złożonych środowiskach tym słabościom. Nowe metody badań operacyjnych dostarczyły techniki optymalizacji wielkości partii, uwzględniając w swoich obliczeniach wiele źródeł zmienności (Invistics, 2004).

Zmniejszanie wielkości partii wymaga identyfikacji wąskich gardeł i ich eliminowanie poprzez program systematycznego obniżania setupów pozwalający na obniżanie zapasów robót w toku które zmniejszają cykl produkcyjny.

Korzyści redukcji cyklu produkcyjnego poprzez mniejsze wielkości partii są następujące (Gulid, 2003):

- większa widoczność rosnącej różnorodności produktów bez nadmiernych kosztów,
- większa elastyczność produkcji,

- niższa podstawa kosztowa,
- zwiększona konkurencyjność,
- zwiększona elastyczność produkcji.

Poniżej przedstawiono krok po kroku technikę obliczania minimalnych wielkości partii, uwzględniając istniejące ograniczenia. Podejście to nazywane jest określanie wielkości partii oparte na wydajności.

W przypadku tym, aby określić wielkość partii trzeba wykonać poniższe kroki (Guild, 2003):

- po pierwsze obliczyć całkowitą dzienną wydajność dla zasobu. Jeśli np. maszyna jest obsługiwana na 2 zmiany po 8 godzin, dzienna wydajność wynosi 960 minut,
- Następnie, uwzględnić dostępną wydajność dla czasu bez usterek. Jeśli czas bez usterek jest ok. 90%, całkowita dzienna wydajność dostępna dla zmiany maszyny do obróbki części będzie 864 minuty (960 razy 90%).
- Następnie, obliczyć całkowitą dzienną wydajność wymaganą do obróbki części, dzienne zapotrzebowania na części są mnożone przez ich czas cyklu produkcyjnego na sztukę, wyniki są zestawiane dla wszystkich części na maszynie. Na przykład jeśli 12 części jest uruchamianych na maszynie, i dzienne zapotrzebowania wynosi 10, czas cyklu wynosi 6 minut, całkowity dzienny czas cyklu wynosi 720 min (12 części razy 10 każdego dnia przez 6 minut długości cyklu).
- Poprzez odjęcie 720 min wydajności cyklu wymaganej od 864 min dostępnej wydajności, znajdujemy ilość dziennej wydajności dostępnej na zmianę – 144 min (864-720).
- Ostatecznie ilość czasu wymaganego na wykonanie jednego przebrojenia dla jednej części jest obliczana. Np. założmy że potrzeba 10 min na przebrojenie maszyny dla każdej części czyli 120 min dla wszystkich części (12 części razy 10 min każda z nich). Czyli zasób potrzebuje 120 min na każdą przerwę związaną z przebrojeniem podczas przełączania.
- Kiedy podzielimy dostępną wydajność na zmiany 144 min przez 120 min na przerwę, znajdziemy iż każda część może być ustalona i uruchomiona 1.2 razy w ciągu dnia (144 podzielone przez 120). Dlatego też wielkość partii dla każdej części będzie odwrotnością lub 0,83 dziennego popytu.

Obliczenie ilości przerw na dzień może być zredukowana wg poniższego wzoru (równanie 4)

$$Ilość\ przerw\ na\ dzień = \frac{[A * U - \sum (D * CT)]}{\sum (C * O)} \quad \text{Równanie 4}$$

gdzie:

A = Dzienny dostępny czas

U = Ilość czasu bez awarii wyrażona w procentach

D = dzienne zapotrzebowanie dla każdej części

CT = czas cyklu dla każdej części

CO = czas przezbierania dla każdej części

Przerwa na przebrojenie jest po prostu odwrotnością (równanie 5).

$$RI_{DAYS} = \frac{\sum (C * O)}{[A * U - \sum (D * CT)]} \quad \text{(Równanie 5)}$$

Powyższa metodologia dla określania wielkości partii wpływa na mniejsze wielkości partii niż ekonomiczna wielkość partii EWP – bez zmniejszania czasów przebrojeń, wdrażania komórek produkcyjnych czy poprawiania wydajności. W rezultacie, można zmniejszyć w znaczący sposób zapasy z odpowiadającymi im kosztami utrzymania. Oczywiście dla pewnych przypadków związanych z problemami wielkości partii przerwy na uzupełniania muszą być przemodelowane w oparciu o rzeczywiste oczekiwania zdolności produkcyjnych i co dalej za tym idzie może wpływać na poważne redukcje zapasów i czasów produkcji.

1.4. Czynniki produkcyjne mające wpływ na wybór odpowiedniej wielkości partii produkcyjnej i ustalania harmonogramu produkcji

Bardzo wiele różnorodnych czynników ma wpływ na dobór odpowiedniej wielkości partii. Ustalenie wielkości partii jest podstawową decyzją logistyczną, a jej niedostateczne wykorzystanie wynika głównie z braku wiedzy na temat możliwości, warunków i skutków stosowania wybranych metod.

Istnieje duża dowolność przy doborze wielkości partii i odstępów w terminach ich uruchamiania, czyli częstotliwości. Na ustalenie wielkości partii mają wpływ czynniki ekonomiczne, kiedy użytkownik wybiera jeden ze znanych modeli obliczeniowych, i organizacyjne uzależnione od indywidualnych warunków przedsiębiorstwa i rozpatrywanego wyrobu. Ustalenie wielkości partii i ustalenie ich rozmieszczenia w celu minimalizowania kosztów i czasów uruchomienia (zamawiania) jest definiowane jako problem ekonomicznego planowania partii (ang. *ELSP- Economic Lot Scheduling Problem*) (Roundy, 1989). Ma on w praktyce wiele zastosowań zwłaszcza gdy koszty utrzymania zapasów są znaczne, tak jak w przemyśle farmaceutycznym, papierniczym, chemicznym, aluminiowym i stalowym.

W zasadzie dla każdego wyrobu w konkretnych warunkach organizacyjno – produkcyjnych można wybrać kilka metod określania wielkości partii.

Przy doborze partii produkcyjnej wyrobu uwzględnia się między innymi następujące czynniki (Bursche i in., 1978):

- partia produkcyjna wyrobu powinna zawierać taką liczbę sztuk, aby stanowiskochłonność (pracochłonność) wykonania zasadniczych operacji nie była mniejsza od jednej zmiany roboczej (ze względu na wprawę pracownika),
- partia wyrobu winna być tak dobrana, aby jej okres powtarzalności równał się jednemu dniowi lub wielokrotności dnia roboczego (ze względu na ułatwienie ewidencji),
- partie produkcyjne różnych detali wykonywanych w jednej komórce produkcyjnej powinny mieć równe okresy powtarzalności lub okresy te powinny stanowić wzajemne wielokrotności,
- przy produkcji na automatach lub innych urządzeniach o dużym czasie wymiany narzędzi pożądaną jest, aby stanowiskochłonność partii produkcyjnej odpowiadała okresowi trwałości narzędzi,

- w przypadku urządzeń o dużej zmienności wykonywanych na nich operacja, zbyt małe wielkości partii produkcyjnych mogą spowodować zbyt duże udziały czasu przebrojeń, co może sprawić, że zaplanowana produkcja nie zostanie wykonana w okresie dysponowanego funduszu czasu tego urządzenia, aby temu zapobiec należy obliczyć dla tego urządzenia minimalny okres powtarzalności, a następnie wielkości minimalnych partii produkcyjnych.

Jest wiele czynników, które determinują konieczność zmniejszenia lub zwiększenia istniejącego normatywu wielkości partii produkcyjnej. Takie wybrane czynniki zostały wymienione poniżej (Lis i in., 1976).

Podstawowe czynniki przemawiające za zwiększeniem partii produkcyjnej to:

- zmniejszenie czasu przygotowawczo-zakończeniowego przypadającego na jednostkę produkcji,
- wykorzystanie w większym stopniu dysponowanego funduszu czasu stanowiska na cele produkcyjne, a w mniejszym na przebrojenia,
- wzrost wydajności, poprawa jakości w wyniku nabierania wprawy przez robotnika,
- stosunkowo wysoki koszt uruchomienia produkcji/zamawiania,
- nagły wzrost zapotrzebowania brutto i konieczność realizacji zamówienia klienta.

Natomiast czynnikami przemawiającymi za zmniejszeniem partii produkcyjnej są między innymi:

- wydłużenie cyklu produkcyjnego, co powoduje wzrost zapasów produkcji w toku,
- zmniejszenie zapotrzebowania na powierzchnię magazynowania zapasów,
- wzrost kosztów utrzymania zapasów,
- wzrost zamrożenia środków obrotowych i odsetek płaconych bankowi,
- zmienny i nieregularny popyt (zapotrzebowanie brutto),
- minimalizacja zapasów robót w toku
- wyszczuplanie produkcji i wprowadzania zasad szczupłego wytwarzania

W praktyce głównym ograniczeniem maksymalnej wielkości serii jest ryzyko moralnego zużycia. Z drugiej strony istnieje bardzo realne i praktyczne ograniczenie do minimum średniej wielkości serii możliwej w każdej sytuacji produkcyjnej. Jest nią ilość potrzebna do kierowania produkcją (Burbidge, 1966).

W obecnym wysoce konkurencyjnym otoczeniu strategia produkcji zmienia się z masowej na produkcję w małych wielkościach partii aby uwzględnić szybkie zmiany preferencji klientów i popytu. Klienci nie chcą otrzymywać dużych wielkości partii za jednym razem, ponieważ chcą zminimalizować kapitał zamrożony w sprzęt i zapasy. Z drugiej strony producenci również chcą zminimalizować swoje zapasy łącznie z WIP (zapasem robót w toku), jak również całkowity koszt produkcji. Głównymi elementami składowymi kosztu produkcji nie dodającymi wartości do produktu, które powinny być zmniejszone są koszt rozruchu (początkowy), koszty utrzymania zapasów i koszty obróbki WIP. Ze względu na dużą różnorodność produktów i zmienny popyt problemy planowania produkcji i harmonogramowania dla produkcji o małych wielkościach partii są bardzo złożone. Bardzo trudno jest kontrolować koszty i dotrzymywać terminów.

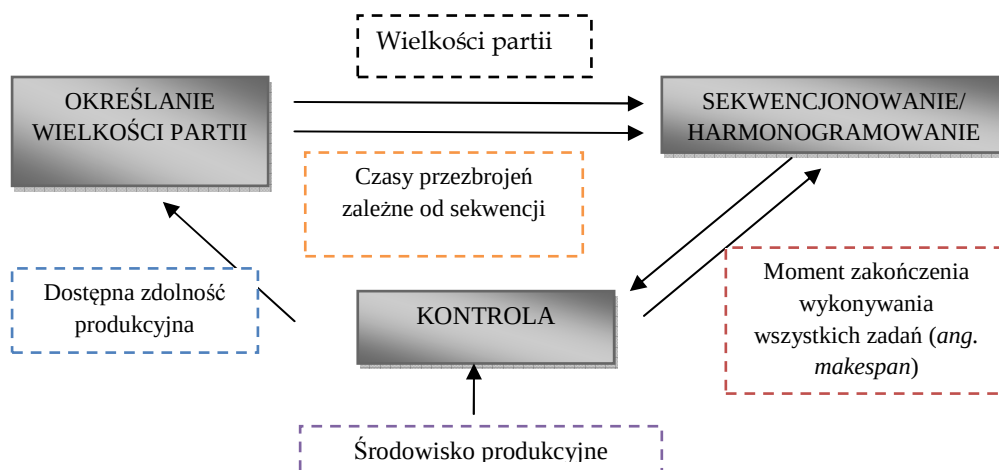
Typowymi wskaźnikami stosowanymi do oceny poprawności wyznaczania wielkości partii są:

- planowane wielkości partii – jeżeli nawet każda jest inna, w długich przedziałach czasu oscylują zwykle wokół pewnej średniej wielkości;
- rzeczywiste wielkości partii – odchylają się zwykle od wielkości zaplanowanych, jednak w długich przedziałach czasu odchylenia te zwykle się kompensują i średnia z wielu dostaw jest bardzo bliska średniej wielkości planowanej;
- kształtowanie się zapasu średniego materiału w długich przedziałach czasu zwykle stabilizuje się i oscyluje wokół pewnej wartości średniej.

Jeżeli choć jeden z parametrów wykazuje w dłuższym okresie wyraźny trend (systematycznie rośnie lub maleje), jest to sygnał, że wielkość partii wymaga co najmniej sprawdzenia i weryfikacji. Sezonowa (regularna) zmienność tych mierników nie powinna jednak budzić zaniepokojenia (Fertsch 2003, Domański R. 2013).

Z określaniem wielkości partii nieodłącznie wiąże się harmonogramowanie produkcji, które stanowi jedną z podstawowych funkcji sterowania wykonaniem produkcji.

Istotę integracji określania wielkości partii i sekwencjonowania przedstawił Sikora (1996) pokazując przepływ informacji pomiędzy planowaniem wielkości partii a definiowaniem sekwencji produkcji uzależniony od środowiska produkcyjnego, istniejącej zdolności produkcyjnej, czasów przebiegów – rysunek 4.



Rys. 4. Integracja określania wielkości partii i sekwencjonowania
Źródła: Opracowanie własne

Zadaniem harmonogramowania jest określenie terminów realizacji produkcji uwzględniając terminy poszczególnych zadań równocześnie odpowiednio bilansując zdolności produkcyjne (Rudnicki, 2012).

Bez specjalnego oprogramowania harmonogramowanie jest bardzo pracochłonne. W większości przedsiębiorstw planiści korzystają z systemów klasy ERP umożliwiające tworzenie różnych scenariuszy i pokazujące opóźnienia.

Niezależnie jednak od użycia takiego czy innego systemu komputerowego, należy podkreślić, że projektowanie przebiegu produkcji w czasie i wyrażanie go za pomocą harmonogramów jest zagadnieniem nadal trudnym. Liczny zbiór działań musi być bowiem wzajemnie zsynchronizowany z uwzględnieniem odpowiedniego wykorzystania czasu pracy ludzi, maszyn i urządzeń (Słowiński, 2008).

W każdym procesie produkcyjnym podczas harmonogramowania produkcji konieczne jest uwzględnienie różnego rodzaju czynników: związanych z produkowanym asortymentem, pracochłonnością poszczególnych operacji, dostępnymi maszynami i istniejącą kooperacją, kastomizacją produkcji pod wymagania klienta, elastycznością produkcji, technologią produkcji, priorytetami nadawanymi zleceniom produkcyjnym, złożonością wyrobów i innymi ograniczeniami.

Planowaniu produkcji podlegają wszystkie zlecenia produkcyjne na pozycje realizowane we własnym zakresie i obejmuje ono opracowanie kolejki zleceń i harmonogramu produkcji. W tym celu bardzo często wykorzystuje się reguły priorytetów. Priorytety mogą dotyczyć: klienta, terminu dostawy, parametrów zleceń produkcyjnych. Opracowując plan produkcji

możliwe jest wybranie reguł priorytetów które mają zostać wykorzystane w tym celu. Analiza przebiegu produkcji może być prowadzona poprzez szereg wskaźników, np.: odchylenie terminów realizacji zleceń, operacji; czas oczekiwania zadań produkcyjnych w kolejce, długość cyklu wytwarzania, wykorzystanie zdolności produkcyjne (Żywicki, 2010).

Rozdział II. Podstawy algorytmów genetycznych

2.1. Wprowadzenie

Algorytmy oparte na zachodzących w przyrodzie ewolucyjnych mechanizmach doboru naturalnego i dziedziczenia nazywamy algorytmami genetycznymi (AG- ang. *Genetic Algorithms*).

Konstruując systemy techniczne optymalizujące rzeczywiste procesy, żądamy aby system był z jednej strony odporny to znaczy nie był podatny na oddziaływanie otoczenia i ewentualne uszkodzenia wymagające ciągłych przeróbek, a z drugiej strony miał zdolność adaptacji i sam dostosowywał się do zmieniających warunków zewnętrznych. Te cechy są charakterystyczne dla organizmów żywych, dlatego wykorzystywanie mechanizmów rządzących procesami ewolucji dało dobre rezultaty i doprowadziło do opracowania algorytmów genetycznych, które są odporne i mają zdolności adaptacyjne. Koncepcja algorytmów genetycznych została sformułowana przez Rechenberga (Rechenberg, 1965), jednak ich usystematyzowane podstawy teoretyczne podał Holland (Holland, 1975).

Zasadniczą hipotezą, leżącą u podstaw koncepcji algorytmów genetycznych, jest założenie, iż pewne klasy problemów można rozwiązywać za pomocą metod symulujących dziedziczenie genetyczne i dobór naturalny.

Algorytmy genetyczne w odróżnieniu od tradycyjnych mają następujące własności (Stadnicki, 2006):

- a) Nie przetwarzają bezpośrednio zmiennych decyzyjnych zadania, lecz ich zakodowaną postać. Najczęściej do kodowania stosuje się binarną reprezentację liczb dziesiętnych z wykorzystaniem zapisu pozycyjnego lub kodowania Graya.
- b) Poszukiwanie optymalnego rozwiązania prowadzi się, startując z początkowej populacji punktów (w algorytmach tradycyjnych rozwiązywanie prowadziliśmy z pojedynczego punktu startowego). Najczęściej dla zadania o n zmiennych populacja początkowa liczy $2n$ lub $4n$ punktów.
- c) Są bezgradientowe; w poprawianiu bieżącego rozwiązania wykorzystuje się informacje o wartości funkcji celu, nie korzysta się z informacji o pochodnych funkcji celu.
- d) Funkcja celu w zadaniu jest miarą przystosowania bieżącego rozwiązania do warunków zadania. Punkty lepiej przystosowane podlegają dalszemu przetwarzaniu aż do uzyskania rozwiązania optymalnego.

- e) Przetwarzanie kodowych reprezentacji punktów – będących bieżącymi rozwiązaniami, odbywa się z wykorzystaniem procedur losowych, chociaż cały proces rozwiązywania pozostaje procesem deterministycznym.
- f) Podstawowy cel algorytmu polega na poprawianiu bieżącego rozwiązania, a rozwiązanie optymalne jest skutkiem tego poprawiania. W algorytmach tradycyjnych koncentrujemy się na znalezieniu optymalnego – najlepszego rozwiązania, zwracając mniejszą uwagę na proces dochodzenia do tego rozwiązania. W algorytmach genetycznych wystarcza, że zachodzi poprawa bieżącego rozwiązania na rozwiązanie lepiej przystosowane, a prostą konsekwencją poprawiania jest uzyskanie rozwiązania optymalnego.

Algorytmy genetyczne są narzędziem poszukiwania optimum funkcji celu, które pozwala na teoretyczne równoległe przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań. Funkcja, której ekstremum jest poszukiwane, nie musi być funkcją gładką i ciągłą. Może to być funkcja dowolna, zapisana w dowolny sposób, ważne jest jedynie, aby po podstawieniu potrzebnych zmiennych, można było obliczyć jej finalną wartość.

Przy rozpoczęciu pracy algorytmu genetycznego jest tworzona zawsze populacja początkowa ciągów kodowych – pierwsze pokolenie. Zbiór tych ciągów może być utworzony w sposób zupełnie losowy lub jego tworzenie może podlegać jakimś określonym regułom. Każdy ciąg kodowy, to odpowiednio spreparowane (zakodowane) dane dotyczące poszukiwanych wartości zmiennych, dla których wartość funkcji celu powinna osiągnąć ekstremum. Zbiór ciągów kodowych pozwala na jednoczesne obliczenie odpowiadającemu mu zbioru wartości funkcji celu. To, że algorytmy genetyczne pracują na zbiorach takich ciągów, jest ważną cechą tego narzędzia.(Knosala, 2002). Dokładniej kwestie związane z funkcją przystosowania i operatorami genetycznymi zostaną opisane w kolejnych podrozdziałach.

Algorytmy genetyczne są naturalnie dopasowane do rozwiązywania problemów optymalizacji wielokryterialnej aby znaleźć wiele rozwiązań Pareto-optymalnych.

Wspólną trudnością problemu optymalizacji wielokryterialnej jest konflikt kryteriów: zasadniczo, żadne z możliwych rozwiązań nie pozwala na jednoczesne optymalne rozwiązanie dla wszystkich kryteriów. Innymi słowy, pojedyncze rozwiązania optymalne dla poszczególnych kryteriów różnią się od siebie. Najbardziej optymalnym rozwiązaniem Pareto będzie takie rozwiązanie, które oferuje najmniejszy konflikt kryteriów.

Algorytmy genetyczne wykorzystywane są do rozwiązywania problemów klasy NP (*NP-complete/NP.-hard* - NP.-kompletnych/NP.-trudnych), czyli takich które nie wiemy jak rozwiązać, nie posiadamy odpowiednich narzędzi ani metod obliczeniowych.

Podstawową różnicą występującą między AG a innymi technikami jest spojrzenie na proces ewolucji. Algorytmy genetyczne koncentrują się na ewolucji pojedynczych osobników, podczas gdy pozostałe podkreślają znaczenie ewolucji populacji. (Oleśków-Szłapka, 2011)

Udowodniono iż Algorytmy genetyczne pierwotnie opracowane przez Holland'a (Holland, 1962, 1975) są wydajnymi metodami rozwiązywania różnych problemów optymalizacyjnych. Jednym z obszarów ich zastosowania jest między innymi harmonogramowanie i planowanie produkcji. Jednakże, niewiele prac odnosi się do zastosowania algorytmów genetycznych w obszarze określania wielkości partii biorąc pod uwagę takie ograniczenia jak minimalizacja kosztu, optymalizacja czasu dostawy itp.

Algorytm genetyczny według Kozy to: (Koja 1992, Lahanas et al., 1999)

“Algorytm matematyczny który przetwarza zbiór (populację) indywidualnych obiektów matematycznych (zwykle ciągów znaków o stałej długości odwzorowujących łańcuchy chromosomów) każdy z powiązaną wartością funkcji dopasowania w nową populację (tj. następne pokolenie) wykorzystując operacje wzorujące się na zasadzie reprodukcji i przetrwania Darwina i po naturalnie pojawiających się operatorach genetycznych”

Koja jest twórcą tak zwanego programowania genetycznego, które różni się od algorytmów genetycznych tym, że mamy do czynienia z bardziej złożonymi strukturami danych. Algorytmy genetyczne są często wykorzystywane aby rozwiązywać złożone problemy optymalizacyjne, natomiast programowanie genetyczne jest zwykle wykorzystywane aby przybliżać złożone, nieliniowe zależności funkcyjne. Z powodu faktycznego równoległego mechanizmu przeszukiwania i silnych zdolności globalnej eksploracji w wielowymiarowej przestrzeni zarówno programowanie genetyczne jak i algorytmy genetyczne są używane do rozwiązywania szerokiego zakresu trudnych problemów które często nie mają najlepszych rozwiązań (Koja 1992, Fan et al., 2004).

W algorytmach genetycznych każdy osobnik jest zwykle reprezentowany przez łańcuch bitów o stałej długości jak (1101110..) lub sekwencję liczb rzeczywistych o stałej długości (1.2, 2.4,...). W przypadku programowania genetycznego mamy do czynienia z bardziej złożonymi strukturami jak drzewa, powiązane listy lub stosy. Długość oraz rozmiar struktur

danych nie są stałe, chociaż mogą być ograniczone do pewnego zakresu wielkości przez implementację. (Koza, 1992)

Ogólnie przyjmuje się, iż rozwiązanie problemu za pomocą algorytmu genetycznego wymaga pięciu podstawowych elementów (Sarker, Newton, 2002):

- reprezentacji problemu,
- sposobu stworzenia początkowej populacji rozwiązań,
- funkcji oceny rozwiązań w kategoriach ich „dopasowania”,
- operatorów genetycznych które zmieniają skład genetyczny rodziców podczas reprodukcji i,
- wartości dla parametrów (wielkość populacji, prawdopodobieństwo zastosowania operatorów genetycznych itp.)

Jak w przypadku wszystkich narzędzi algorytmy genetyczne nie gwarantują optymalnego sposobu rozwiązania problemu, chociaż rozwiązanie optymalne jest możliwe. Algorytmy szukają najlepszych rozwiązań, które są w stanie wyodrębnić. Błędny model znajduje błędne rozwiązania i zalecenia. Wśród ograniczeń algorytmów genetycznych są między innymi (Grupe et al., 2004):

- Nie wszystkie problemy mogą być przedstawione w matematyczny sposób tak jak tego wymagają algorytmy genetyczne,
- Opracowanie algorytmu genetycznego i interpretacja wyników wymagają eksperta który posiada zarówno umiejętności programowania jak i statystyczno-matematyczne,
- W niektórych sytuacjach geny z kilku porównywanie wysoce dopasowanych osobników (ale nie optymalnych) mogą zdominować populację, powodując zbliżanie się do lokalnego maksimum. Kiedy populacja raz zacznie się zbiegać, zdolność algorytmu genetycznego do kontynuowania poszukiwań najlepszych rozwiązań jest praktycznie niemożliwa. Krzyżowanie prawie identycznych chromosomów powoduje powstawanie niewiele różniących się osobników. Dlatego też, pozostaje jedynie mutacja aby znaleźć nowy obszar do poszukiwań.
- Większość algorytmów genetycznych polega na losowych generatorach liczbowych które wytwarzają różne wyniki za każdym razem kiedy model jest uruchamiany. Prawdopodobny jest duży stopień spójności pomiędzy uruchomieniami, jednak mogą się one różnić.

- Rozmieszczenie dobrych zmiennych dla danego problemu jest trudne. Otrzymanie danych do stworzenia danych jest również wymagające. Kodowanie genów i chromosomów w łańcuchy liczbowe musi być właściwie wykonane.
- Metody wyboru muszą być przemyślane i ocenione. Jeśli zakres możliwych rozwiązań jest niewielki, algorytm genetyczny szybko przybliży się do rozwiązania. Przypuszczalnie, nieograniczona przestrzeń przeszukiwania jest również problemowa ponieważ wymaga zbyt wielu uruchomień (ang. *run times*). Kiedy proces ewolucji postępuje zbyt szybko przyczynia się do zbyt szybkiego zamieniania dobrych rozwiązań, końcowe wyniki mogą wówczas ominąć optymalne rozwiązanie.

W roku 1975 John Holland zaproponował algorytm, którego zadaniem było modelowanie procesu ewolucji. Schemat tego algorytmu zwanego obecnie prostym algorytmem genetycznym (ang. *Simple Genetic Algorithm* - SGA) przedstawiono na rysunku 5.

procedure prosty algorytm genetyczny

begin

t:=0

inicjacja P^0

ocena P^0

while (not warunek stopu) do

begin

$T^t :=$ reprodukcja P^t

$O^t :=$ krzyżowanie i mutacja T^t

ocena O^t

$P^{t+1} := O^t$

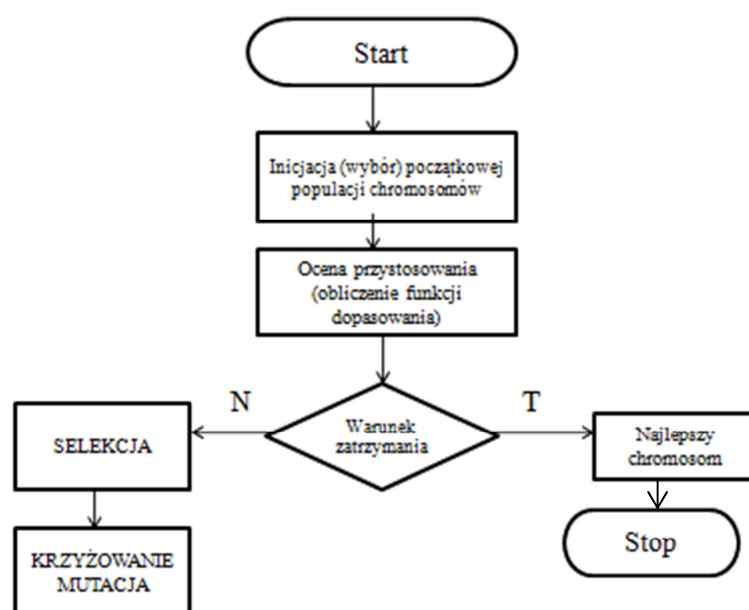
t:=t+1

end

end

Rys. 5. Schemat prostego algorytmu genetycznego według J. Hollanda
Źródło: Arabas 2001

Ogólny schemat algorytmu genetycznego polega na stworzeniu populacji początkowej, obliczeniu wartości funkcji dopasowania osobników, następnie wykonywane są kolejne iteracje polegające na wyborze osobników rodzicielskich, krzyżowaniu osobników rodzicielskich i uzyskiwanie potomków, stosowanie mutacji do osobników potomnych i obliczanie dla nich funkcji dopasowania, zastępowanie części lub całości populacji przez osobniki potomne (patrz rysunek 6). Działania te są zakończone w momencie spełnienia warunku zakończenia (Oleśków-Szłapka, 2011).



Rys. 6. Ogólny schemat algorytmu genetycznego
Źródło: Opracowanie własne

Inicjacja polega na wyborze w sposób losowy określonej liczby chromosomów (zakodowanych osobników). Większość aktualnych algorytmów ewolucyjnych zakłada stałą wielkość populacji N , która jest ustalana jako jeden z parametrów wejściowych kontrolowanych przez użytkownika. Wielkość populacji wpływa na zdolność rozwiązywania problemów, nie istnieje jednak metoda ustalająca jej wielkość, ani nie ma zasad dynamicznej zmiany wielkości populacji (Zieliński, 2000).

Ocena przystosowania polega na obliczeniu wartości funkcji przystosowania dla każdego chromosomu z danej populacji. Postać funkcji zależy od analizowanego problemu. Określenie warunku zatrzymania zależy od konkretnego przypadku, w którym algorytm genetyczny jest zastosowany. Przykładowo algorytm może być zatrzymany po osiągnięciu żądanej wartości

optymalnej, jeśli kolejne iteracje algorytmu nie dają lepszych wartości lub po upływie określonego czasu. Podczas selekcji wybrane są te chromosomy które będą wchodziły w skład następnego pokolenia uwzględniając obliczoną wartość funkcji przystosowania. Po zatrzymaniu algorytmu genetycznego należy podać jego rozwiązanie tzn chromosom o największej wartości funkcji przystosowania. Dokładniej rodzaje selekcji, istotę funkcji przystosowania zostaną omówione w dalszych podrozdziałach.

W sensie informatycznym algorytm genetyczny jest programem komputerowym, który w każdej iteracji t (zwanej tu reprodukcją) generuje nową populację osobników $P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$, zawierającą możliwe rozwiązania badanego zadania obliczeniowego. Każdego osobnika reprezentuje strukturę danych S , w postaci łańcucha binarnego. Prawdopodobieństwa przejścia osobników do kolejnej fazy reprodukcji zależą od przypisanych im wartości funkcji przystosowania. Operacja reprodukcji obrazuje zasadę doboru naturalnego (selekcji) – osobnicy o wyższej wartości funkcji przystosowania z większym prawdopodobieństwem znajdą się w nowym pokoleniu. Transformacja jednoargumentowa, czyli operacja mutacji, jest prowadzona również na ciągach binarnych i polega na losowej zmianie pojedynczego bitu (Radosiński, 2001).

Przed wykorzystaniem Algorytmu genetycznego należy przede wszystkim odpowiedzieć sobie na poniższe pytania (Cytowski, 1996); (Michalewicz, 1996), (Arabas, 2001):

1. Jaki wybierzemy sposób kodowania (binarny, całkowitoliczbowy, ciągi znaków itp.)
2. Funkcja przystosowania: jak będą oceniane osobniki
3. Wybór operatorów genetycznych: jakie krzyżowanie (jednopunktowe, dwupunktowe, jednorodne, krzyżowanie uśredniające), selekcja (selekcja metodą ruletki, metoda rankingowa, turniej, elitaryzm) i mutacja (jednopunktowa, na określonej długości, dla chromosomów o wartościach rzeczywistych)
4. Jakie będą wartości współczynników stałych: np. licznosc populacji, prawdopodobieństwo krzyżowania, prawdopodobieństwo mutacji itp.
5. Jaki będzie warunek zatrzymania algorytmu genetycznego (znaleziono rozwiązanie optymalne lub suboptymalne, przeprowadzono założoną liczbę iteracji, w kolejnych iteracjach nie uzyskuje się polepszenia najlepszego osobnika lub średniego przystosowania populacji, maksymalna liczba wyliczeń funkcji przystosowania itp.)

Podstawowymi pojęciami związanymi z algorytmami genetycznymi są (Bereta, 2014):

- Populacja- zbiór osobników o określonej liczebności
- Osobniki populacji w algorytmach genetycznych są zakodowane w postaci chromosomów
- Chromosomy inaczej łańcuchy lub ciągi kodowe to uporządkowane ciągi genów
- Gen najmniejsza składowa chromosomu, decydująca o dziedziczności jednej lub kilku cech
- Genotyp czyli struktura to zespół chromosomów danego osobnika
- Fenotyp jest zestawem wartości odpowiadających danemu genotypowi
- Allel to wartość danego genu określana też jako wartości cechy lub wariant cechy
- Locus wskazuje miejsce położenia danego genu w łańcuchu czyli chromosomie
- Funkcja przystosowania jest miarą przystosowania (dopasowania) danego osobnika w populacji.

Algorytmy genetyczne posiadają zarówno mocne jak i słabe strony. Ich zaletami są (Haupt, 2004):

- optymalizują z ciągłymi i dyskretnymi zmiennymi,
- nie wymagają pochodnych informacji,
- jednocześnie przeszukują dużą próbę,
- radzą sobie z dużą liczbą zmiennych,
- są dobrze dopasowane do równoległych komputerów,
- optymalizują złożone zmienne (mogą wychodzić poza lokalne optima)
- dostarczają listę optymalnych zmiennych nie jedynie pojedyncze rozwiązanie,
- mogą zakodować zmienne tak, że optymalizacja jest wykonywana na zakodowanych danych,
- pracują na liczbowo wygenerowanych danych, danych doświadczalnych lub funkcjach analitycznych.

Z kolei wady algorytmów genetycznych to:

- brak sensownych kryteriów zatrzymania,
- złożoność obliczeniowa,
- nigdy nie mamy pewności że znaleziono rozwiązanie optymalne,
- znalezienie rozwiązania jest uwarunkowane odpowiednim zakodowaniem problemu i dobraniem funkcji celu.

Algorytmy genetyczne mogą być stosowane w różnym obszarach z zakresu inżynierii produkcji między innymi (De Almeida et al., 2001); (Fanti, 1997); (Sarker i Newton, 2002) (Deva Prasad et al., 1996); (Kimms 1996, Chen i Ho, 2005) i inni):

- usprawnienie przepływu podzespołów przez gniazdo wytwórcze,
- przewidywanie popytu na określone produkty,
- rozmieszczenie rodzin części do odpowiednich gniazd maszyn,
- poszukiwanie optymalnych wartości wielu parametrów (poziom zapasów, wielkość partii produkcyjnego itp.),
- problem harmonogramowania produkcji,
- harmonogramowanie pracy określonej liczby maszyn,
- ustalenie harmonogramu zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego.

Więcej informacji na temat algorytmów genetycznych czytelnik znajdzie w książkach Michalewicz, 1996; Cytowski 1996; Goldberg, 2003 i w innych pozycjach literaturowych omawiających tematykę sztucznej inteligencji.

2.2. Metody reprezentacji danych w algorytmach genetycznych

Kiedy wybieramy metodę kodowania w przypadku rozwiązywania problemów określania wielkości partii produkcyjnej głównym ograniczeniem jakie musi być wzięte pod uwagę jest długość, w kategoriach ilości cyfr, każdego odcinka „planowanej ilości zamówienia” kodu algorytmu genetycznego. Uważa się że wielkość łańcucha całkowitego rozwiązania dla problemu MRP powinna być minimalizowana z powodu możliwości wygenerowania łańcuchów o długości wielu tysięcy liczb binarnych (Oleśków-Szłapka, 2011).

Kodowanie rozwiązań ma za zadanie przedstawienie każdego osobnika populacji dowolną, często skomplikowaną strukturą. Sposób kodowania zależy często od rodzaju rozwiązywanego problemu, wielkości populacji itp. Rozwiązania można kodować za pomocą:

- a) Kodu binarnego (0-1)- genami są poszczególne bity. Łańcuchy bitowe często dobrze przedstawiają rozwiązania i pozwalają na łatwą ocenę funkcji dopasowania (Anderson, 2002).
- b) Liczb całkowitych – genami są liczby całkowite, taki sposób kodowania jest odpowiedni przy kodowaniu permutacyjnym.

- c) Liczb zmiennoprzecinkowych – genami są liczby rzeczywiste. W ten sposób można kodować wszystkie problemy, w których parametry należy dobrać z dużą dokładnością np. dobieranie parametrów maszyn produkcyjnych, dobieranie wag w sieciach neuronowych itp. (Stachowiak, 2004).

Bardzo często metodą kodowania stosowaną w algorytmach genetycznych w praktyce jest kodowanie binarne. Matematyczne wzory do kodowania i odkodowania zmiennej p_n zostały przedstawione poniżej (Haupt, 2004):

Dla kodowania (równanie 6 i 7):

$$p_{norm} = \frac{p_n - p_{lo}}{p_{hi} - p_{lo}} \quad (\text{Równanie 6})$$

$$gene[m] = round\{p_{norm} \cdot 2^m - \sum_{p=1}^{m-1} gene[p] \cdot 2^{-p}\} \quad (\text{Równanie 7})$$

Dla odkodowania (równanie 8 i 9):

$$p_{quant} = \sum_{m=1}^{N_{gene}} gene[m] \cdot 2^{-m} + 2^{-(M+1)} \quad (\text{Równanie 8})$$

$$q_n = p_{quant}(p_{hi} - p_{lo}) + p_{lo} \quad (\text{Równanie 9})$$

gdzie:

p_{norm} - wartość znormalizowana

p_{lo} - najmniejsza wartość zmiennej

p_{hi} - największa wartość zmiennej

$gene[m]$ – binarna wersja p_n

$round\{.\}$ – zaokrąglenie do najbliższej liczby całkowitej

p_{quant} - skwantowana wersja p_{norm}

q_n - skwantowana wersja p_n

W kodowaniu binarnym każdy chromosom jest ciągiem bitów 0 i 1.

Przykład kodowania binarnego:

Chromosom = [10011001]

Odkodowanie = $1 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 128 + 16 + 8 + 1 = 153$

W odkodowaniu należy liczbę podnieść do takiej potęgi na którym miejscu znajduje się dana liczba 1 lub 0.

W algorytmach genetycznych można stosować kod Graya charakteryzujący się tym, że ciągi binarne odpowiadające dwóm kolejnym liczbom całkowitym różnią się tylko jednym bitem. Taki sposób kodowania może się okazać odpowiedni ze względu na operację mutacji. Aby zmniejszyć długości chromosomów stosuje się kodowanie logarytmiczne, w którym pierwszy bit (α - alfa) ciągu kodowego jest bitem znaku funkcji wykładniczej, drugi bit (β -beta) jest bitem znaku wykładnika funkcji wykładniczej, a pozostałe bity (bin) są reprezentacją wykładnika funkcji wykładniczej (Rutkowski, 2009).

$$[\alpha\beta bin] = (-1)^\beta e^{(-1)^\alpha [bin]_{10}} \quad \text{Równanie 10}$$

$[bin]_{10}$ oznacza wartość dziesiętną liczby zakodowanej w postaci ciągu binarnego bin.

2.3. Populacja początkowa

Populacja początkowa P to zbiór osobników x , który można przedstawić przy pomocy wzoru (równanie 11).

$$P(a) = \{x_1^a, x_{2,...}^a, x_b^a\} \quad \text{Równanie 11}$$

gdzie:

a - numer generacji,

i - numer osobnika,

b – rozmiar populacji.

Nie ma ścisłych zasad, co do wielkości populacji. Większe populacje zapewniają większą różnorodność, ale wymagają więcej zasobów obliczeniowych do ich rozwiązania. Kiedy wielkość populacji jest wybrana należy wygenerować losowo populację początkową. (Sarker, Newton 2002)

Najprostszym typem selekcji jest selekcja proporcjonalna wykorzystująca regułę ruletki (patrz rys.7) Rodzice wybierani są z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do ich dostosowania (równanie 12) (Oleśków-Szłapka, 2011):

$$p_i = \frac{f_i}{F} \quad \text{Równanie 12}$$

gdzie

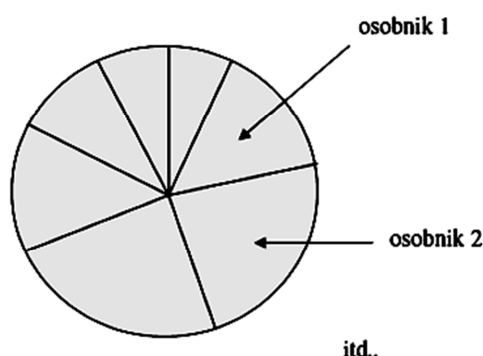
f_i – dostosowanie i-tego osobnika

F – suma dostosowań wszystkich osobników populacji.

Oczywiście taki sposób określania prawdopodobieństwa jest poprawny tylko wówczas, jeżeli dostosowanie każdego osobnika jest liczba nieujemna, a przynajmniej jednego osobnika – liczba dodatnia. W sytuacjach, gdy dostosowanie pojedynczego osobnika wyraża się liczbą rzeczywistą, konieczne jest jego skalowanie. Wadą selekcji proporcjonalnej jest towarzyszący jej stosunkowo duży błąd stochastyczny selekcji (Wierzchoń, 2001).

Metodę selekcji za pomocą ruletki można stosować tylko w zadaniach maksymalizacji funkcji (a nie minimalizacji). W metodzie tej powierzchnia fragmentu koła odpowiadająca danemu osobnikowi jest wprost proporcjonalna do jego funkcji oceny. Powoduje to oczywiście częstsze losowanie osobników lepiej dostosowanych, lecz osobnikom dostosowanym gorzej również pozostawiona zostaje nadzieja na przekazanie własnych genów. Ten sposób selekcji osobników zdaje się mieć wiele analogii do sytuacji znanych z naturalnej wersji algorytmu (Maryniak, 2003).

Drugą wadą metody ruletki jest fakt, że osobniki o bardzo małej wartości funkcji przystosowania są zbyt wcześnie eliminowane z populacji, co może doprowadzić do przedwczesnej zbieżności algorytmu genetycznego. Aby temu zapobiec stosuje się skalowanie funkcji przystosowania. (Rutkowska i in., 1999).



Rys. 7. Selekcja ruletkowa (proporcjonalna)
Źródło: Piwońska, 2011

Uwzględniając wyżej wymienione wady selekcji ruletkowej stosuje się inne metody selekcji jak selekcja turniejowa, selekcja rankingowa.

Selekcja rankingowa (*ranking selection*) – Osobniki populacji są sortowane według ich jakości od najlepszego do najgorszego. Dalej przechodzą tylko najlepiej przystosowane osobniki. Metoda ta charakteryzuje się lepszymi warunkami niż metoda ruletki.

Każdemu osobnikowi przyporządkowana jest liczba określająca jego kolejność na liście, nazywana rangą. Liczba kopii danego osobnika wprowadzonych do nowej populacji jest ustalana na podstawie wcześniej zdefiniowanej funkcji, zależnej od rangi osobnika (Rutkowski, 2009).

Zaletą metody rankingowej jest możliwość wykorzystania jej zarówno do maksymalizacji jak i minimalizacji funkcji. Nie ma również konieczności skalowania ze względu na przedwczesną zbieżność (Rutkowska i in., 1999).

Inną metodą selekcji jest selekcja turniejowa (*tournament selection*), która polega na losowym wyborze małego podzbioru chromosomów (dwóch lub trzech). Zostaje wybrany najlepszy element z turnieju. Rozróżnia się dwa sposoby wyboru najlepszego osobnika: deterministyczny (wyboru dokonuje się z prawdopodobieństwem równym 1), losowy (wyboru dokonuje się z prawdopodobieństwem mniejszym) (Sufryd, 2009). Selekcja turniejowa może być opisana za pomocą modelu ruletkowego.

Metoda turniejowa nadaje się zarówno do problemów maksymalizacji i minimalizacji funkcji. Oprócz tego może być rozszerzona na zadania z zakresu optymalizacji wielokryterialnej. Badania wykazują że metoda ta działa lepiej niż selekcja metodą ruletki (Rutkowska i in., 1999).

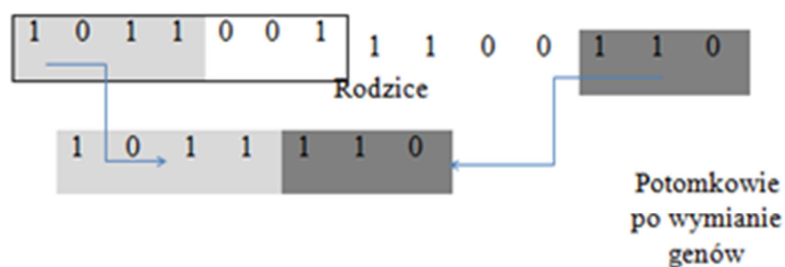
Istnieje wiele różnych odmian selekcji osobników. Metody opisane powyżej są najczęściej stosowane. Można je jednak modyfikować lub łączyć. Przykładem może być selekcja progowa będąca szczególnym przypadkiem selekcji rankingowej, w której funkcja określająca prawdopodobieństwo przejścia osobnika do puli rodzicielskiej ma postać progu, którego wartością można sterować.

2.4. Operatory genetyczne

Podstawą działania algorytmów genetycznych jest wykorzystanie operatorów genetycznych, które służą do tworzenia nowych populacji. Głównymi operatorami genetycznymi są: krzyżowanie i mutacja.

Pierwszorzędnym operatorem jest krzyżowanie.

Krzyżowanie jest to operacja wymagająca zaangażowania dwóch osobników. Polega na losowym wyborze miejsca, tego samego dla obydwu osobników, w którym chromosomy są rozcinane. Punkt ten nazywa się punktem krzyżowania (*crossover point*). Punkt ten nazywa się locus (Sufryd, 2009). Po rozcięciu chromosomów wymieniane są części. W ten sposób powstają dwa nowe chromosomy. Najczęściej stosowanym krzyżowaniem jest krzyżowanie jednopunktowe (patrz rysunek 8).



Rys. 8. Rozmnażanie przez krzyżowanie jednopunktowe
Źródło : Oleśków-Szłapka J., 2011

Kolejnym typem krzyżowania jest krzyżowanie równomierne, nazywane również krzyżowanie jednolitym bądź jednostajnym (ang. *uniform crossover*) i polega ono na tym, że każdy osobnik wyposażony jest we wzorzec. Jest to tzw. binarny łańcuch wskazujący, określający, od którego rodzica należy pobrać określony gen, np. zero na i -tej pozycji wzorca oznacza, że i -tą pozycję potomka należy zapisać genem pochodzącym od pierwszego rodzica, a jedynka – od drugiego rodzica. W krzyżowaniu tym musi być spełniony jeden warunek konieczny – chromosomy muszą być tej samej długości (Sufryd, 2009).

Krzyżowanie jednolite polega na tym, że każdy bit reprezentacji osobnika potomnego przyjmuje wartość pewnej funkcji losowej f , zależnej od odpowiadających mu bitów reprezentacji osobników rodzicielskich. Funkcja ta spełnia warunki: $f(0,0)=0$ oraz $f(1,1)=1$. Jeśli wartości tych bitów w osobnikach rodzicielskich są różne, to f przyjmuje wartość 1 z prawdopodobieństwem p i wartość 0 z prawdopodobieństwem $1-p$, gdzie $p \in [0,1]$ jest

ustalone z góry. W literaturze rozpatruje się zazwyczaj tylko przypadek, gdy $p=1/2$ (Ciura, 2000).

Oprócz tego możemy mieć krzyżowanie dwupunktowe, wielopunktowe, heurystyczne, arytmetyczne (Oleśków-Szłapka, 2011).

W literaturze opisano kilka różnych metod krzyżowania, których skuteczność zastosowania zależy od problemu; są to np. PMX (*Partially Matched Crossover*), CX (*Cycle Crossover*), OX (*Order Crossover*), UOX (*Uniform Order-based Crossover*).

Operator krzyżowania PMX, zaproponowany przez Goldberga i Lingle'a dla zadania TSP1.

Dla dwóch chromosomów

$$v1 = (i_1, i_2, \dots, i_n)$$

$$v2 = (j_1, j_2, \dots, j_n)$$

wyznaczane są segmenty określone dwoma parametrami k, m :

$$v1 = (i_1, i_2, \dots, i_k, i_{k+1}, \dots, i_{k+m}, \dots, i_n)$$

$$v2 = (j_1, j_2, \dots, j_k, j_{k+1}, \dots, j_{k+m}, \dots, j_n)$$

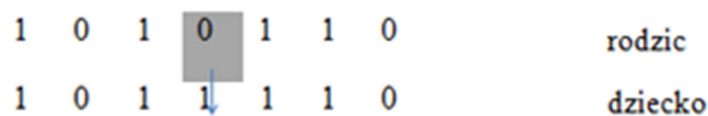
Dokonywana jest wymiana środkowych segmentów: $(i_k, i_{k+1}, \dots, i_{k+m})$ i $(j_k, j_{k+1}, \dots, j_{k+m})$.

Pozostałe geny należy tak przekształcić, aby chromosomy potomne były permutacjami.

Warto również wspomnieć o krzyżowaniu pustym, w którym potomstwo jest po prostu kopiami rodziców. Tego typu krzyżowanie stosowane jest w mieszanych strategiach krzyżowania i badaniu poprawności programu. Istnieje również krzyżowanie konserwatywne, w którym krzyżowanie identycznych rodziców produkuje identyczne potomstwo (Sufryd, 2009).

Drugorzędnym operatorem genetycznym jest **mutacja**. Mutacja ciągów binarnych polega najczęściej na losowej zmianie bitu z pewnym prawdopodobieństwem (niewielkim). To prawdopodobieństwo nazywamy prawdopodobieństwem mutacji. Zmiana bitu może być stosowana do ciągów dowolnego alfabetu (Kotowski, 2008).

Mutacja podobnie jak reprodukcja działa na pojedynczym osobniku rodzicielskim. Jej działanie polega na losowych zmianach genotypu osobnika. W ten sposób mogą powstawać osobniki o większym przystosowaniu niż osobnik przed mutacją. Przykład mutacji przedstawia rysunek 9.



Rys. 9. Rozmnażanie przez mutację
Źródło: Oleśków-Szłapka J., 2011

Istnieją dwa rodzaje mutacji (Sufryd, 2009):

- pierwszy stopień – polega na tym, że każdy gen jest losowany, czy zostanie poddany procesowi mutacji;
- drugi stopień – polega na tym, że najpierw losowany jest osobnik, który zostanie zmutowany. Następnie każdy jego gen podlega losowaniu, w celu wyselekcjonowania konkretnych do mutacji.

Aby zwiększyć efektywność pracy algorytmu genetycznego do jego podstawowej formy wprowadza się różnego rodzaju modyfikacje takie jak: elitarność, zmienny współczynnik mutacji, mutacja płózająca, zmienna liczebność populacji, skalowanie funkcji przystosowania itp.

Cechą charakterystyczną programowania genetycznego jest przestrzeń poszukiwań, której elementami są programy. Programowanie genetyczne zostało zapoczątkowane przez J. R. Kożę, który zaczął stosować algorytmy genetyczne do automatycznego pisania programów w języku LISP (Paszyńska, Paszyński, 2011).

Schematem nazywamy łańcuch o długości m złożony z symboli 0,1 i * (gdzie * oznacza wszystko jedno). Reprezentuje on wszystkie łańcuchy zerojedynkowe, które zgadzają się z nim na wszystkich pozycjach, gdzie nie występuje gwiazdka (Studniarski, 2010).

Przykłady:

Schemat $S = (00^{**}01)$ reprezentuje cztery łańcuchy: (001101), (001001), (000101), (000001).

Schemat (001) reprezentuje tylko jeden łańcuch (001)

Schemat (****) reprezentuje wszystkie łańcuchy o długości 4.

Proste algorytmy genetyczne nie zapewniają rozwiązania dla pewnej klasy problemów, co wiąże się między innymi ze stałą długością łańcucha DNA. Dlatego wprowadzono rozszerzenia dla algorytmów genetycznych zwane odtąd ESGA (*Extended Simple Genetic Algorithm*) (Oleśków-Szłapka, 2011).

Inwersja – polega na odwróceniu kolejności występowania pewnych genów w chromosomie, można powiedzieć, że jest odmianą mutacji i pełni podobną do niej rolę – wprowadza innowacyjność. Jest szczególnie ważna w chromosomach, gdzie kolejność bitów pełni istotną rolę (Gałda, 2009).

2.5. Funkcja przystosowania

Funkcja przystosowania odgrywa bardzo ważną rolę w algorytmach genetycznych aby otrzymać najlepsze rozwiązania w dużej przestrzeni przeszukiwania. Dobra funkcja pomaga algorytmom eksplorować skuteczniej i wydajniej obszar przeszukiwania. Z kolei nieodpowiednia funkcja może przyczynić się, że algorytm genetyczny wpadnie w pułapkę lokalnego optimum i utraci moc odkrywania.

Funkcja przystosowania/dostosowania odzwierciedla w jakim stopniu dane rozwiązanie spełnia wymagania projektanta. Określa ona, które osobniki z danej generacji mogą przeżyć, odzwierciedla bowiem jakość danego rozwiązania (Stachowiak, 2004).

Odpowiedni wybór funkcji dostosowania jest podstawą otrzymania dobrych wyników z algorytmu genetycznego.

Prawidłowe funkcjonowanie algorytmu genetycznego podczas rozwiązywania problemów optymalizacyjnych zapewnia skalowanie funkcji przystosowania.

Skalowanie dokonuje się z dwóch podstawowych powodów (Rutkowska i in., 1999):

- Aby zapobiec zbyt wczesnej zbieżności algorytmu genetycznego.
- W końcowej fazie algorytmu, gdy populacja zachowała znaczną różnorodność, aby średnia wartość przystosowania niewiele odbiegała od maksymalnej.

Skalowanie funkcji przystosowania chroni populację przed dominacją nieoptymalnego chromosomu, a zatem zapobiega przedwczesnej zbieżności algorytmu ewolucyjnego. Rozróżniamy skalowanie liniowe, obcinanie typu sigma i skalowanie potęgą (Rutkowski, 2009).

Metody skalowania omówione są między innymi przez Rutkowskiego (Rutkowski, 2009). Skalowanie liniowe polega na przekształceniu funkcji przystosowania przez następującą zależność liniową okazaną na równaniu 13.

$$\mathbf{F}' = \mathbf{aF} + \mathbf{b} \text{ (Równanie 13)}$$

gdzie a i b są tak dobierane, aby średnia wartość funkcji przystosowania po skalowaniu była równa średniej wartości funkcji przystosowania przed skalowaniem, a maksymalna wartość funkcji przystosowania po skalowaniu była wielokrotnością średniej wartości funkcji przystosowania. Funkcja F' nie może przyjmować wartości ujemnych.

Obcinanie typu sigma jest metodą skalowania polegającą na przekształceniu funkcji przystosowania F do F' według poniższej zależności:

$$F' = F + (\bar{F} - c \cdot \sigma) \quad (\text{Równanie 14})$$

Gdzie $\bar{F}$ jest średnią wartością funkcji przystosowania w populacji, c jest małą liczbą naturalną, a σ odchyleniem standardowym w populacji. W przypadku wartości ujemnych F' przyjmuje się je równe zero.

Skalowanie potęgą jest metodą skalowania przekształcającą funkcję przystosowania F zgodnie z zależnością:

$$F' = F^k \quad (\text{Równanie 15})$$

k jest liczbą bliską 1. Wybór k zwykle zależy od analizowanego problemu.

Dla danego chromosomu funkcja przystosowania musi zwrócić numeryczną wartość która odzwierciedla użyteczność chromosomu. Wynik ten jest wykorzystywany w procesie selekcji rodziców (ang. *parent*) tak aby najlepiej dostosowane osobniki z największym prawdopodobieństwem były wybrane. Funkcja przystosowania musi być odpowiednia dla rozwiązywanego problemu (de Moya-Anegon i in., 2003).

Funkcja przystosowania odgrywa bardzo ważną rolę w algorytmach genetycznych określając przestrzeń przeszukiwania.

Funkcja przystosowania wywodzi się z funkcji w celu i jest wykorzystywana w kolejnych operacjach genetycznych. Dopasowanie w sensie biologicznym jest wartością która jest miarą możliwości reprodukcji chromosomów. W algorytmach genetycznych dopasowanie jest używane aby przydzielić cechy reprodukcyjne osobnikom w populacji i w ten sposób działać jako miara zgodności która będzie optymalizowana (maksymalizowana lub minimalizowana) tzn że osobniki z wyższą wartością dopasowania będą miały większe prawdopodobieństwo aby być wybrane do dalszych badań (Mathew, 2005).

Rozdział III. Zaawansowane metody określania wielkości partii i harmonogramowania

3.1. Tendencje w obszarze tworzonych modeli określania wielkości partii

Istnieje bardzo wiele różnorodnych procedur, które zostały zaproponowane dla określania wielkości partii i czasowego rozmieszczania dostaw dla wytwarzanych komponentów w systemach planowania produkcji. Chociaż ilość opracowanych procedur obejmuje swoim zakresem metody stosujące proste zasady decyzyjne aż do szeroko zakrojonych procedur optymalizacyjnych obejmujących techniki inteligentne, jest zaskakująco niewielka pomoc dla menedżerów wybierających procedurę określania wielkości partii dla specyficznych warunków organizacyjno-produkcyjnych.

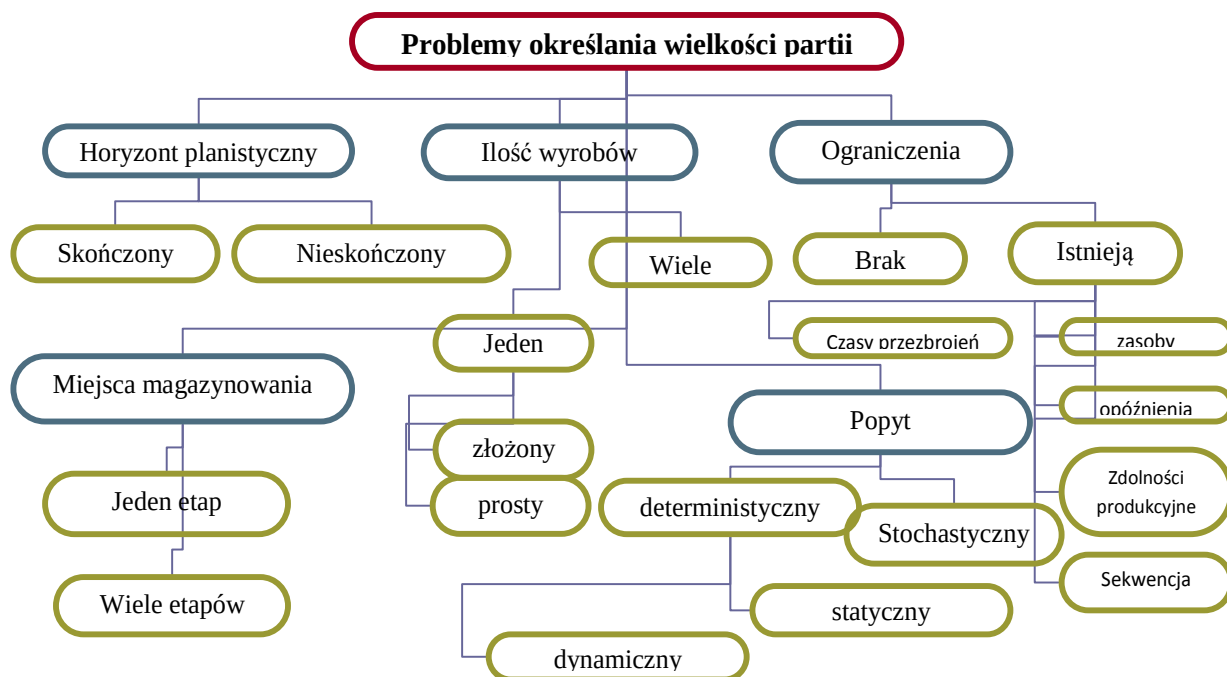
Metody określania partii można sklasyfikować według różnorodnych klasyfikacji uwzględniających podział na metody dokładne i przybliżone, statyczne i dynamiczne, a także podziałów szczegółowiej rozpatrujących czynniki wpływające na wielkość partii.

Podczas podejmowania decyzji odnośnie określania wielkości partii uwzględnia się między innymi czynniki takie jak: koszt zamawiania, koszt utrzymywania zapasów, koszt braków, ograniczenia wydajnościowe, minimalna wielkość zamówienia, maksymalna wielkość zamówienia, obniżki ilościowe itp. Kombinacja tych czynników wpływa na powstawanie różnych modeli i różnych metod ich rozwiązywania. Poglądowo podział problemów określania wielkości partii w zależności od różnych czynników przedstawia rys. 10.

Rozważając ilości poziomów produkcji wyróżnia się problemy ustalania wielkości partii produkcyjnej dla: wyrobu prostego (*single level lot sizing problem*) oraz wyrobu złożonego (*multi level lot sizing problem*).

Biorąc pod uwagę ilość wyrobów wymienić można problemy ustalania wielkości partii produkcyjnej dla pojedynczego wyrobu (*single item lot sizing problem*) oraz dla wielu wyrobów (*multi item lot sizing problem*).

Istnieją modele umożliwiające przybliżone planowanie przy założeniu nieograniczonych zasobów (*uncapacitated lot sizing problem*) oraz bardziej szczegółowe planowanie przy ograniczonych zasobach (*capacitated lot sizing problem*).



Rys. 10. Zróżnicowanie problemów określania wielkości partii

Źródło: Opracowanie własne oraz na podstawie Oleśków J., Metody optymalizacji wielkości partii – analiza porównawcza, rozwój i korzyści wynikające z zastosowania algorytmów genetycznych, [w:] Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie pod red. M. Knosali, WNT, Warszawa 2004

Przegląd metod określania wielkości partii można znaleźć między innymi w pracach (Kraszewska, 2011; Zhu and Wilhelm, 2006; Rizk, Martel , 2001, Jans, Degreave, 2004, 2007, 2010).

Jedną z istniejących i stosowanych klasyfikacji metod określania wielkości partii jest podział na metody statyczne i dynamiczne.

W literaturze przedmiotu można znaleźć pojęcia statycznych i dynamicznych wielkości zamówień. Przez statyczne wielkości zamówienia rozumie się takie wielkości, które po jednorazowym obliczeniu pozostają niezmiennie w analizowanym planie zamówień. Kiedy zauważono słabe strony tego rodzaju metod wprowadzono wielkości dynamiczne, które są na bieżąco przeliczane w zależności od zachodzących zmian potrzeb netto. Zależnie od sposobu wykorzystania metody ustalania wielkości partii dostawy może ona ustalać zarówno statyczne jak i dynamiczne wielkości zamówień. Wybór pomiędzy statycznymi i dynamicznymi wielkościami zamówień może być trudny z uwagi na problem obliczeniowy. Jednak

wielkością decydującą o wyborze metody ustalania rozmiarów partii dostawy powinny być koszty zastosowania tejże metody.

Modele określania wielkości partii mogą być również szeroko sklasyfikowane według. (Katok et al., 1998). :

- a) ilości produktów,
- b) ilości posiadanych zasobów,
- c) ilości poziomów złożoności montowanych wyrobów i natury systemu montażowego (liniowy czysty montaż, ogólna struktura montażowa),
- d) kosztów utrzymania zapasów (stałe, zmienne) itp.

Jednym z kryteriów podziału modeli lot sizing mogą być również ograniczenia. Opracowano szereg modeli bez ograniczeń (*uncapacitated*) i z ograniczeniami (*capacitated*) (Oleśków, 2004).

Biorąc pod uwagę długość okresów produkcyjnych możemy mówić o problemach ustalania wielkości partii produkcyjnej dla (Kraszewska, 2011):

- a) Krótkich okresach produkcyjnych SB-LSP (*small bucket lot sizing problems*), trwających najczęściej do kilku godzin, gdzie w jednym okresie dopuszczalna jest produkcja maksymalnie jednego lub dwóch różnych wyrobów (Drexler, Kimms, 1997). Wśród problemów SB-LSP wyróżnić można: dyskretny problem ustalania wielkości partii produkcyjnej i harmonogramowania DLSP (Fleischmann 1990, Salomon i in. 1991, Brahimi i in. 2006), ciągły problem ustalania wielkości partii produkcyjnej (Bitran i Matsuo 1986, Brahimi i in. 2006) oraz proporcjonalny problem ustalania wielkości partii produkcyjnej i harmonogramowania (Drexler i Haase 1995, Brahimi i in. 2006).
- b) Długich okresów produkcyjnych BB-LSP (*big bucket lot sizing problems*), trwających kilka dni, nawet tygodni, gdzie żadne ograniczenie dotyczące ilości produkowanych wyrobów w jednym okresie nie występuje. Pierwsze prace dotyczące problemów BB-LSP opublikowali Wagner i Whitin w 1958 oraz Manne 1958. BB-LSP można analizować jako agregację czasową problemu SB-LSP, co z kolei prowadzi do rozważania hierarchicznego planowania (Bitran i Tirupati, 1993).

Dostępne procedury określania wielkości partii można podzielić na trzy główne grupy (Oleśków, 2004):

1. Statystyczne procedury określania wielkości partii

W statystycznych procedurach określania wielkości partii jest ona obliczana na podstawie średnich wyspecyfikowanych ilości, zapisanych w głównym rekordzie materiałowym. Istnieją różne kryteria, według których może być obliczana wielkość partii:

- wielkość zamawiania partia na partię
- stała wielkość partii
- uzupełnienie do maksymalnego poziomu zapasów

2. Okresowe procedury określania wielkości partii

W okresowych procedurach określania wielkości partii ilości zapotrzebowania z jednego lub kilku okresów są grupowane razem dla otrzymania partii. Można określić ilość okresów, które mają być grupowane razem w proponowane zamówienie. Istnieje możliwość wyboru jednego spośród kilku wariantów:

- dzienna wielkość partii
- tygodniowa wielkość partii
- miesięczna wielkość partii
- wielkość partii zgodnie z elastycznymi długościami okresów, zależnymi od okresów obliczeniowych (obliczeniowa wielkość partii)

3. Optymalne procedury określania wielkości partii

W optymalnych procedurach określania wielkości partii potrzeby netto są grupowane dla kilku okresów razem aby otrzymać wielkość partii w zależności od której określa się optymalny stosunek kosztów produkcji i magazynowania. Procedury optymalizacyjne różnią się jedynie kryteriami kosztowymi.

Ważniejsze procedury to:

- procedura zmiennej wielkości partii,
- procedura najmniejszego kosztu jednostkowego
- procedura dynamicznej wielkości partii

Na przełomie lat 60-tych i 70-tych XX wieku został opracowany standard MRP (ang. *material requirements planning*- planowanie zapotrzebowania materiałowego). System MRP przelicza harmonogram produkcji na harmonogram dla wszystkich pośrednich zespołów i części składowych. Szczegółowe harmonogramy składają się z dwóch części: zaplanowanych przyjęć i planowanych zamówień. Zostało opracowanych wiele różnych procedur służących do określania wielkości partii w systemach MRP, od zamawiania dokładnie tyle ile potrzebne (partia na partia), przez proste zasady decyzyjne aż po obszerne procedury optymalizacyjne.

Pierwszą rzeczą do rozważenia podczas opracowania procedur określania wielkości partii jest charakter zapotrzebowania netto. Procedury MRP określania wielkości partii są przeznaczone dla przypadku dyskretnego zapotrzebowania. Problemem podczas wyboru procedury jest fakt, iż obniżanie kosztów związanych z zapasami można zasadniczo osiągnąć jedynie przez wykorzystanie złożonych procedur, które wymagają więcej obliczeń podczas obliczania wielkości partii. Drugi problem dotyczy optymalizacji lokalnej. Procedura określania wielkości partii wykorzystana dla jednej części w systemie MRP ma bezpośredni wpływ na zapotrzebowania brutto przechodzące do jej części składowych. Wykorzystanie innych procedur niż partia na partię wpływa na wzrost zapotrzebowań brutto dalej w dół w strukturze wyrobu. Problem określania partii produkcyjnej polega zwykle na przetworzeniu zapotrzebowań na serie zamówień uzupełniających zapasy. Jeśli rozważymy ten problem na poziomie lokalnym – tylko w zakresie jednej części a nie jej komponentów – problem obejmuje określenie pogrupowanie zapotrzebowań rozmieszczonych w czasie w harmonogram uzupełnień minimalizując koszt składania zamówień i utrzymania zapasów. Ponieważ systemy MRP zwykle przeplanowują harmonogram dziennie lub tygodniowo, wpływa to na założenia w procedurach określania wielkości partii MRP (Vollmann i in., 2005).

Założenia te są następujące (Vollmann i in. 2005):

- Po 1 – sumujemy zapotrzebowanie elementów składowych dla celów planowania, i zakładamy że wszystkie zamówienia dla każdego okresu muszą być dostępne na początku okresu.
- Po 2 – zakładamy że zamówienia dla przyszłych okresów muszą być spełnione i nie mogą być wycofane.
- Po 3 – ponieważ system działa okresowo, zakładamy że decyzje zamawiania pojawiają się w regularnych odstępach czasu (np. dziennie lub tygodniowo).

- Po 4 – zakładamy że zapotrzebowania są odpowiednio kompensowane przez cykle produkcyjne. Ostatecznie zakładamy, że zamówienie na komponenty są spełnione podczas każdego okresu w stałym tempie. Dlatego też wykorzystujemy średni poziom zapasów dla obliczenia kosztów utrzymania zapasów.

Dane wejściowe do systemu ERP odnośnie wielkości partii zwykle opierają się zwykle na jednej z poniższych klasycznych technik określania wielkości partii. Przy czym wykorzystuje się najczęściej technikę z trzech podstawowych grup (Potoradi, 1999):

- opierające się na ekonomicznej wielkości partii,
- metody jednokrokowe bazujące na regule,
- przybliżone metody jednokrokowe.

Jakość osiąganych wyników metod określania wielkości partii stanowiących obecnie dane wejściowe do systemu ERP różni się w zależności od zmienności zapotrzebowań netto, długości horyzontów planistycznych, długości okresu planistycznego, relacji między kosztem zaopatrzenia a kosztem produkcji itp. Tradycyjne metody nie rozważają niepewności popytu i traktują przyszłe zapotrzebowania jako niezmiennie doprowadzając tym samym do sytuacji, iż precyzyjne i złożone obliczenia stają się bezwartościowe w momencie jakichkolwiek fluktuacji zapotrzebowania. Obecnie wykorzystywane tradycyjne metody mają również inną słabość, która w znaczący sposób ogranicza ich praktyczne zastosowania. Poszukując optimum rozważają wszelkie możliwe przypadki, dlatego też kiedy horyzont planistyczny wydłuża się ilość opcjonalnych harmonogramów dramatycznie wzrasta. Co więcej metody te ustalają wielkości partii dla pojedynczych wyrobów jedynie na jednym poziomie złożoności w strukturze wyrobu stąd powstaje błędne założenie, iż popyt na wyrób jest stały (Oleśków, 2007).

Dlatego konieczne stało się poszukiwanie technik bardziej efektywnych, generujących wielkości partii adekwatnie do nałożonych ograniczeń i warunków. Alternatywą taką są wszelkie techniki określania wielkości partii zwane technikami inteligentnymi lub metaheurystykami.

Pomimo faktu, iż klasyczne metody kalkulacji wielkości partii mają w swoim tytule optymalną wielkość partii, zwykle rozważają one tylko kilka czynników wpływających na wielkość partii, Dlatego też określenie „optymalna” ma zastosowanie tylko w ściśle określonych warunkach. Wartości wejściowe takie jak koszty uruchomienia czy magazynowania są w zasadzie przybliżeniami a nie wartościami dokładnymi. Obliczana

wielkość partii powinna przynajmniej być przybliżona do wartości optymalnych (Potoradi, 1999).

Modele określania wielkości partii określają optymalne rozmieszczenie w czasie i poziom produkcji. Z jednej strony są to problemy określania wielkości partii dla nieskończonego horyzontu planistycznego, stałego popytu i ciągłego okresu czasu. W tej kategorii możemy znaleźć model wspomnianej wcześniej ekonomicznej wielkości partii i problem harmonogramowania ekonomicznej partii (*economic lot scheduling problem*). Z drugiej strony mamy spectrum modeli określania wielkości partii dla nieciągłego okresu czasu, dynamicznego popytu i skończonego horyzontu planistycznego. Ten typ planowania jest zwykle określany jako dynamiczne określanie wielkości partii (*dynamic lot sizing*) (Jans, Degreave, 2007).

W obszarze określania wielkości partii znalazły też zastosowanie techniki bazujące na sztucznej inteligencji. Wybrane przykłady tego rodzaju rozwiązań zostaną przedstawione w podrozdziale 3.4.

3.2. Charakterystyka wybranych modeli heurystycznych

Opracowano wiele procedur heurystycznych dla określania wielkości partii komponentów w systemach planowania zapotrzebowania materiałowego.

Groff (Groff, 1979) proponuje prostą, jednopoziomową zasadę. Tradycyjna ekonomiczna wielkość partii jest ustalona poprzez zwiększanie wielkości partii tak długo aż marginalne oszczędności kosztów zamawiania będą większe niż marginalny wzrost kosztów utrzymania zapasów. Optymalna wielkość partii jest osiągnięta kiedy spadek kosztów równa się marginalnemu wzrostowi. Zaproponowana metoda była opracowana aby wykorzystać główną siłę partii okresowo bilansowanej – ocenę skutków kosztów w kolejnych okresach- ale bazuje raczej na zrównywaniu kosztów marginalnych a nie całkowitych (Groff, 1979). Procedura ponownego zamawiania Groff’a oparta jest na założeniu, że dodatkowe koszty magazynowania są równe oszczędnościom dla niezależnych kosztów wielkości partii zgodnie z klasyczną formułą określania wielkości partii dla minimalnych kosztów. Zaczynając od pewnego okresu należy tak długo kumulować zapotrzebowania w partię aż wzrost średnich kosztów na okres jest większy niż spadek niezależnych kosztów wielkości partii na okres.

Ważną heurystyką wykorzystywaną dla określania wielkości partii jest wspomniana wcześniej metoda ekonomicznej wielkości wprowadzona przez Harris’a. Rozważa on model, który zakłada iż popyt jest ciągły i niezmienny, koszt jednostkowego zamówienia jest

niezmienny, Metoda ta została stworzona przez P. Harrisa jednakże kojarzona jest głównie z R.H Willsonem (Wilson, 1934), który dzięki swoim staraniom rozpowszechnił tą metodę w przemyśle. Metoda to pod względem obliczeniowym została omówiona w podrozdziale 1.2.1.

Ekonomiczna wielkość partii chce być koncepcją naukową, a ilość określana minimalizuje funkcję kosztową, która bierze pod uwagę w oryginalnym wzorze, koszty utrzymania zapasów i koszty zamówień dla nowego zamówienia. Obliczanie EWP opiera się na dostępności danych, które w praktyce trudno zebrać i które zmieniają się wraz z upływem czasu: tempo zmian kapitału i koszt zamawiania. Co więcej jest wiele hipotez upraszczających na których bazuje EWP. Czyni to wzór na EWP łatwym i zrozumiałym, ale ogranicza jego aplikację w rzeczywistych warunkach.

Oto niektóre z istniejących ograniczeń metody EWP (Swamidass, 2000):

- Wzór rozważa pojedynczą część w czasie, bez możliwości globalnej optymalizacji wielkości partii różnych części produkowanych lub zakupywanych
- Zapotrzebowanie na rozważane części musi być niezmiennie w czasie
- EWP jest obliczana dla zamówień które będą uruchomione w przyszłości; z tego powodu zapotrzebowanie roczne powinno być prognozowane
- Każdy parametr we wzorze jest stały w czasie ale nie jest to przypadek rzeczywisty
- Ograniczenia fizyczne, techniczne nie są brane pod uwagę we wzorze. Najbardziej krytyczne uwagi w kierunku EWP zostały postawione przez ruch szczupłej produkcji. Wzory EWP rozważają dane wejściowe i obliczają wyniki. Ale dane te nie są niezmiennie. Są zmienne którymi można zarządzać aby osiągnąć „przepływ jednej sztuki” i wówczas $EWP=1$. Osiągnięcie tego niesie z sobą więcej korzyści niż wykorzystanie pospolitej EWP.

Jednakże, modele typu EWP są przydatne dzięki swojej prostocie i mogą być wykorzystane jako wskazówka określająca górną granicę dla decyzji określania wielkości partii. W obszarze Just in time i szczupłego myślenia postawiono sobie pytanie czy optymalna wielkość partii mogłaby być lub powinna być obliczana. Ostatecznym celem było osiągnięcie przepływu jednej sztuki, z wielkościami partii równymi jeden. Dlatego też partie powinny być zawsze tak małe jak to możliwe (Bicheno, 2000).

Przeprowadzono niezliczoną ilość modyfikacji aby dostosować model do różnych rzeczywistych warunków. Technika ma dwie główne zalety: jedną jest prostota, inną jest

płaskość funkcji EWP, która jest obszarem wokół minimum krzywej, gdzie całkowite koszty są raczej niewrażliwe na odchylenie od EWP (Slack et al., 1998).

Przykładami modyfikacji metody EWP są między innymi (Morran, 1998):

a) *Model EWP z dyskontowanym kosztem* (Hadley, 1964; Haneveld and Teunter, 1998).

Hadley był pierwszym, który rozważał wielkości zamawiania które minimalizują dyskontowany koszt (obniżania ceny) raczej niż tradycyjne kryterium minimalizowania średniego rocznego kosztu. Był on również pierwszą osobą, która zastosowała kryterium wartości bieżącej netto NPV do problemu określania optymalnych wielkości zamówień. Hadley wysunął wniosek, że wielkości zamówień obliczone poprzez szukanie minimum średniego rocznego kosztu i poprzez minimalizowanie kosztu dyskontowego nie różnią się znacząco w dużym zakresie wartości dla stosownych parametrów. Haneveld i Teunter (1998) dodali do pracy Hadley'a zmienność tempa popytu z efektami dyskontowania. Określali oni optymalną wielkość zamówienia jeśli popyt jest zamodelowany przez proces Poissona and oczekiwane koszty dyskontowe są minimalizowane. Według ich modelu wydaje się, iż zmienność popytu ma niewielki wpływ na optymalną wielkość zamówienia.

b) *Model EWP z ograniczeniami dla wielu produktów*, który również przedstawia jak określić wielkość partii wykorzystując Parsons multiplikatory Lagrangiana. (Hadley i Whitin, 1963). Hadley i Whitin opracowali wyraźne rozwiązanie dla podstawowego modelu EWP ze stopniowym narastaniem zapasów. Nałożyli poniższe ograniczenia na model:

- Jest ograniczona ilość dostępnych godzin w roku na rozruch wszystkich uruchomień produkcji.
- Górna granica jest nałożona na całkowite inwestycje magazynowe dla wszystkich wyrobów.
- Górny poziom ilości uruchomień produkcji które mogą być wykonane w ciągu roku jest zlokalizowana w systemie.
- Jest ograniczenie dostępnej powierzchni magazynowania gdzie produkowane wyroby mogą być składowane.

c) Innymi modelami opracowanymi w ramach EWP były modele rozważając różne aspekty tego problemu:

- niszczące się wyroby (Chu et al., 1998),
- kredyt dostawców (Wilson, 1991),

- koszt jednostkowej produkcji zależnej od popytu i niedoskonałe procesy produkcyjne (Cheng, 1989, 1991),
- niepewności danych (Girlich, 1990; Yu, 1997),
- fenomen uczenia się (Jaber i Bonney 1999),
- obniżka ceny (Gupta, 1988),
- opóźnienie płatności (Chung, 1998(a) and (b); Braglia & Gabbrielli, 2001).

Braglia and Gabbrielli (2001) wykorzystali symulację EWP problem magazynowania dla włoskiej firmy produkcyjnej podczas gdy Piasecki (2001) spojrzął z całkiem innej strony na EWP/EPQ i wysunął wniosek iż jest ona wielokrotnie niewłaściwie wykorzystywana ponieważ koszty uruchomienia i magazynowania są błędnie obliczone.

Wiele przedsiębiorstw w czasach postępującego rozwoju technologii informatycznej nie czerpie korzyści z fundamentalnych modeli ekonomicznej wielkości partii i ekonomicznej partii produkcyjnej, co wynika głównie z faktu nieodpowiednich danych na wejściu do EWP.

Innymi heurystykami stosowanym w obszarze określania wielkości partii są między innymi metody opracowane przez Silver i Meal (1973), najmniejszy koszt jednostkowy (Love, 1979), partia okresowo bilansowana (*Part Period Balancing*) (DeMatteis, 1968), które wykorzystują informacje z jednego poziomu bez brania pod uwagę żadnych ograniczeń wydajności.

Jednym z kluczowych artykułów omawiającym heurystykę mającą zastosowanie w obszarze określania wielkości partii jest praca E. A. Silver'a i H.C. Meal „*A heuristic for selecting lot size quantities for the case of a deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment*”. Wnioski z zastosowanej metody były takie, iż wykorzystanie heurystyki wymaga krótszego horyzontu czasu, aby wybrać bieżącą ilość uzupełniania niż w przypadku algorytmu Wagner-Whitin. Algorytm W-W jest optymalny tylko wówczas kiedy zapas na końcu okresu planistycznego spadnie do zera. Jednakże w wielu przypadkach rozkład zapotrzebowania przekracza horyzont planistyczny i zmienia się w różnym tempie. Heurystyka zaproponowana ma radzić sobie w takiej sytuacji, i może ona również generować niższe całkowite koszty uzupełniania i utrzymywania zapasów w ciągu długiego okresu (kilku horyzontów planistycznych) niż metoda W-W.

Heurystyka Silver Meal znajduje najniższy średni koszt na okres (average cost per period – ACP). Podstawowymi terminami są (Silver, Meal, 1973):

D_k – zapotrzebowanie w okresie k

h – koszt utrzymania zapasów na jedną część na okres

T – ilość okresów pokrytych uzupełnieniem (również nazywana horyzontem zamawiania)

C – koszt złożenia zamówienia

Q^* – wielkość zamówienia

P_T – okresy części (okres części – part period – definiowany jako jedna część utrzymywana w zapasie przez jeden okres)

Q_T – całkowita ilość zapotrzebowania przez okresy $1, \dots, T$

$ACP(T)$ – średni koszt na okres kiedy horyzont zamawiania jest T

W każdym kroku procedury oblicza się:

$$P_T = \sum_{k=1}^T (k-1) D_k \quad \text{Równanie 16}$$

$$Q_T = \sum_{k=1}^T D_k \quad \text{Równanie 17}$$

$$ACP(T) = \frac{C + h \times P_T}{T} \quad \text{Równanie 18}$$

Proces decyzyjny przebiega według poniższych kroków (Silver i Meal, 1973):

1. Zakładamy, że $T=1$, $Q_0=0$ i $P_0=0$.
2. Zakładając, że $P_T=P_{T-1} + (T-1)D_T$ i $Q_T=Q_{T-1}+D_T$
Obliczamy $ACP(T) = (C+h \times P_T)/T$
3. Jeśli $ACP(T) > ACP(T-1)$ idziemy do kroku 4, w przeciwnym wypadku zakładamy, że $T=T+1$ i idziemy do kroku 2
4. Zakładamy, że $Q^*=Q_{T-1}$

Krok 3 jest znany jako warunek zatrzymania ponieważ określa kiedy algorytm zakończy się. Często aby przyspieszyć szybkość obliczeń, warunek ten zatrzymania definiuje się jako:

$$T^2 D_{T+1} > \frac{C}{h} + P_T \quad \text{Równanie 19}$$

Inna metoda w tym obszarze to algorytm opracowany przez Afentakis et al. (1984), który rozwiązuje problem określania wielkości partii średniej wielkości dla pojedynczej struktury wyrobu typu do montażu w środowisku bez ograniczeń.

Pewne prace zostały również wykonane przez Zangwill, który opracował model sieciowy pojedynczego zasobu (Zangwill, 1968), różne opracowania dynamicznego programowania aby rozważyć przypadki tworzenia zaległości (backlogging) (Zangwill, 1969), koszty wklęsłe (Zangwill, 1968), i wiele produktów (Zangwill, Garcia, 1977) w środowisku bez ograniczeń.

Metoda Crowston i Wagner (Crowston, Wagner, 1973a) rozważała przypadek wieloetapowego systemu montażu dla wielu poprzedników i tylko jednego następcy, podczas gdy w kolejnej publikacji (Crowston, Wagner, 1973b) rozważyli ten sam problem z ograniczeniem że wielkości partii nie zmieniają się w czasie w powyższym środowisku. Środowisko bez ograniczeń nie ma jednak praktycznego zastosowania w rzeczywistych aplikacjach (Anwar, Nagi, 1997).

Istotnymi heurystykami w obszarze określania wielkości partii są metody przedstawione w podrozdziale omawiającym klasyczne metody określania wielkości partii tj. najmniejszy koszt jednostkowy, partia okresowo bilansowana itp.

Niektóre modele określania wielkości partii odnoszą się do problemu określania wielkości partii z ograniczeniami (*capacitated lot sizing problem- CLSP*) – (de Both et al. 1984, Gunther 1987), problemu dyskretnego określania wielkości i harmonogramowania (*discrete lot sizing and scheduling problem DLSP*) – (Dinkelbach 1964, Haehling von Lanzener 1970, Fleischmann 1990, Salomon 1991) i problemu określania wielkości partii z ciągłym uruchomieniem (*continuous setup lot sizing problem- CSLP*) – (Bitrain and Matsuo 1986, Karmarkar 1987, de Matta and Guignard 1989, Kimms, 1996).

Ouenniche J. i Boctor F. (Ouenniche, Boctor, 2001) zaproponowali nową heurystykę do rozwiązywania problemu harmonogramowania, sekwencjonowania, określania wielkości partii dla wielu produktów na liniach produkcyjnych. Zaproponowana metoda na początku określa sekwencje produkcji, następnie w tym samym czasie wielkości partii i harmonogramy. Heurystyka nazywa metoda grupy G, dzieli zbiór wyrobów na grupy G i wymaga żeby produkty należące do tej samej grupy miały identyczną długość cyklu. Czas cyklu każdej grupy jest całkowitą wielokrotnością okresu podstawowego. Dla każdego okresu podstawowego w cyklu globalnym wybiera się jakie produkty będą produkowane i w jakiej kolejności. Następnie nieliniowy program określa wielkości partii i buduje wykonalny harmonogram produkcji.

Gunther i in. (2006) przedstawili podejście oparte na zasadzie planowania blokowego, które równocześnie rozważa określanie wielkości partii i harmonogramowanie. Poprzez zintegrowanie różnych wariantów typu produktu w tzw. „blok”. Złożoność modelu jest znacząco zmniejszona. Bloki są przypisane do makro-okresów. Zgodnie z tą koncepcją zakończenie bloku musi mieć miejsce przed końcem określonego makro-okresu.

W tabeli 3 poniżej przedstawione zostało podsumowanie ważniejszych heurystyk z podziałem na rodzaj rozważanego problemu, zastosowanej metody, istniejących zmiennych decyzyjnych i ograniczeń oraz funkcji celu.

Tab. 3. Podział heurystyk ze względu na rozważany problem, zastosowaną metodę, zmienną decyzyjną, ograniczenia i funkcję celu

Autorzy	Problem	Metoda	Zmienne decyzyjne	Ograniczenia	Funkcja celu
Gunther 1987	CLSP	Procedura heurystyczna period-by period	Popyt Wielkości partii	Popyt deterministyczny i zmienny w czasie, Ograniczona zdolność produkcyjna	Minimalizacja kosztów przebrojeń i magazynowania
Fleischmann 1990	DLSP	B&B procedura przy wykorzystaniu relaksacji Lagrangean Problemy relaksacji rozwiązane programowaniem dynamicznym	Popyt Ilość zmian na dzień Koszty przebrojeń zależne od sekwencji	Kilka produktów Jedna maszyna Popyt dynamiczny Czasy przebrojeń zerowe	Minimalizacja całkowitego kosztu magazynowania i przebrojeń
Salomon I in. 1991	DLSP	Liniowa minimalizacja dyskretna (mixed integer linear program-MILP)	Layout linii Ilość produktów Ilość maszyn Struktura kosztów przebrojeń, produkcji Struktura czasów przebrojeń	Horyzont planistyczny podzielony na równe odcinki Ograniczone zdolności produkcyjnej każdej maszyny Określone zapotrzebowanie	Minimalizacja kosztów przebrojeń, utrzymania zapasów i produkcji
Brüggemann, W.; Jahnke H. 1994	DLSP	Liniowa minimalizacja dyskretna (mixed integer linear program-MILP)	Ilość produktów Ilość okresów Wielkość zapotrzebowania	Ograniczona ilość wyrobów, maszyn, długość horyzontu planistycznego	Minimalizacja całkowitego kosztu przebrojeń i magazynowania

Gunther I in. (2006)	DLSSP	MILP	Zapotrzebowanie Czas startu i zakończenia bloku Rodziny produktów Bloki rodzin	Przypisanie rodzin produktów do konkretnych bloków na podst. czasów przebrojeń	Minimalizacja różnicy między czasem rozpoczęcia i zakończenia sekwencji zadań (ang.makespan)
Karmarkar et al. 1987	CSLP	Programowanie dynamiczne dla przypadku bez ograniczeń. Technika B&B przy wykorzystaniu relaksacji Lagrangian dla problem z ograniczeniami.	Koszty produkcji, początkowe, utrzymania maszyn Wielkość produkcji Wielkość zapasów	Stały koszt produkcji w każdym okresie kiedy istnieje produkcja Zapas początkowy 0	Minimalizacja całkowitych kosztów (przebrojeń, utrzymania maszyn, zmiennych kosztów produkcji i magazynowania)
de Matta and Guignard 1989	CSLP	heurystyka bazująca na relaksacji Lagrangean	Ilość maszyn Strumieniowość Zapotrzebowanie	Popyt dynamiczny	Minimalizacja całkowitych kosztów (produkcji, magazynowania)
Afentakis i inni 1986	MLLP	B&B (Branch &Bound)	Złożoność BOM Zapotrzebowanie	Zdolność produkcyjna Poziom zapasów Ilość poziomów w BOM	Minimalizacja całkowitych kosztów produkcji i magazynowania
Vörös (2002)	MLLP	LiR (heurystyka bazująca na liniowej relaksacji)	Jakość procesu Koszt przebrojeń	Tempo produkcji koszt realizacji Czas przebrojeń	Minimalizacja kosztów przebrojeń i magazynowania
Heinrich i inni 1986	MLLP	MH (monolevel based heuristic)	Czasy ponownych zamówień Etapy w produkcji wyrobu	Zapotrzebowanie Koszty magazynowania	Minimalizacja całkowitych kosztów
Blackburn i inni (1982)	MLLP	MH	koszty	Etapy produkcji Zdolność produkcyjna Horyzont planistyczny zapotrzebowanie	Minimalizacja kosztów produkcji, magazynowania i przebrojeń
Blackburn i inni (1985)	MLLP	MH	Parametry kosztowe Horyzont planistyczny	Zdolność produkcyjna Etapy produkcji	<i>Nie znaleziono</i>
Tempelmeier i inni (1994)	MLCLSP	LaR (heurystyka bazująca na relaksacji Lagrangean)	Metody zamawiania Wielkość produkcji	Zdolność produkcyjna Złożoność produktów Zapotrzebowanie	Minimalizacja kosztów przebrojeń i zamawiania

Katok i inni (1998)	MLCLSP	Programowanie matematyczne Nowa heurystyka CMH (modyfikacji współczynnika) z bilansowaniem kosztów	Wykorzystanie zasobów Czasy przebrojeń Koszty przebrojeń Struktura BOM	Zdolność produkcyjna Zapasy	Minimalizacja czasów przebrojeń i kosztów utrzymania zapasów
Chen, Chu (2003)	MLCLSP	LaR	Ilość produktów Złożoność produktów	Zapasy Zdolności produkcyjne Techniczne ograniczenia	Minimalizacja kosztów przebrojeń i zamawiania w łańcuchu dostaw

Źródło: Opracowanie własne na podstawie opracowań z zakresu heurystyk stosowanych w obszarze określania wielkości partii

W wybranych heurystykach zebranych w powyższej tabeli niezależnie od przyjętych zmiennych decyzyjnych i ograniczeń oraz zastosowanej metody funkcją celu jest minimalizacja całkowitych kosztów obejmujących koszty produkcji, przebrojeń i magazynowania. Można powiedzieć że wszystkie z tych modeli stanowią kontynuacją modelu ekonomicznej wielkości partii wprowadzając nowe ograniczenia, parametry.

3.3. Dynamiczne modele określania wielkości partii

Problem określania wielkości partii może być problemem dynamicznym. Uznaje się, iż kamieniem milowym badań dynamicznej wielkości partii były badania przedstawione przez DeMatteis i Groff.

Jedną z procedur dynamicznego określania wielkości partii omawia w swojej M. Fertsch w swojej pracy *A dynamic procedure for defining an order quantity* (Fertsch, 1998). Procedura rozważa logikę planowania zapotrzebowania materiałowego w oparciu o następujące założenia: horyzont planistyczny jest podzielony na kilka okresów trwających nie dłużej niż średni cykl dostawy dla wyrobu, ograniczenia wydajności są liczone dla każdego okresu, warunki realizacji planowanego zlecenia są harmonogramowane dla każdej pozycji na podstawie standardowego cyklu produkcji, zapotrzebowanie okresowe dla każdej pozycji jest sumą wszystkich indywidualnych zapotrzebowań zgodnie z terminami zakończenia zamówień głównego harmonogramu produkcji, planowane zamówienia dla pozycji są równe zapotrzebowaniu netto lub są stałą wielkością partii (wcześniej

zdefiniowaną). Proces określania wielkości zamówienia składa się z dwóch etapów. Pierwszy etap polega na predefiniowaniu wielkości zamówienia, w drugim etapie są ustalone wielkości zamówień dla każdego okresu planistycznego na podstawie okresowego zapotrzebowania i poziomie dostępnego zapasu na końcu poprzedniego okresu.

Procedura przedstawiona w tym badaniu była osiągnięta poprzez zaprojektowanie systemu planowania i sterowania produkcją dla fabryki produkującej maszyny rolnicze. Na podstawie obserwacji systemu podczas pracy, zanotowano kilka obserwacji, takich jak:

- Wykorzystanie osiągniętej procedury zapewnia stosunkowo stabilny poziom zapasów robót w toku. Można to zauważyć zwłaszcza jeśli rozważana jest ta sama ilość zamówień klientów. Kiedy ilość zamówień klientów rośnie, poziom zapasów również wzrasta, ale nie jest to proporcjonalne do wzrostu ilości zamówień.
- Zapotrzebowania na i-ty wyrób na różnych poziomach wyrobu jest często pokrywane przez jedno skumulowane zamówienie.
- Skumulowane zamówienie zaoszczędza czasy uruchomień.
- Umożliwia to również na przyjęcie nowych zamówień klientów bez zmieniania istniejącego harmonogramu produkcji.
- Średni poziom zapasów robót w toku zależy od złożoności produktu raczej niż od ilości zamówień klientów.

Podstawowy dynamiczny problem określania wielkości partii próbuje znaleźć plan produkcji, który spełnia znany deterministyczny popyt i minimalizuje całkowite koszty produkcji, uruchomienia i utrzymania zapasów na jedną pozycję w ramach rozważanego horyzontu planistycznego. Problem można matematycznie opisać poniższymi wzorami (Jans, Degreave, 2005):

$$\text{Funkcja celu: Min } \sum_{t=1}^m (vc_t x_t + sc_t y_t + \square c_t s_t) \quad \text{Równanie 20}$$

Ograniczenia:

$$s_{t-1} + x_t = d_t + s_t \quad \forall t \in T \quad \text{Równanie 21}$$

$$x_t \leq \sum_{k=t}^m d_k y_t \quad \forall t \in T \quad \text{Równanie 22}$$

$$x_t s_t \geq 0 : y_t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T \quad \text{Równanie 23}$$

gdzie:

vc_t – zmienne koszty produkcji

sc_t – koszt uruchomienia produkcji

hc_t – koszt utrzymania zapasów w okresie t

T – zbiór wszystkich okresów w horyzoncie planistycznym

m – ostatni okres w analizowanym horyzoncie

d_t – zmienna określająca zapotrzebowanie w okresie t

s_t – zmienna określającą zapas w okresie t

x_t – zmienna określająca produkcję w okresie t

y_t – zmienna określająca uruchomienie produkcji w okresie t

Funkcja celu minimalizuje koszty produkcji, uruchomienia i utrzymania zapasów. Równanie 16 zakłada, że zapas z poprzedniego okresu i produkcja z bieżącego mogą być wykorzystane aby zaspokoić popyt w bieżącym okresie lub stworzyć odpowiedni zapas dla spełnienia przyszłego popytu. Powyższy problem nazywany jest problemem określania wielkości partii pojedynczego wyrobu bez ograniczeń (*single item uncapped lot sizing problem*) i po raz pierwszy był omówiony przez Wagner’a i Whitin’a (Wagner, Whitin, 1958).

Problem dynamicznego określania wielkości partii jest ciągle tematem intensywnych badań. Jak do tej pory nowo opracowane rozwiązania w porównaniu z standardowymi systemami planowania zapotrzebowania materiałowego nie są wykorzystywane w profesjonalnym oprogramowaniu.

Istotnym krokiem badań dynamicznej wielkości partii były badania przedstawione przez DeMatteis (1968) i Groff (1979). Badania opublikowane przez innych autorów zawierały nie tylko optymalne rozwiązania problemu ale również procedury heurystyczne. Wyczerpujący przegląd powiązanych publikacji dostępny jest w (Domschke et al., 1993).

Różne rozwinięcia problemów określania wielkości partii dla problemów jedno poziomowych (popyt niezależny) (*single level lot sizing problems*) można znaleźć w pracach Drexl i Kimms (1997) i Jans i Degreave (2008).

W dynamicznym problemie określania wielkości partii Manne (1958) i Wagner i Whitin (1958) zapoczątkowali wspólnie inne podejście w zakresie sposobu rozwiązywania problemów ekonomicznej wielkości partii.

Od 1958 model Manne-Wagner-Whitin zyskał dużo uwagi badaczy, którzy omówili go w wielu różnych pracach i artykułach, większość z nich albo rozwinęło model lub zaproponowało algorytmy do rozwiązania problemów produkcyjnych w nim istniejących.

Model ten nazywany jest dynamicznym modelem określania ekonomicznej wielkości partii (*dynamic economic lot sizing model – DLS*)

Istota algorytmu została omówiona w podrozdziale 1.2.1.

Dokładne procedury rozwiązania W-W są zaprezentowane w (Aggarval, Park, 1993; Federgruen, Tzur, 1991; Wagelmans et al. 1992). Następna generacja modeli łączyła w sobie podejścia z ograniczeniami i dynamiczne (Drexler, Kimms, 1997).

Praca Aggarval i Park (1993) pokazuje że w zakresie wielu problemów ekonomicznej wielkości partii sformułowanie problemu za pomocą dynamicznego programowania powoduje specjalny rodzaj macierzy zwanej macierz Monge'a³. Autorzy udowodnili jak struktura tej macierzy może być rozwinięta żeby otrzymać znacząco szybsze algorytmy dla problemów ekonomicznej wielkości partii. Skupili oni się na problemach bez ograniczeń tj. problemach bez ograniczeń w zakresie produkcji, zapasów czy zaległości.

Florian i Klein (1971) wprowadzili model zawierający wklęsłe funkcje kosztowe (concave costs). Love (1973) omówił wklęsłą funkcję kosztu z ograniczoną zdolnością produkcyjną i magazynowania, wynik spełnia produkcję precyzyjną „*exact manufacturing*”.

Baker i inni (1978) rozważał prosty wyrób mający deterministyczny, zmienny w czasie rozkład zapotrzebowania, i daje on algorytm czasowy $O(2^T)$ dla dynamicznego problemu określania wielkości partii z ograniczoną zdolnością produkcyjną.

Wielu badaczy analizowało dynamiczny problem określania wielkości partii jednopoziomowy (*dynamic single level lot sizing problem*).

Trigeiro et al. (1989) badali model określania wielkości partii z ograniczeniami i czasami rozruchu (*Capacitated Lot Sizing model with Set-up Times – CLST*). Ich model zakłada, że każda pozycja może być produkowana najwyżej raz w każdym okresie czasu. Produkcja partii produkcyjnej wyrobu i pociąga za sobą czas rozruchu L^i i wykorzystanie wydajności B^i na jednostkę, która jest produkowana. Rozwiązują oni problem wykorzystując podejście relaksacji Lagrangiana, zwiększając dwukrotnie ograniczenia, aby rozłożyć problem na n podproblemów określania wielkości partii bez ograniczeń dla jednego wyrobu, które rozwiązywane są za pomocą oprogramowania dynamicznego.

Określanie wielkości partii jest znacznie bardziej skomplikowane w środowisku dynamicznym, wieloetapowym. Zaproponowano wiele różnych heurystyk są one jednak

³ Matematyk francuski, członek Akademii Nauk w Paryżu (od 1780), główny organizator i profesor Ecole Polytechnique w Paryżu (1794), która przez pół wieku była centrum matematycznym świata. W okresie rewolucji francuskiej był członkiem komisji ustalającej miary i wagi, w latach 1792-1793 był ministrem marynarki. Monge jest twórcą geometrii wykreślnej jako nauki, napisał wiele prac z geometrii różniczkowej i równań różniczkowych. Geometryczne prace Monge'a były związane z praktycznymi potrzebami inżynierii.

bardzo skomplikowane pod względem obliczeniowym. Kilku badaczy zaproponowało również zastosować metody informatyczne bazujące na sieciach neuronowych, algorytmach genetycznych itp. P.H.Hanh i N.V. Hop (2000) zaproponowali zastosowanie metody agentową do zbudowania zdecentralizowanego modelu zarządzania tym złożonym problemem. Wdrożenie modelu agentowego wykorzystuje algorytmy genetyczne. Szerzej kwestia zastosowania metod bazujących na sztucznej inteligencji zostanie omówiona w kolejnym podrozdziale.

W rzeczywistych aplikacjach system MRP jest wdrażany na ruchomym horyzoncie planistycznym. Pod tym warunkiem prognoza zapotrzebowania będzie uaktualniana okresowo, i nowe informacje są dodawane do istniejących danych celem skorygowania bieżący plan i określić nowe wielkości partii i terminy zamówień. Zmiany te często wywołują zakłócenia produkcji, braki surowców lub podzespołów i prowadzą do zwiększonych kosztów utrzymania zapasów. Powodują one również nierówność systemu. Dlatego też techniki określania wielkości partii sprawdzające się w warunkach stabilnego popytu nie sprawdzają się równie dobrze jeśli popyt jest zmienny.

Zhao i Xie (1998) przebadali wiele wielopoziomowych heurystyk w ruchomym horyzoncie i zaobserwowali, że reguła jednopoziomowa Silver Meal z modyfikacjami kosztowymi, reguła Silver Meal dla górnego poziomu i reguła partii na partię dla niższych poziomów sprawdzają się lepiej w wielopoziomowym określaniu wielkości partii.

Dynamicznym określaniem wielkości partii produkcyjnej zajmują się również między innymi Jans i Degreave (2008), którzy w pracy *Modelling industrial lot sizing problems: a review* zawarli przegląd ostatnich badań w obszarze modelowania deterministycznych jednopoziomowych dynamicznych problemów określania wielkości partii.

W innej swojej pracy dokonują oni przeglądu meta heurystyk mających zastosowanie w obszarze dynamicznego określania wielkości partii (Jans, Degreave, 2007).

Quadt D. i Kuhn H. (2005) zaproponowali zintegrowane podejście określania wielkości partii i harmonogramowania produkcji na elastycznych liniach produkcyjnych. Głównym celem jest znalezienie harmonogramu produkcji przy minimalizacji całkowitych kosztów i minimalizacji średniego czasu przepływu przez system. Proces rozpoczyna się od zaplanowania wąskich gardeł i etap produkcji z wąskimi gardłami jest planowany oddzielnie. Ostatecznie tworzone są harmonogramy na pojedyncze wyroby przy założeniu minimalizacji kosztów przebiegów i utrzymaniu krótkiego czasu przepływu. Rozważana elastyczna linia produkcyjna składa się z równoległych maszyn w pewnych etapach produkcji. Proponowane przez nich rozwiązanie może być stosowane na liniach produkcyjnych spełniających dwa

warunki: (1) istnieje możliwość grupowania produktów w rodziny produktów, (2) istnieje możliwość zidentyfikowania wąskich gardeł- etap wąskich gardeł musi być stabilny podczas puszczania planowania, może się zmieniać pomiędzy kolejnymi turami planowania.

Li. Y i inni (2012) zaproponowali heurystykę mającą na celu znalezienie optymalnego planu produkcji dążąc do minimalizacji całkowitego kosztu: produkcji, magazynowania i stałego kosztu przebrojeń. Rozważają zarówno przypadek jedno poziomowy jak i wielopoziomowy. Zaproponowali 3 etapowy model umożliwiający rozwiązanie obu przypadków. W pierwszym etapie wykonują wstępne przetwarzanie, aby radzić sobie z trudnościami ze względu na wspólny koszt przebrojeń. W etapie drugim adoptują heurystykę okres po okresie celem stworzenia wykonalnego harmonogramu produkcji i w końcowym etapie ulepszają rozwiązanie poprzez analizowanie serii podrzędnych problemów.

Wybrane przykłady meta heurystyk zostaną omówione szczegółowiej w kolejnym podrozdziale 3.4.

3.4. Przykłady metaheurystyk w obszarze określania wielkości partii i harmonogramowania

Jednym z pierwszych autorów, który zaproponował wykorzystanie algorytmów genetycznych w obszarze harmonogramowania i określania wielkości partii był Davis (1985). Zwrócił on uwagę na możliwość zastosowania metod probabilistycznych lokalnego przeszukiwania w środowiskach o dużych obszarach przeszukiwania i zaproponował reprezentację w której algorytm genetycznych działa na liście która dalej musi być odkodowana aby wygenerować harmonogram.

Bardzo wiele jest prowadzonych badań i powstało opracowań ukazujących możliwości, jakie niesie z sobą zastosowanie meta heurystyk w obszarze poszukiwania optymalnych wielkości partii w zależności od nałożonych kryteriów i ograniczeń. Wybrane prace zostaną przedstawione poniżej.

Jednym z pierwszych algorytmów w obszarze określania wielkości partii był model Haase i Kohlmorgen (1996), których równoległy algorytm genetyczny rozwiązywania problemu określania wielkości partii z ograniczeniami przewyższał wydajnością heurystyki zaproponowane wcześniej. Innym algorytmem genetycznym był algorytm zaproponowany przez Kimms (1996) dla problemu proporcjonalnego określania wielkości partii dla wielu wyrobów, wielu maszyn, który udowodnił że jest lepszy niż algorytm przeszukiwania tabu

(o blisko 18%) jednak średnie odchylenie dla optimum wynosiło 19%. Khouja, Michalewicz i Wilmot (1998) przedstawili algorytm genetyczny dla problemu harmonogramowania i określania ekonomicznej wielkości partii który dostarczył średnie wyniki 3-11% od teoretycznej dolnej granicy. Również Sarker i Newton (2002) zaproponowali algorytm genetyczny dla ELSP dodali jednak dodatkowe ograniczenia transportu (Duda, Osyczka, 2007).

Jednym z obszarów gdzie znalazły zastosowanie algorytmy genetyczne był obszar problemów jednopoziomowych bez ograniczeń (ang. *single level uncapacitated lot sizing problems*). Główną kwestią w tym obszarze jest określenie wielkości partii produkcyjnych dla horyzontu planistycznego tak aby suma kosztów zamawiania, utrzymania zapasów i produkcji była zminimalizowana. Hernandez i Suer (1999) zastosowali skalowanie funkcji przystosowania aby otrzymać wyższe prawdopodobieństwa reprodukcji tych chromosomów, które reprezentują lepsze rozwiązania. Przeprowadzili szereg badań aby ocenić w jaki sposób różne elementy takie jak wielkość populacji, prawdopodobieństwo reprodukcji i efekt skalowania wpływają na wyniki końcowe. Stwierdzili że wyższy czynnik skalowania zwiększa szansę znalezienia lepszych rozwiązań.

N. Van Hop i M.T. Tabucanon (2005) zaprezentowali nowy adaptacyjny algorytm genetyczny aby uniknąć rozwiązań lokalnie optymalnych pochodzących z tradycyjnych reguł określania wielkości partii. W algorytmie tym rozmieszczenie uzupełnień jest zakodowane jako łańcuch cyfr binarnych (chromosom). Wielkość ilości produkcji jest określana elastycznie. Algorytm ten może gwarantować rozwiązania zbliżone do optimum globalnego. Podczas ewaluacji szybkości operatorów genetycznych takich jak mutacja, selekcja czy krzyżowanie dla następnego pokolenia są dostosowywane automatycznie w oparciu o tempo przeżywania potomków.

Gaafar (2006) zastosował algorytm genetyczny dla deterministycznego zmieniającego się w czasie problemu określania wielkości partii z zamawianiem partiami i zamówieniami zaległymi. Zaproponował nowy schemat kodowania dla polityki zamawiania w partiach. Porównanie z heurystyką Silver-Meal wskazuje, że algorytm genetyczny generuje znacznie lepsze wyniki niż ta heurystyka.

Problemy jednopoziomowe określania wielkości partii mogą być z różnego rodzaju ograniczeniami wynikającymi ze specyfiki warunków organizacyjno-produkcyjnych.

Pierwszym badaniem należącym do tej grupy była praca Ozdamar i Birbil (1998), w której autorzy zaproponowali hybrydowe podejście łączące przeszukiwanie Tabu, symulowane wyżarzanie i algorytm genetyczny.

J.Xie i J. Dong (2006) opracowali algorytm heurystyczny dla ogólnych problemów określania wielkości partii z ograniczeniami. Struktury wyrobu i ograniczenia wydajności mogą być każdego typu, wydajność zasobów może być dostosowana poprzez nadgodziny i parametry kosztowe (koszt uruchomienia setup, koszty utrzymania zapasów, koszty produkcji i koszty nadgodzin) mogą zmieniać się w czasie. Doświadczenie pokazuje, iż metoda ta jest wydajna i efektywna do rozwiązywania tego typu problemów. Zaproponowany algorytm może być również uogólniony aby rozwiązać bardziej złożone problemy określania wielkości partii takie jak problemy z czasami setup oraz parametrami kosztowymi zależnymi od sekwencji.

Problem określania wielkości partii można również rozwiązać przy wykorzystaniu techniki symulowanego wyżarzania (*simulated annealing*). W przypadku tym konieczne jest rozważenie binarnej macierzy jako zmiennej decyzyjnej. Zmienne decyzyjne są wielowymiarowe. Model określania wielkości partii bardzo dobrze pasuje do struktury symulowanego wyżarzania po zastosowaniu binarnej macierzy dla przedstawienia konfiguracji zmiennych decyzyjnych. Wielkość macierzy zależy od horyzontu planistycznego i ilości wyrobów w systemie ERP. Zaletą tego rozwiązania jest jego elastyczność. Łatwo jest obsługiwać system dla zmieniających się w czasie parametrów takich jak koszty magazynowania, koszty zamawiania, horyzont planistyczny. Podczas stosowania tej metody w konkretnym praktycznym problemie określania wielkości partii po wykonaniu pewnej ilości eksperymentów otrzymuje się odpowiedni harmonogram chłodzenia. Pomimo tego, iż metody symulowanego wyżarzania są uważane za zbyt powolne można poprawić ich wydajność poprzez lepsze kodowanie, np. wykorzystując równoległe wyżarzanie lub stosując hybrydowe algorytmy zaczynające się szybkim heurystycznym modelem określania wielkości partii i następnie wykorzystujące symulowane wyżarzanie. Jedną z wad symulowanego wyżarzania jest fakt, iż jest ono mało obrazowe, a tym samym zrozumiałe dla użytkowników.

Inną techniką w obszarze rozwiązywania problemów określania wielkości partii jest przeszukiwanie z tabu (ang. *tabu search*). Jest ona w stanie rozwiązać różnego rodzaju złożone problemy. Metaheurystyka *tabu search* jest algorytmem samotnego poszukiwacza. „Blokadę” wywoływaną przez optima lokalne przełamuje się tu dzięki osłabieniu reguły selekcji. Rozwiązanie bieżące jest zawsze zastępowane przez najlepsze rozwiązanie w sąsiedztwie, nawet jeśli powoduje to pogorszenie jakości. Aby przeciwdziałać możliwości powtarzania się tych samych rozwiązań bieżących (a więc powstawaniu cykli), stosuje się tu metodę dynamicznego sąsiedztwa. Konceptyjnie, polega to na „okrojeniu” zdefiniowanego

w zwykły sposób sąsiedztwa poprzez usunięcie z niego rozwiązań, które już wcześniej były zaakceptowane jako rozwiązania bieżące.

Podstawowymi elementami przeszukiwania tabu są rozwiązanie początkowe, przesunięcie, rozwiązanie sąsiednie, kryterium aspiracji i zatrzymania. Proces ekonomicznego i efektywnego przeszukiwania przestrzeni rozwiązań jest koordynowany za pomocą strategii opartych na mechanizmach pamięci. Tabu search z długoterminową pamięcią musi przechowywać więcej historycznych przesunięć. Jednakże proste przeszukiwanie tabu wykorzystujące krótkoterminową pamięć dostarcza dobre wyniki jedynie dla pewnych klas problemów. Jeśli ocena całej przestrzeni sąsiedztwa wymaga zbyt dużo obliczeń, wyniki przeszukiwania tabu można poprawić poprzez zastosowanie skutecznej i wydajnej metody sortowania sąsiedztwa i wykorzystanie strategii rankingu listy kandydatów.(Glover, 1996)

Problem określania wielkości partii w systemach MRP przy wykorzystaniu algorytmów genetyczny omówili również Stockton i Quinn (1994). Zastosowali oni algorytm genetyczny, aby opracować technikę wielopoziomowego określania wielkości partii.

Jörg Homberger zaproponował gruboziarnisty (ang. *coarse-grained*)⁴ równoległy algorytm genetyczny dla wielopoziomowego problemu określania wielkości partii bez ograniczeń. Algorytm opisuje i ocenia 176 wzorcowych problemów z literatury, gdzie wielkość problemu waha się od 5 do 500 produktów i symulacja mieści się w zakresie od 12-52 okresów. Podejście równoległości składa się z konkurencyjnie istniejących kilku subpopulacji algorytmu genetycznego ze sporadyczną migracją jednostek pomiędzy nimi. Algorytm genetyczny wykorzystuje nowy system kodowania binarnego dla MLULSP. Równoległy algorytm genetyczny będący pierwszą aplikacją równoległej metaheurystyki dla MLULSP jest konkurencyjny w stosunku do najlepszych znanych metod rozwiązania tego typu problemów. Było to możliwe dzięki zastosowaniu nowych najlepszych rozwiązań dla 34 z wzorcowych problemów (Homberger, 2008).

Palaniappan P.I.K, Jawahar N., zaproponowali algorytm genetyczny oparty na heurystyce, aby znaleźć optymalne i zbliżone do optymalnych rozwiązania dla problemu montażu na linii produkcyjnej. Narzędzie do programowania całkowitoliczbowego LINGO solver zostało wykorzystane, aby ocenić wyniki zaproponowanego algorytmu przy założeniu niezmiennych

⁴ A algorytmie gruboziarnistym populacja jest podzielona na węzły obliczeniowe które mają subpopulacji i same wykonują algorytm genetyczny. Węzły będą zmieniały chromosomy nawzajem zapewniając, że dobre rozwiązania mogą być rozprzestrzeniane do innych węzłów. Taka zamiana może być nazwana migracją gdzie węzeł wysła swój najlepszy chromosom do innych węzłów. Inne węzły które mają gorsze chromosomy będą zamienione otrzymanymi lepszymi.

czasów przebrożeń. Istotą algorytmu jest możliwość równoczesnej optymalizacji sekwencji produkcji i ilości produkcji (Palaniappan, Jawahar, 2011).

Rabta B. i Reiner G. (2012) zaproponowali połączenie algorytmu genetycznego i rozkład sieci kolejek do określania wielkości partii 49 wyrobów produkowanych przy funkcji celu minimalizacja całkowitego czasu cyklu. Model umożliwia radzenie sobie z dużą liczbą wyrobów i złożonymi marszrutami technologicznymi.

Poniższa tabela 4 pokazuje wybrane pozycje literaturowe wykorzystujące algorytmy genetyczne w obszarze określania wielkości partii i ich analizę z punktu wybranych operatorów genetycznych, sposobu wyboru populacji początkowej i reprezentacji chromosomów.

Tab. 4. Zestawienie prac omawiających wykorzystanie algorytmów genetycznych w problematyce określania wielkości partii

Autorzy i data publikacji	Wybór populacji początkowej	Reprezentacja chromosomów	Selekcja	Krzyżowanie	Mutacja
Xie (1995)	losowo	bezpośrednia	Reguła ruletki +elityzm*	Jednopunktowe	Wymiana
Kimms (1996)	losowo	bezpośrednia	Uwarunkowana przyczynowo	Uzależnione od problemu	Uzależniona od problemu
Haase, Kohlmorgen (1996)	losowo	bezpośrednia	Reguła ruletki	Dwupunktowe	standardowa
Khouja et al.(1998)	losowo	bezpośrednia	Reguła turniejowa + elityzm	Dwupunktowe, jednorodne	Wymiana
Özdamar i Birbil (1998)	losowo	bezpośrednia	Proporcjonalnie do wartości funkcji celu	dwupunktowe	Losowo
Hernandez i Suer (1999)	losowo	bezpośrednia	Reguła ruletki + skalowanie	jednopunktowe	Wymiana
Özdamar i Barbarosoglu (1999)	losowo	bezpośrednia	Proporcjonalnie do wartości funkcji celu	dwupunktowe	Losowo
Hang et al. (1999)	NA	bezpośrednia	Reguła ruletki	Uzależnione od problemu	Wymiana
Kobimorgen et al. (1999)	NA	bezpośrednia	NA	dwupunktowe	Losowa
Özdamar i Bozyel (2000)	losowo	bezpośrednia	NA	Liniowy porządek	losowo
Dellaert i Jennet (2000)	Wprowadzenie rozwiązań różnych partii, zasady ciągów znaków	bezpośrednia	Grupowanie _ elityzm	jednopunktowe	Wymiana
Dellaert et al. (2000)	Zastosowanie operatora mutacji i zasady uzupełniania	bezpośrednia	Skalowanie i elityzm	Uzależnione od problemu	wymiana

Hung i Chien (2000)	NA	Bezpośrednia	Reguła ruletki i skalowanie	Uzależnione od problemu	Uzależnione od problemu
Prasad i Chetty (2001)	losowo	bezpośrednia	ranking	Nie stosowane	Nie stosowana
Gutierrez (2001)	losowo	bezpośrednia	Proporcjonalnie do wartości funkcji celu	Nie stosowane	wymiana
Sarker i Newton (2002)	losowo	bezpośrednia	ranking	Dwupunktowa	wymiana
Moon et al. (2002)	Z rozwiązań nieliniowego modelu HLSP	pośrednia	Turniej stochastyczny, skalowanie, elityzm	Operator krzyżowania PMX (Partial – Mapped Crossover)	losowo
Xie i Dong (2002)	losowo	bezpośrednia	Reguła ruletki + elityzm	jednopunktowe	wymiana
Duda (2005)	Wcześniej zdefiniowana część generowana losowo	bezpośrednia	Reguła turniejowa binarna + elityzm	Uzależnione od problemu	nieregularna
Yao i Huang (2005)	losowo	bezpośrednia	Regułą ruletki + elityzm	Ranking liniowy, równomierny	wymiana
Hop i Tabucanon (2005)	NA	Bezpośrednia	NA	jednopunktowe	wymiana
Chang et al. (2006)	losowo	bezpośrednia	Reguła ruletki	jednopunktowe	wymiana
Kampf i Kochel (2006)	NA	bezpośrednia	Reguła turniejowa + elityzm	jednopunktowa	Jeden gen losowo
Megala i Jawakar (2006)	losowo	bezpośrednia	Reguła ruletki + skalowanie	Operator krzyżowania PMX	losowo
Moon et al. (2006)	Z rozwiązań heurystycznych	bezpośrednia	ranking	równomiernie	losowo
Gaafar (2006)	losowo	bezpośrednia	Reguła ruletki + elityzm	Proste równomierne	losowo
Li et al. (2007)	losowo	bezpośrednia	Ranking + elityzm	jednopunktowe	wymiana
Chatfield (2007)	losowo	bezpośrednia	Reguła ruletki + elityzm, skalowanie	jednopunktowe	wymiana
Jung et al. (2007)	Z zaproponowanej procedury	bezpośrednia		Uzależnione od problemu	Uzależniona od problemu
Toledo et al. (2009)	losowo	bezpośrednia	Ranking	Proste równomierne	Wymiana pozycji genów
Vichai Rungreunganaun, Chirawat Woarawichai (2013)	losowo	bezpośrednia	Reguła ruletki	dwupunktowe	Wymiana (liniowa mutacja)

* faworyzowana jest elita populacji, dając możliwość bezpośredniego przeniesienia do następnej generacji

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie dokonanej analizy widać, iż spośród wybranych modeli populacja początkowa jest najczęściej dobierana losowo, reprezentacja chromosomów jest

bezpośrednia, a selekcja jest przeprowadzana przeważnie regułą ruletki z dodatkiem elityzmu bądź skalowania. Z kolei operator krzyżowania jest w większości jednopunktowy, dwupunktowy lub uzależniony od problemu. Mutacja zaś bazuje na wymianie lub jest dokonywana losowo.

Algorytmy genetyczne odnoszące się do problemów określania wielkości partii dla wielu etapów produkcji/łańcucha dostaw oraz dla wielu poziomów w strukturze wyrobów BOM zostaną omówione w dalszej części niniejszej pracy w podrozdziale 3.6 i 3.7.

Analizując istniejące modele służące do określania wielkości partii i harmonogramowania widać iż wykorzystanie algorytmów genetycznych w tym obszarze jest jak najbardziej wskazane i jest to metoda powszechnie stosowana do rozwiązywania problemów z tego obszaru.

Autorka pracy dokonuje porównania wybranych istniejących modeli pod względem ograniczeń, rodzaju popytu, złożoności wyrobu, uwzględnienia zagadnień związanych z czasem przebrojeń, istotą horyzontu planistycznego, obszarem zastosowań. Porównanie metod pokazuje tabela 5.

Na podstawie opracowanego zestawienia widać, iż zastosowanie algorytmów genetycznych w obrębie problematyki określania wielkości partii i harmonogramowania jest dość powszechne. Chociaż znacznie częściej opracowane modele odnoszą się jedynie do samego aspektu wielkości partii. Dopiero od 2007 roku widać wzrost zainteresowania zintegrowanym obszarem określania wielkości partii i harmonogramowania produkcji. Większość metod jest modelami z ograniczeniami przy założeniu skończonego horyzontu planistycznego i odnosi się do wyrobów jednopoziomowych. Mniej więcej połowa modeli zakłada popyt deterministyczny statyczny, a druga połowa popyt dynamiczny. Około 50% z wybranych modeli uwzględnia czas przebrojeń jako jedno z ograniczeń podczas tworzenia algorytmu genetycznego.

Reasumując metodyka algorytmu genetycznego jest metodyką odpowiednią dla problemów określania wielkości partii i harmonogramowania, przy uwzględnieniu ograniczeń którymi między innymi może być czas przebrojeń na stanowiskach roboczych. Znajduje zastosowanie zarówno dla przypadków z popytem statycznym jak i dynamicznym.

Autorka stosuje algorytm genetyczny dla wyrobów jednopoziomowych. Jest to model z ograniczeniami, uwzględniający czasy przebrojeń, odnosi się zarówno do aspektu określania wielkości partii jak i harmonogramowania. Horyzont planistyczny może być zarówno skończony jak i zmienny. Popyt dynamiczny lub probabilistyczny w zależności od źródła danych wejściowych do modelu.

Tab. 5. Porównanie modeli wykorzystujących algorytmy genetyczne w obszarze harmonogramowania i określania wielkości partii

Model (Autor/rok)	Ilość poziomów w wyrobie		Z ograniczeniami	Bez ograniczeń	Czas przebrożeń uwzględniony	Określanie wielkości partii	Harmonogramowanie	Horyzont planistyczny			Rodzaj popytu		
	Jeden poziom	Wiele poziomów						nieskończony	skończony	zmienny	deterministyczny		probabilistyczny
											statyczny	dynamiczny	
Xie (1995)		*		*		*			*			*	
Khouja i inni (1998)	*		*		*	*		*			*		
Ozdamar i Birbil (1998)	*		*		*	*			*			*	
Hernandez i Suer (1999)	*			*		*			*			*	
Kimms (1999)		*	*			*	*		*			*	
Ozdamar i Barbarosoglu (1999)		*	*		*	*			*			*	
Hung i inni (1999)	*		*		*	*			*			*	
Kohlmorgen i in.(1999)	*		*			*			*			*	
Ozdamar i Bozyel (2000)	*		*		*	*			*			*	
Dellaert i Jeunet (2000)		*		*		*			*			*	
Dellaert i in. (2000)		*		*		*			*			*	
Hung i Chien (2000)		*	*		*	*			*			*	
Guterriez (2001)		*	*			*			*		*		
Prasad i Chetty (2001)		*		*		*			*	*	*	*	
Sarker i Newton (2002)	*		*			*	*	*			*		
Ozdamar i in (2002)	*		*		*	*			*			*	
Moon i in. (2002)	*		*		*			*			*		
Xie i Dong (2002)		*	*		*	*			*			*	
Sheng-Yuan Hsu (2002)	*		*			*	*		*		*		
Ponnambalam, Reddy (2003)	*		*		*	*	*	*			*		
Duda (2005)	*		*			*			*			*	
Ghrayeb i in. (2005)	*			*		*		*			*		
Yao i Huang (2006)	*		*		*	*		*			*		

Hop i Tabucanon (2005)	*			*		*			*			*	
Chang i in(2006)	*		*		*	*		*			*		
Kampf i Kochel (2006)	*		*		*	*	*		*				*
Megala i Jawahar (2006)	*		*			*			*			*	
Moon i in(2006)	*		*		*			*			*		
Gaafar (2006)	*			*		*			*			*	
Li i in. (2007)	*		*			*			*			*	
Chatfield (2007)	*		*		*	*		*			*		
Jung i in. (2007)		*	*			*	*		*			*	
Homberger (2008)		*		*		*			*		*		
Toledo i in. (2009)	*		*		*	*	*					*	
Fakhrzad i in. (2009)		*	*		*	*	*		*				*
Prasada Rao I in. (2009)	*		*			*	*	*			*		
Suer i in. (2011)	*		*		*	*			*			*	
Sousa i in. (2011)	*		*		*	*	*		*		*		
Palaniappan i in. (2011)	*		*		*	*	*		*		*		
Jans i in. (2012)	*		*		*	*				*		*	
Chung, Chan (2012)	*		*		*	*	*		*		*		

Źródło: Opracowanie własne

3.5. Metody określania wielkości partii dla wieloetapowej produkcji (ang. *multiechelon* lub *multi stage*)

W przeszłości etapy łańcucha dostaw, magazyn, dystrybutorzy, detaliści itp. były zarządzane niezależnie i buforowane wysokimi zapasami. Analiza wieloetapowych systemów magazynowania ma długą historię. Systemy te są wykorzystywane do dystrybucji produktów do klientów w obrębie dużych obszarów geograficznych. Biorąc pod uwagę istotność tego problemu wielu badaczy rozważało charakter operacyjny tego zjawiska uwzględniając szereg założeń i warunków (Gumus, Guneri, 2007). Zarządzanie wieloetapowym łańcuchem dostaw/wieloetapową produkcją stało się możliwe dzięki rozwojowi nowoczesnych technologii informatycznych.

W systemie produkcyjnym wielofazowym (ang. *multi-echelon*) każdy etap (faza) otrzymuje dane wejściowe od jednego lub więcej poprzedników i dostarcza dane wyjściowe do swojego następnika. Crowston i in. (1973a i b) zasugerował, że dla takiego systemu optymalny zestaw wielkości partii istnieje taki, że wielkości partii w każdym etapie są dodatnimi całkowitymi wielokrotnościami wielkości partii w następnym etapie. Williams (1982) pokazuje, że chociaż całkowite wielokrotności nie gwarantują optymalnych rozwiązań, suboptymalność jest niższego rzędu (klasy) i procedurę z całkowitymi wielokrotnościami można uznać za dobrą heurystykę.

W symulacji przeprowadzonej przez Chakravarty i Shtub (1985) udowodniono, że całkowite wielokrotności wielkości partii są zalecane w produkcji dla systemu magazynowania dla produkcji wieloetapowej. Można wówczas oczekiwać dwóch korzyści:

- Zapasy i produkcję można łatwo zsynchronizować pomiędzy kolejnymi etapami, przyczyniając się do łatwiejszego planowania i sterowania produkcją,
- Całkowity koszt jest prawdopodobnie niższy niż dla niecałkowitych wielokrotności wielkości partii.

W symulacji przeprowadzonej przez autorów system magazynowania dla produkcji wieloetapowej jest przeprowadzony dla trzech etapów. Rozważane są różne koszty magazynowania i uruchomienia produkcji i testowana jest hipoteza, że nie ma znaczącej różnicy pomiędzy całkowitymi i niecałkowitymi wielokrotnościami wielkości partii.

Roundy (1986) zbadał system magazynowania dla produkcji wieloetapowej wielu wyrobów w ciągłym okresie czasu. Model opierał się na następujących założeniach: popyt może pojawić się na każdy wyrób w stałym i zależnym od wyrobu tempie, po złożeniu zamówienia na wyrób jest on nieprzerwanie dostarczany, koszt setup jest funkcją zestawu

wyrobów zamawianych w danym momencie czasu. Celem jest harmonogramowanie zamówień na każdy z produktów w nieskończonym horyzoncie planistycznym tak aby zminimalizować średni koszt wielkoseryjny.

Pinto P.A. i Rao B.M. (1992) opracowali procedurę określania wielkości serii, kolejności i harmonogramu produkcji dla wieloetapowej produkcji wielu wyrobów traktując koszty uruchomienia produkcji jako stałe obliczając wymagania dla czasu uruchomienia i powstającej straty wydajności produkcyjnej. Wiele systemów magazynowania dla produkcji wieloetapowej w praktyce można uznać za problem kolejności (ang. *flow shop*) składający się z zestawu pojedynczych centrów maszyn gdzie wyjście danej maszyny musi spełniać zapotrzebowanie następnej w kolejności maszyny. W celu zminimalizowania czasów przepływu i kosztów utrzymania zapasów produkcja we wszystkich etapach musi być zsynchronizowana tak aby istniało maksymalne możliwe nakładanie się okresów produkcyjnych w każdych dwóch sąsiadujących etapach dla wszystkich wyrobów.

Model opracowany w tym artykule opiera się na następujących założeniach:

1. System produkcji o typie kolejkowym jest wówczas gdy wszystkie produkty są obrabiane na tych samych obiektach, w tej samej kolejności w partiach produkcyjnych
2. Produkty są wytwarzane w stałych wielkościach w trybie cyklicznym
3. Dla każdego produktu, wielkość partii produkcyjnej jest jednakowa we wszystkich etapach produkcji. W każdym etapie partia jest produkowana z pojedynczym setup bez zakłóceń
4. Podczas produkcji partii część z niej nazywana partie przekazywane może być transportowana do następnego etapu. Wielkość partii przekazywanej pomiędzy jakimikolwiek etapami jest zdeterminowana przez wielkość kontenera i fizyczne wymiary wyrobu i zakłada się, że jest stała. Wielkości partii transferowych dla różnych wyrobów i między różnymi etapami mogą być odmienne.
5. Czas wymagany na przekazanie partii materiału pomiędzy etapami jest nieznaczący
6. Skończona ilość czasu jest wymagana aby uruchomić produkcję na każdym etapie i czasy uruchomienia są niezależne od kolejności w jakiej wyrobu są obrabiane
7. Koszt setup składa się głównie z kosztów pracowników, które zakłada się że są stałe i niezależne od ilości etapów
8. Produkty są zamawiane w końcowym centrum obróbczym i wszystkie zapotrzebowania są znane, jednostajne i stałe.

Istnieje wiele założeń mających na celu niepewności związane zwłaszcza z popytem i cyklami dostaw. Jest wiele zmiennych, które się zmieniają w zależności od rodzaju problemu, badanego sektora, wyrobu, metody badawczej, ilości etapów itp. w wieloetapowym zarządzaniu zapasami. W zasadzie większość założeń jest określonych zgodnie z różnymi rozkładami prawdopodobieństwa. Są również pewne założenia takie jak: deterministyczne, stałe, pomijalne, zerowe itp. (Gumus, Guneri, 2007)

3.6. Wielopoziomowe określanie wielkości partii

Problemem szeroko analizowanym w obszarze planowania zapotrzebowania wielkości partii jest określanie wielkości partii na wielu poziomach – ang. *multi-level lot sizing*. Problemy wielopoziomowego określania wielkości partii wyłoniły się jako część logiki MRP (Staggemeier i Clark, 2001) W problemach tego typu mamy do czynienia z relacją pomiędzy wyrobem głównym a jego elementami składowymi w częściach i wyjście jednego poziomu jest wejściem dla innego poziomu. Ze względu na tę zależność pomiędzy częściami w strukturze wyrobu problemy określania wielkości partii w tym obszarze są znacznie bardziej złożone i skomplikowane (Goren et al., 2010).

Niepowodzenia istniejących heurystyk w zakresie optymalizacji wielopoziomowej można przypisać dwóm elementom. Po pierwsze niezdolności algorytmów innych niż algorytm W-W do otrzymania optymalnych rozwiązań dla jednostki na każdym poziomie struktury wyrobu. Innym źródłem błędu jest nieokreślenie w sposób ilościowy zależności między wyrobami za pomocą metod sekwencyjnych. Biorąc pod uwagę znaczące wady obliczeniowe WW dla wielopoziomowego określania wielkości partii, uznano że ulepszona heurystyka jednopoziomowa będzie odpowiednim pierwszym krokiem.

W rezultacie powstała metoda TOPS – technika określania wielkości i lokowania zamówienia. Algorytm składał się z czterech etapów (Coleman, McKnew, 1991):

1. *IPPA pass – incremental part period algorithm* – algorytm przyrostowy wspólokresowy
2. Wstawienie nowego zamówienia pomiędzy istniejące zamówienia
3. Drugie przejście IPPA
4. Możliwe przesunięcia zamówień do wcześniejszych okresów.

Steinberg i Napier (1980) stworzyli model określania optymalnych wielkości partii dla ilości zakupywanych, montowanych i produkowanych, jak również powiązanych decyzji związanych z zapasami dla każdego elementu składowego na każdym poziomie wielopoziomowego systemu produkcyjno-magazynowego we wszystkich okresach w skończonym horyzoncie planistycznym.

Z jednej strony podejmując decyzję o produkcji w większych partiach zmniejszamy łączny czas przeobrażenia tj. łączny czas przygotowywania stanowisk do pracy oraz zapewniamy pracownikom produktywnie zajęcie. Z drugiej strony istnieje jednoznaczny związek pomiędzy wielkością partii produkcyjnej a kosztami tj. im większą partię danego wyrobu produkujemy tym koszt wytworzenia takiej partii produkcyjnej jest wyższy.

W obszarze określania wielkości partii dla wielu poziomów powstało wiele algorytmów genetycznych. Można je pogrupować w dwie główne grupy modeli z ograniczeniami i bez. Jako pierwsze zostaną omówione algorytmy bez ograniczeń.

Pierwszym algorytmem genetycznym dla problemów tego rodzaju bez ograniczeń został zaproponowany przez Xie (1995). Wzorce uruchomienia (setup) są zakodowane jako liczby całkowite binarne w chromosomie i inne zmienne decyzyjne są obliczone z tych szablonów. Kolejnymi przykładami zastosowania algorytmów genetycznych w obszarze problemu określania wielkości partii bez ograniczeń dla wielu poziomów są algorytmy Dellaert i Jeunet (2000), Dellaert et al. (2000), Prasad i Chetty (2001). Dellaert i Jeunet opracowali hybrydowy algorytm genetyczny stosując technikę zamawiania okresowego, algorytm STIL i techniki bazujące na Wagner-Whitin aby stworzyć początkową populację Dellaert et al. (2000) opracowali hybrydowy algorytm genetyczny aby rozwiązać problem określania wielkości partii wielopoziomowy bez ograniczeń wydajności i struktury wyrobu. Koszty utrzymania zapasów i uruchomienia produkcji zmieniają się z okresu na okres. Wyniki symulacji pokazują że zaproponowane podejście uwzględniające koszty zmieniające się w czasie umożliwia wykorzystanie modelu w przemyśle.

Prasad i Chetty (2001) zaproponowali algorytm genetyczny w prostej i standardowej formie połączonyz heurystyką Bit_Mod i adaptacyjnymi prawdopodobieństwami aby uniknąć operatorów genetycznych nastawionych na problem. Metodologia jest wykorzystana dla stałego horyzontu planistycznego aby zbadać wpływ różnych parametrów MRP, tj. struktury wyrobu, horyzontu planistycznego, zasady określania wielkości partii, rozkładu zapotrzebowania na wyniki określania wielkości partii. Horyzont planistyczny i reguła określania wielkości partii są istotnymi parametrami. Wszystkie badania zostały przeprowadzone przy zamrożonym horyzoncie planistycznym i nie.

W obrębie metod z ograniczeniami można wyróżnić między innymi metodę Kimmsa (1999), który przedstawił formułę programowania częściowo całkowitego i technikę algorytmu genetycznego dla problemu określania wielkości partii i harmonogramowania dla wielu maszyn i wielu poziomów. Autor zaproponował procedurę w której dwuwymiarowa macierz jest wykorzystywana aby zakodować rozwiązania. Wyniki obliczeniowe pokazują że zaproponowane podejście przewyższa parametrami zarówno pod względem wyników i znajdowania rozwiązań dopuszczalnych.

Hung i Chien (2000) badają klasy wielokrotnego popytu w wielopoziomowym problemie określania wielkości partii z ograniczeniami. Każda klasa popytu odnosi się do modelu programowania częściowo całkowitego. Autorzy po pierwsze generują rozwiązania dopuszczalne przez sekwencyjne rozwiązywanie modeli klas popytu i następnie wykorzystują przeszukiwanie Tabu, Algorytmy genetyczne i Symulowane wyżarzanie aby rozwiązać problem.

Jung i in.(2007) wykorzystują algorytm genetyczny do rozwiązywania problemu zintegrowanego planowania produkcji w przypadku partnerów produkcyjnych (dostawców). Celem tego badania jest dostarczenie wydajnych zintegrowanych planów produkcji dla dostawców i lokalnej firmy przy skończonych możliwościach produkcyjnych przy jednoczesnej minimalizacji całkowitego kosztu produkcji.

Więcej przykładów zastosowania algorytmów genetycznych w obrębie wielopoziomowych problemów określania wielkości partii można znaleźć w opracowaniu Goren i in. (2010).

3.7. Wady i zalety istniejących modeli w zależności od istniejących warunków produkcyjnych oraz uzasadnienie wyboru metody

Istniejące modele i metody umożliwiające określania wielkości partii i harmonogramowanie mają ograniczone zastosowanie w zależności od istniejących ograniczeń i specyfiki procesu produkcyjnego.

Bazując na ogólnej klasyfikacji modeli przedstawioną w rozdziale 1 część modeli umożliwia jednocześnie określania wielkości partii i harmonogramowanie, pozostałe odnoszą się jedynie do problemu określania wielkości partii nie ingerując już w optymalizację sekwencji produkcji i harmonogram.

Z założenie są modele zwane z ograniczeniami i bez ograniczeń. W modelach bez ograniczeń nie uwzględnianych jest wiele specyficznych czynników związanych ze złożonością wyrobów, długością rozważanego horyzontu planistycznego, kosztami utrzymania zapasów i przeobrażania stanowisk roboczych, dynamiką i zmianami zamówień klientów i wieloma innymi aspektami którym musi stawiać czoła planista produkcji.

Modele z ograniczeniami uwzględniają często tylko wybrane ograniczenia, niekoniecznie te istniejące w praktycznym rozważanym przypadku.

Wiele z dostępnych heurystyk i metaheurystyk charakteryzuje się dużą złożonością obliczeniową, a co za tym idzie bez odpowiedniej wiedzy trudno je samemu zastosować w praktyce.

Złożoność problemów określania wielkości partii i harmonogramowania powoduje, że trudno znaleźć najlepszą metodę którą można zastosować dla ich optymalizacji. W przedsiębiorstwach produkcyjnych często bazuje się na własnym doświadczeniu, praktyce, nie ufając złożonym modelom matematycznym.

Jednak coraz częściej w publikacjach przedstawiane są przykłady praktycznych zastosowań złożonych metaheurystyk które stosuje się w celu optymalizacji wielkości partii i harmonogramowania produkcji dążąc do minimalizacji kosztów, całkowitego cyklu produkcji i realizacji zamówień klienta w możliwie najkrótszym czasie. Metody te zwracają uwagę w jaki sposób zmniejszyć zapasy robót w toku, ustalić sekwencję produkowanych wyrobów i z jakim wyprzedzeniem uruchamiać produkcję elementów składowych wyrobu finalnego.

Przystępując do optymalizacji i rozwiązywania konkretnego problemu konieczne jest określenie kryteriów i funkcji celu, zdefiniowanie zmiennych decyzyjnych i ograniczeń, ustalenia sposobu obliczania funkcji celu.

Istniejące metody określania wielkości partii i harmonogramowania można podzielić w zależności od stosowanej metody (Comelli i inni, 2008).

1. Programowanie matematyczne (metody dokładne)
 - 1.1. Najkrótsza ścieżka- przeszukiwanie przestrzeni rozwiązań
 - 1.2. Metoda podziału i oszacowań (branch&bound, branch&cut, branch&price i inne odmiany)
2. Metody przybliżone
 - 2.1. Heurystyki ogólne
 - okresowe
 - punktowe
 - ulepszające
 - 2.2. Heurystyki programowania matematycznego
 - metoda relaksacji Lagrangian
 - generowanie kolumn
 - relaksacja liniowa
 - 2.3. Metaheurystyki
 - Algorytmy genetyczne
 - Przeszukiwanie tabu
 - Symulowane wyżarzanie
 - Lokalne przeszukiwanie
 - Algorytm zachłanny
 - Algorytm mrówkowy

Zasadniczo algorytm metaheurystyczny można używać do rozwiązywania dowolnego problemu, który można opisać za pomocą pewnych definiowanych przez ten algorytm pojęć. Najczęściej wykorzystywany jest jednak do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych. Termin "metaheurystyka" po raz pierwszy został użyty przez Freda Glovera w 1986 roku (Glover, 1986).

Algorytmy genetyczne mają swoje zalety jak i wady. Spośród zalet można wymienić między innymi (Rutkowski 1997, Michalewicz 1999, Goldberg 2003):

- nie ma ograniczeń, co do postaci funkcji celu,
- wstępna wiedza o problemie nie jest potrzebna,

- możliwość optymalizacji wielokryterialnej,
- duży wybór postaci algorytmu,
- łatwa współpraca z innymi technikami (heurystyki inicjalizacyjne, przeszukiwanie lokalne),
- naturalna paralelność algorytmu.

Metoda ta jest bez wątpienia uniwersalna. Aby tego samego programu użyć w innym problemie, przeważnie wystarczy zmienić funkcję celu. Metoda jest stosunkowo szybka i ponieważ algorytm genetyczny jest algorytmem randomizowanym, możemy powtarzać obliczenia wielokrotnie w nadziei otrzymania lepszych wyników.

Z kolei spośród wymienianych wad algorytmów można znaleźć (Michalewicz 1999, Goldberg 2003):

- heurystyczny charakter techniki (nie daje pewności osiągnięcia optimum w określonym czasie),
- czasochłonność obliczeń (łagodzona przez gwałtowny postęp techniczny),
- często nieefektywna w końcowej fazie przeszukiwań,
- określenie właściwych wartości parametrów nie jest łatwe.

W obszarze harmonogramowania i określania wielkości możemy znaleźć wiele modeli wykorzystujących algorytmy genetyczne w tym obszarze. Zostały one wymienione w podrozdziale 3.4.

Rozdział IV. Metodyka określania wielkości partii dla zmiennego asortymentu produkcji

4.1. Charakterystyka obszaru problemowego

Tematem badań jest przedsiębiorstwo produkcyjne z sektora elektromaszynowego które wdraża elementy Szczupłego Wytwarzania. Przedsiębiorstwo wytwarza części produkcyjne, których proces produkcyjny bazuje głównie na obróbce mechanicznej w połączeniu zarówno z obróbką chemiczną jak i termiczną. Istnieje również wiele procesów specjalnego typu: lutowanie, piaskowanie powierzchni, gładzenie. Niestety żadna z linii produkcyjnych nie jest autonomiczna, co oznacza konieczność kooperacji w zakresie procesu produkcyjnego, zarówno wewnętrznej jak i zewnętrznej. Wpływa to negatywnie na organizację pracy i zarządzania produkcją w przedsiębiorstwie, Aby poprawić pozycję na rynku (przede wszystkim dostosowując się do rosnącego popytu) firma zdecydowała się wdrożyć elementy LM.

Pod względem produktów spółka dzieli się na Zakład 1 i 2 oraz Narzędziownię, gdzie wykonywane są różne wyroby. Zakład nr 1 to zakład produkcyjny skupiający 4 wydziały produkcyjne obróbki mechanicznej, w skład których wchodzi łącznie 10 linii produkcyjnych oraz wydział Obróbki Ciepłej (Hartownia).

Zakład nr 1 to centrum doskonałości kół zębatach. Na poszczególnych liniach produkowane są koła zębate, koła stożkowe o zębach łukowych, koła zębate pomp olejowych, koła zębate reduktorów oraz wałki zębate skrzynek napędów. [strona internetowa P&W, 2014]

Zakład nr 2 to jednostka w skład której wchodzi 9 linii produkcyjnych specjalizujących się w produkcji części bez uzębienia.

W całym przedsiębiorstwie firma wprowadziła zamówienie na około 1025 różnych części produkcyjnych w roku 2008 i 1092 części w roku 2007. Wszystkie produkty charakteryzują się podobnym przepływem procesowym (mniej lub bardziej złożonym). Zostały wyodrębnione rodziny produktów. Identyfikacja rodzin produktów polega na: określenie podobnych przepływów procesowych dla grup, konfiguracji i materiałów tak, aby uruchomienie dedykowanej linii było korzystne i odpowiednie.

Przedsiębiorstwo jest przykładem firmy z małą liczbą klientów i dużą różnorodnością produkowanych wyrobów. Bardzo trudno jest stosować szczupłą produkcję (Lean manufacturing – LM) w takiej firmie. Produkcja jest prowadzona na dużą skalę, biorąc pod

uwagę fakt że firma nie ma w dyspozycji autonomicznych linii produkcyjnych, bardzo często trudno jest wprowadzić zasady LM.

Badania skupiają się na linii produkcyjnej sprzęgieł. Szczegółowiej zostanie ona scharakteryzowana w dalszej części pracy w podrozdziale 4.1.1. i 4.1.2.

4.1.1. Linia sprzęgieł

Analizowana linia produkcyjna jest linią nr 1431. Proces produkcji sprzęgieł przebiega częściowo na analizowanej linii produkcyjnej a częściowo w kooperacji.

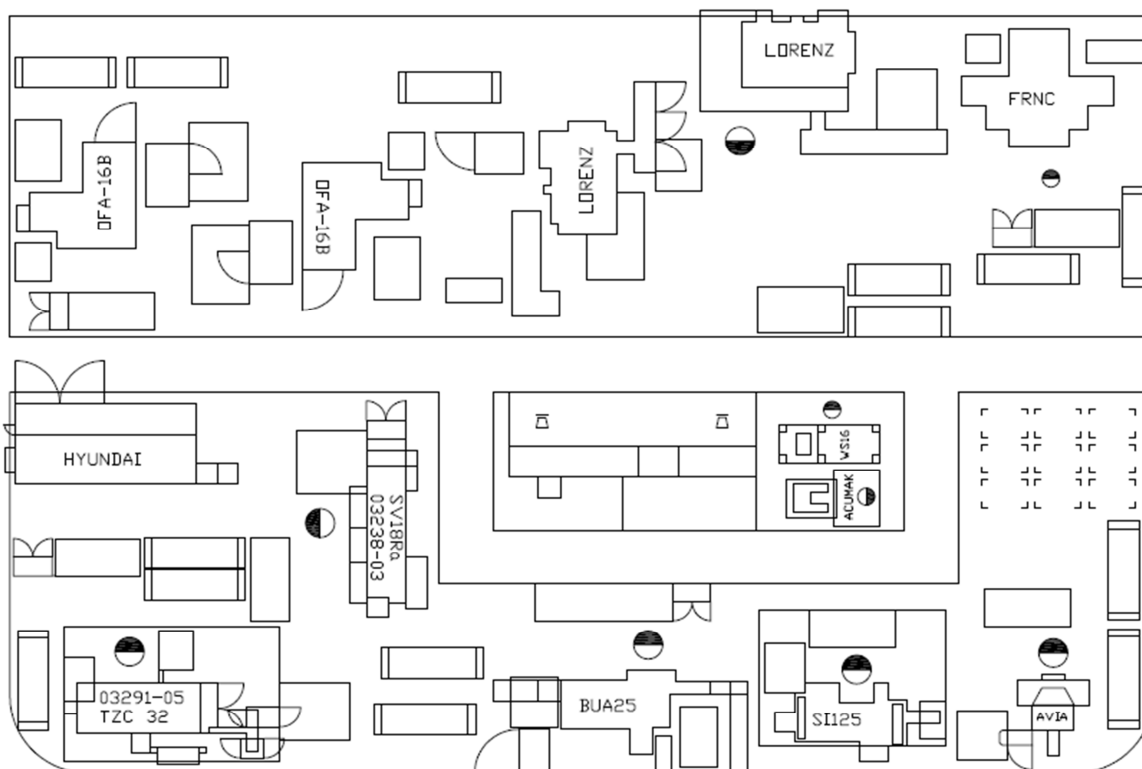
Linia produkcyjna składa się z 19 stanowisk obróbczych (tabela 6)

Tab. 6. Stanowiska produkcyjne na badanej linii produkcyjnej

Nr	Stanowisko	Nazwa zwyczajowa	Symbol	Nazwa pełna
1	02044-01	OHA-32A	OHA	Dłutownica do uzębienia OHA-32A
2	03185-01	OFA-16B	OFA	Frezarka obwiedniowa CNC
3	03185-02	OFA-16B	OFA	Frezarka obwiedniowa CNC
4	03215-01	SL125	125	Szlifierka do otworów AEROTECH
5	03238-03	SV18R	SV	Tokarka pociągowa
6	03222-02	SYJ-40	SUJ	Tokarka pociągowa
7	03244-01	FYN	FYN	Frezarka pionowa SN-FYN-50
8	03291-05	TZC-32	TZC	Tokarka sterowana numerycznie
9	03300-01	Tokarka CNC		Tokarka CNC (sterowana numerycznie)
10	03357-02	Lorenz Ziel	LOZ	Dłutownica do uzębień CNC
11	03357-06	LORENZ	LOZ	Dłutownica do uzębień CNC
12	03392-01	OHA-16B	OHA	Dłutownica do uzębień OHA-16B
13	03545-03	WS-15	FAZ	Wiertarka stołowa (do fazek)
14	03646-03	BUA-25	BUA	Szlifierka kłowa
15	03759-01	ACUMAC	FAZ	Szlifierka do nakiełków
16	05135-01	AVIA	AVI	Frezarka pozioma
17	05140-01	FWD-32	FWD	Frezarka Pionowa
18	14202-01	Hyundai	HYU	Tokarka CNC
19	90012-4	Ślusarnia	SLU	Stanowisko ślusarsko-montażowe

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z firmy

Schemat badanej hali produkcyjnej przedstawia rysunek 11.



Rys. 11. Schemat linii produkcyjnej 1431
Źródło: Opracowanie własne

Na linii produkcyjnej odbywa się produkcja sprzęgół. Sprzęgła produkowane są pod zamówienie z uwzględnieniem ekonomicznej wielkości serii. Oznacza to, że jeżeli zmniejsza się zamówienie klienta to zmniejszana jest również wielkość serii. Jednakże kierownictwo zauważyło tendencję tworzenia się nadmiernych zapasów dla niektórych sprzęgół wynikającą z nieodpowiednich normatywów związanych z wielkościami partii produkcyjnych.

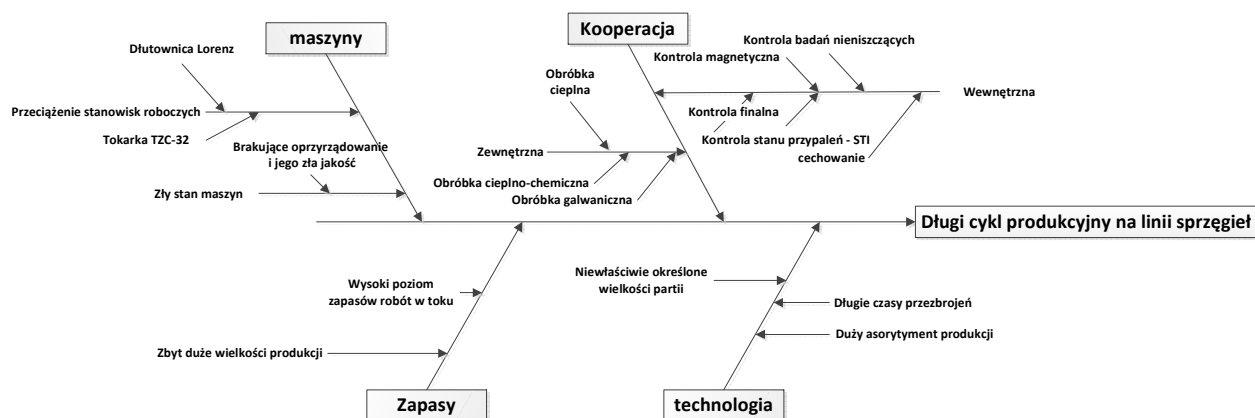
Zasadniczo na podstawie raportów w systemie SAP przeglądane są prognostyczne wymagania klienta, widać więc jak kształtuje się zamówienie każdego miesiąca. Linia nie jest przystosowana do produkcji szczupłej i nie ma możliwości wprowadzenia przepływu jednej sztuki, stąd reguluje się wielkość serii.

Produkcji nie ustala się w oparciu o typy/rodziny detali. Bazując na harmonogramie produkcyjnym ustala się kolejność prac pod każdą maszyną. Bierze się wtedy pod uwagę: datę wysyłki, długość procesu technologicznego, istnienie kooperacji wewnętrznej i zewnętrznej, zaawansowanie w procesie oraz czasy przebrojeń dla poszczególnych detali. Linia nie jest autonomiczna, konieczne jest więc uwzględnienie cyklu produkcyjnego kooperantów.

Jeśli dany detal (sprzęgło) „przestał” przy maszynie wtedy dany detal produkowany jest jako priorytet. Najważniejsze na danej linii jest dostarczyć daną część (PN- part number) tak, aby nie opóźnić montażu silnika. Detal ma status zagrożonego, wtedy gdy przekroczona jest data wysyłki podana w systemie SAP i klient nie posiada już żadnego jego zapasu.

4.1.2. Podstawowe problemy na linii sprzęgieł

Na stosunkowo długi cykl produkcyjny w analizowanym przypadku ma wpływ wiele czynników. Zostały one ukazane na diagramie Ishikawy. Problemy są pogrupowane w cztery główne kategorie: maszyny, kooperacja, zapasy, technologia (patrz rys. 12).



Rys. 12. Diagram Ishikawy- problemy na linii sprzęgieł
Źródło: Opracowanie własne

Celem prowadzonych badań jest stworzenie harmonogramu produkcji sprzęgieł na podstawie zamówień klientów określając kolejność produkcji sprzęgieł oraz ich wielkość partii aby umożliwić skrócenie sumarycznych cykli produkcyjnych dla sprzęgieł.

Podczas badań porównywane będą harmonogramy produkcji dla większych i mniejszych wielkości partii celem sprawdzenia czy optymalne jest produkowanie większych wielkości partii poprzez kumulowanie zleceń na dane sprzęgło, czy też produkcja pod zamówienia klienta i zmniejszanie aktualnie przyjętych normatywów wielkości produkcji dla poszczególnych sprzęgieł.

Wielkości aktualnie przyjętych wielkości partii produkcyjnych pokazuje poniższa tabela 7.

Tab. 7. Wielkości partii produkcyjnych dla analizowanych sprzęgół

PN	Wielkość partii [szt/partię]	PN	Wielkość partii [szt/partię]
3005665	56	3104294-02	20
3006731	50	3104486-01	8
3008778	50	3104961-01	20
3012177	15	3106489-01	15
3012286	30	3106714-01	8
3014466	15	3107525-01	20
3018175	25	3107662-01	10
3018834	30	3108192-01	8
3020770	6	3108312-01	20
3022846	15	3109029-01	10
3023252	30	3109561-01	10
3023886	15	3109766-01	30
3028248	20	3111797-01	12
3031639	20	3112612-01	10
11850-2	40	3112770-01	15
3043685-01	13	3113744-01	20
3045822-01	10	3114832-01	35
3045866-01	10	3115815-01	15
3050685-01	16	3116058-01	10
3053679-01	10	3118073-01	10
3054419-01	15	3119127-01	12
3056784-01	11	3121669-01	10
3058264-01	40	3122824-01	20
3058722-01	10	3122858-01	30
3058806-01	10	3122859-01	20
3070404-01	30	3122926-01	20
3070847-01	8	3123089-01	8
3071087-01	23	3123415-01	13
3071418-01	30	31B2983-01	30
30L1451-01	9	33B0586	6
3100742-01	20	3910114-01	50
3101721-02	10	3911259-01	16
		ST6187-03	10

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z firmy

Prognozy co do wielkości sprzedaży sprzęgół są aktualnie prowadzone na 20 miesięcy do przodu, przy czym prawdopodobieństwo sprawdzalności tej prognozy (bazując na doświadczeniu z lat poprzednich) wynosi ok. 80%. W pracy bazuje się na danych odnoszących się do lat 2009-2010.

Poniższe tabele przedstawiają wielkości prognoz na rok 2009 (tabela 8) i 2010 od stycznia do sierpnia (tabela 8).

Tab. 8. Prognozy sprzedaży sprzętów na rok 2009

PN	2009r. w [szt]											
	31-01	28-02	31-03	30-04	31-05	30-06	31-07	31-08	30-09	31-10	30-11	31-12
3005665	168	242	270	262	276	288	338	320	314	308	288	252
3006731	81	122	141	133	143	157	172	163	154	157	155	129
3008778	81	116	133	127	133	149	161	156	146	151	145	125
3012177	0	8	10	8	11	10	15	12	13	12	13	9
3012178	1	10	10	8	11	11	15	12	13	12	13	9
3012286	36	50	56	57	73	67	77	79	74	73	77	55
3014444	5	13	13	13	14	12	17	16	13	12	13	13
3014466	0	8	13	15	12	13	17	17	13	10	17	15
3015658	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0
3018175	0	7	20	19	20	16	25	25	19	15	21	20
3018834	12	47	41	47	44	46	60	58	56	58	51	49
3019920	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
3020770	0	0	0	0	1	2	1	0	0	2	1	0
3021460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3022846	5	17	25	20	23	21	21	18	19	14	13	15
3023252	27	49	54	56	72	66	75	79	72	72	76	54
3023886	12	18	28	22	22	25	25	22	20	15	19	19
3028248	43	28	25	27	20	25	35	28	33	35	20	34
3028252	14	29	25	27	20	25	35	29	33	35	20	34
3031639	0	6	10	12	15	15	17	14	18	14	17	11
3037103	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11850-2	40	0	20	40	0	40	20	0	40	20	20	20
3043685-01	6	8	4	8	6	7	2	7	4	4	5	6
3045822-01	0	4	6	6	6	7	8	8	7	8	7	7
3045866-01	0	5	6	6	6	7	8	8	7	8	7	7
3053679-01	0	3	6	6	6	8	8	8	7	9	7	7
3054419-01	4	10	10	11	9	12	14	12	14	15	12	9
3056308-01	0	0	5	2	5	4	6	8	4	10	8	8
3056322-01	0	0	1	1	3	2	3	4	2	5	5	4
3056784-01	22	20	20	22	19	24	28	24	28	31	24	18
3058259-01	3	2	3	4	7	6	7	4	5	4	3	8
3058264-01	75	45	18	46	20	79	44	64	64	66	66	62
3058722-01	0	0	4	3	5	4	4	8	3	7	6	6
3058736-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	2
3058806-01	5	3	3	6	9	3	8	4	6	3	3	3
3059733-01	0	0	3	4	3	4	6	8	8	10	4	8
3059735-01	0	4	14	6	6	6	12	6	6	8	6	8
3070847-01	0	2	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2
3071087-01	26	17	21	24	28	20	28	26	25	23	24	16
3071301-01	0	0	0	0	0	0	0	3	1	2	2	2
3071418-01	7	34	33	40	39	39	39	37	37	37	36	34
30L0374-01	5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
30L1451-01	6	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
3100742-01	38	30	47	37	46	48	47	48	40	39	42	38
3101721-02	2	7	8	6	7	9	11	11	11	8	13	5
3104294-02	0	1	13	8	11	12	13	19	11	9	9	7
3104486-01	1	1	3	2	4	3	3	5	4	5	5	4

3104961-01	0	12	19	24	24	25	26	28	22	23	25	19
3106148-01	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2
3106489-01	6	16	19	24	24	25	26	28	22	23	25	19
3106714-01	0	0	2	3	3	3	5	3	5	3	3	3
3107525-01	15	32	29	31	29	27	39	28	37	33	32	16
3108192-01	0	3	3	3	3	3	5	3	5	3	3	3
3108312-01	18	17	15	17	14	16	21	18	20	19	18	9
3109029-01	0	0	1	3	3	3	5	3	5	3	3	3
3109561-01	2	5	7	4	6	6	7	7	7	2	0	2
3109766-01	53	45	63	55	67	69	72	68	64	60	64	57
3111797-01	1	5	11	5	7	6	8	8	8	3	1	2
3112612-01	1	5	5	6	10	5	10	5	11	5	10	6
3112770-01	8	10	10	11	9	11	13	10	12	12	11	7
3113744-01	13	31	27	27	27	27	37	28	35	33	30	16
3114832-01	32	56	60	62	60	70	56	70	73	58	52	58
3115815-01	21	19	25	14	20	20	13	16	16	16	21	16
3116058-01	0	6	9	7	8	5	10	13	7	3	0	3
3116059-01	0	0	0	0	0	0	2	0	4	0	0	0
3118073-01	0	2	9	10	10	9	8	11	8	7	8	9
3119127-01	14	18	16	25	22	24	20	22	17	22	22	13
3121669-01	2	7	4	8	8	6	7	4	2	1	2	2
3122858-01	6	47	54	54	58	55	49	52	47	45	45	40
3122859-01	29	30	31	41	41	34	39	38	33	29	27	25
3122926-01	0	18	25	14	21	22	12	15	16	17	21	16
3123089-01	0	4	6	6	7	7	8	8	8	8	7	7
3123415-01	7	9	14	9	10	11	12	16	10	15	13	13
31B2064-01	10	16	26	24	25	30	25	26	24	26	29	20
31B2065-01	16	40	44	39	41	44	40	42	38	42	45	30
31B2983-01	10	23	24	17	25	27	20	24	20	24	25	17
3910119-01	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
3911145-01	0	0	0	4	3	4	4	3	4	4	5	5
3911259-01	8	2	5	6	1	6	1	11	5	6	10	6
ST3983-02	5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
ST6187-03	0	0	2	6	9	3	6	6	4	5	3	3

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z firmy

Tab. 9. Prognoza sprzedaży sprzętów od stycznia do sierpnia na rok 2010

PN	2010r. w [szt]							
	31-01	28-02	31-03	30-04	31-05	30-06	31-07	31-08
3005665	334	290	246	340	318	334	330	354
3006731	164	161	87	171	164	172	166	182
3008778	155	150	82	163	154	163	156	175
3012177	11	14	8	12	14	14	15	11
3012178	11	14	8	12	14	14	15	11
3012286	84	73	57	83	79	87	79	84
3014444	13	16	4	17	13	13	16	14
3014466	11	16	6	17	13	13	16	14
3015658	2	0	4	0	3	1	1	2
3018175	20	20	10	22	21	21	17	22
3018834	70	64	45	73	65	73	75	76
3019920	0	1	0	0	1	0	0	1
3020770	0	1	1	0	1	1	0	1
3021460	0	0	1	0	1	1	1	0
3022846	19	17	11	17	19	18	16	20
3023252	82	73	55	82	78	86	77	84
3023886	21	18	15	20	20	20	19	22
3028248	37	27	30	35	32	38	41	42
3028252	37	27	30	35	32	38	41	42
3031639	17	16	13	17	14	18	10	18
3037103	1	0	2	0	2	0	1	0
11850-2	20	16	15	9	0	0	0	0
3043685-01	10	13	10	13	15	11	4	12
3045822-01	6	5	7	6	7	2	7	8
3045866-01	6	5	7	6	7	2	7	8
3053679-01	6	6	7	6	7	3	6	8
3054419-01	12	11	6	11	11	11	13	12
3056308-01	2	4	5	6	6	6	8	6
3056322-01	1	2	2	3	3	4	4	3
3056784-01	24	20	12	22	22	22	26	24
3058259-01	5	6	5	6	5	9	5	6
3058264-01	64	63	76	48	92	71	72	88
3058722-01	1	4	6	6	6	4	6	6
3058736-01	0	0	1	1	1	1	3	1
3058806-01	3	3	0	3	3	3	3	3
3059733-01	2	4	5	6	6	6	8	6
3059735-01	4	9	6	11	10	7	6	11
3070847-01	1	2	1	2	2	2	1	2
3071087-01	26	22	22	24	26	25	20	29
3071301-01	0	2	3	3	3	1	2	3
3071418-01	38	41	41	38	44	38	37	43
30L0374-01	2	2	4	2	2	4	6	8
30L1451-01	2	2	4	2	2	4	6	8
3100742-01	42	37	29	40	42	45	40	47
3101721-02	10	7	8	13	9	7	8	7
3104294-02	12	9	6	9	10	8	8	9

3104486-01	2	4	2	3	4	3	4	3
3104961-01	26	27	26	22	29	22	22	28
3106148-01	2	2	2	2	2	2	2	2
3106489-01	26	26	26	22	28	22	22	28
3106714-01	2	4	3	3	4	4	4	3
3107525-01	32	32	22	33	32	31	32	28
3108192-01	2	4	3	3	4	4	4	3
3108312-01	19	18	10	22	17	16	17	18
3109029-01	2	4	3	3	4	4	4	3
3109561-01	4	3	3	4	6	5	2	5
3109766-01	64	59	48	64	61	69	58	71
3111797-01	5	4	4	4	7	5	3	6
3112612-01	5	6	8	8	4	8	8	7
3112770-01	16	11	6	11	11	11	11	12
3113744-01	30	32	20	33	30	31	30	28
3114832-01	60	60	38	59	61	67	56	69
3115815-01	18	20	14	20	19	18	16	18
3116058-01	6	6	3	6	7	6	2	10
3116059-01	0	0	2	0	2	0	0	0
3118073-01	11	9	8	11	10	11	11	10
3119127-01	26	25	26	21	26	22	22	26
3121669-01	9	8	7	8	12	6	6	7
3122858-01	65	63	54	66	68	61	47	67
3122859-01	46	44	40	46	50	43	31	49
3122926-01	19	19	14	20	20	18	16	18
3123089-01	7	5	7	6	8	2	6	8
3123415-01	7	9	12	12	13	7	12	14
31B2064-01	28	25	31	26	24	19	16	21
31B2065-01	41	39	48	40	36	29	22	30
31B2983-01	25	23	29	22	20	16	14	18
3910119-01	0	0	0	0	0	0	0	1
3911145-01	4	4	5	5	6	4	4	4
3911259-01	5	10	11	6	6	6	5	12
ST3983-02	2	2	4	2	2	4	6	8
ST6187-03	3	3	0	3	3	3	3	3

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z firmy

W badanej firmie prowadzone są analizy istniejących czasów przezbrajania dla maszyn. Zgodnie z prowadzonymi badaniami najdłuższe czasy przebrojeń mają maszyny OFA i FYN czyli różnego rodzaju frezarki. Średnie czasy setup dla poszczególnych maszyn przedstawia tabela 10.

Tab. 10. Średnie czasy przebrojeń (setup'y) dla wybranych maszyn

Maszyna	SETUP [min]
OHA-32A 02044-01	22
OFA-16B 03185-01	42,4
OFA-16B 03185-02	35
SI125 03215-01	25,8
SV18R 03238-03	13,2
FYN 03244-01	61,3
TZC-32 03291-05	24
WS-15 03545-03	6
BUA-25 03646-03	9,9
AVIA 05135-01	17,7
FWD-32 05140-01	13,3
Ślusarnia 90012-04	9,6
Lorenz Ziel. 03357-02	12,3
Lorenz 03357-06	11

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z firmy

4.2. Założenia metodyki

Założenia wejściowe do opracowanej metody

- Opracowana metoda bazuje na danych z praktyki oprócz tego część danych jest celowo dobierana celem szerszej analizy otrzymanych wyników i uzyskania różnych scenariuszy;
- Model odnosi się do pojedynczych wyrobów (sprzęgieł) bez wnikania w ich strukturę złożoności BOM;
- Określana wielkość partii to partia produkcyjna uruchamiana na linii sprzęgieł dla danego rodzaju sprzęgła;
- Popyt zmienny, niestabilny, możliwość pojawiania się nowych zamówień w analizowanym horyzoncie planistycznym;
- Linia produkcyjna składa się z 19 maszyn oprócz tego uwzględniono 10 maszyn z kooperacji;

- Na linii jest aktualnie produkowanych 60 rodzajów sprzęgół należących do 16 grup (rodzin) wg podobieństwa technologicznego. Z każdej grupy zostaje wybrany jeden detal tzw. typoszereg celem zdefiniowania marszruty produkcyjnej dla detali w danej rodzinie;
- Rozważany horyzont planistyczny – zmienny ale nie większy niż 130 dni;
- Czasy przebrojeń są istotne w przypadku produkowania różnych rodzin sprzęgół jedna po drugiej,
- Przyjęte czasy przebrojeń dla poszczególnych operacji wykonywanych w ramach produkcji wybranych detali sprzęgół zostały oszacowane na podstawie danych pochodzących z marszrut technologicznych i przyjętych czasów przeobrajania dla konkretnych maszyn;
- Istnieje możliwość modyfikacji ustalonej sekwencji produkowanych części w rozważanym horyzoncie planistycznym celem zminimalizowania sumarycznych czasów przebrojeń i opóźnień w realizacji zleceń;
- Eksperyment zostanie wykonany dla stałej liczby zleceń i modyfikacji ich sekwencji,
- Każdy proces jest sekwencją skończonej liczby operacji, które są wykonywane w kolejności określonej przez marszrutę;
- Czasy transportu pomiędzy stanowiskami nie są brane pod uwagę;
- Zakłada się, że maszyny nie podlegają awariom i pracownicy nie mają przerw w okresie objętym analizą; Terminy realizacji zleceń ustalane w minutach i przeliczane na dni robocze z założeniem czasu pracy dwuzmianowej = 16 godzin roboczych.
- Maszyny będą miały ustalone zdolności produkcyjne – linia produkcyjna pracuje 16 godzin dziennie.
- Kwestie kosztowe nie są rozważane;
- W danym momencie na jednej maszynie produkowana jest partia produkcyjna jednego rodzaju sprzęgła, partia przechodzi przez wszystkie maszyny uwzględnione w marszrucie produkcyjnej danego detalu;
- Termin realizacji zlecenia (produkcji sprzęgła) uzgadniany z klientem. Wszelkie opóźnienia od terminu uwzględniane w określeniu sumarycznego cyklu wykonania. Zlecenia nie mają ustalonych innych priorytetów jak termin realizacji.

Rodziny części na Linii Sprzęgół zostały wymienione w tabeli 11.

Tab. 11. Klasyfikacja sprzęgieł wg rodzin produktów

Rodzina	Sprzęgła (PN)
I	3100742-01 3123240-01 3031639 3053679-01 3113744-01 3058722-01
II	3112612-01 3018175 3021460 3114832-01 3107662-01 3104475-01 3058264-01 3058543-01 3058259-01 3070404-01 3043905-01 3050685-01
III	3122859-01 3122926-01 3114600-01 (nieczynny) 3115304-01 (nieczynny)
IV	3071087-01 3043685-01 3121669-01
V	3023252 3012286 3028248 3028252 3045822-01 3045866-01
VI	3107525-01 3109766-01 3123415-01
VII	3101721-02 3022846-01 3112770-01
VIII	3108312-01 3023886
IX	3005665 3006731 3008778 31B2983-01 3056308-01 3070847-01 3058736-01

X	3018834 3014466 3022288 3104486 3016680 – „nie chodzi”
XI	3071418-01 3104294-02 3121421-01 – „nie chodzi” 3120642-01 – „nie chodzi”
XII	31B2065-01 31B2064-01 3054419-01 3056784-01 3059735-01 ST6187-03
XIII	3116058-01 3104961-01 3116059-01
XIV	3119127-01 3111130-01
XV	3109560-01 3106488-01
XVI	3106148-01 3122858-01 3014444 3115815-01 3118073-01 3012178 3123089-01 3012177 3911145-01 3911259-01 3015658 3019920 3020770 11850-2 3059733-01 3056322-01 3109029-01 3108192-01 3106714-01

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z firmy

Bazując na marszrutach technologicznych poszczególnych detali z każdej rodziny oprócz XV, która na harmonogramie produkcji otrzymanym z przedsiębiorstwa była nieaktywna, wybrany został jeden detal stanowiący typoszereg danej grupy celem zdefiniowania technologii dla sprzęgła w danej rodzinie. Każde sprzęgło ma przypisany odpowiedni symbol A,B,C itd. aż do P.

Wybrano następujące rodzaje sprzęgieł z poszczególnych rodzin:

- a) Rodzina I – detal 3100742-01 – sprzęgło A
- b) Rodzina II – detal 3114832-01 – sprzęgło B
- c) Rodzina III – detal 3122926-01 – sprzęgło C
- d) Rodzina IV – detal 3071087-01 - sprzęgło D
- e) Rodzina V – detal 3023252 - sprzęgło E
- f) Rodzina VI- detal 3123415-01 - sprzęgło F
- g) Rodzina VII – detal 3112770-01 - sprzęgło G
- h) Rodzina VIII- detal 3108312-01- sprzęgło H
- i) Rodzina IX – detal 3008778 - sprzęgło I
- j) Rodzina X – detal 3018834 - sprzęgło J
- k) Rodzina XI – detal 3071418-01 – sprzęgło K
- l) Rodzina XII – detal 3059735-01 - sprzęgło L
- m) Rodzina XIII – detal 3104961-01 - sprzęgło M
- n) Rodzina XIV detal 3119127-01 - sprzęgło N
- o) Rodzina XV - 3109560-01 - sprzęgło O
- p) Rodzina XVI- detal 3118073-01 - sprzęgło P

Technologie wybranych detali w każdej z rodzin sprzęgieł przedstawia poniższa tabela 12.

Tab. 12. Technologie produkcji sprzęgieł w wybranych rodzinach

A	3100742-01	PIŁ	SUJ	U	TZC	TZC	ROT	M	125	LOZ	SLU	NH	TZC	BUA	ROT	125	VAR	SLU	125	TZC	TZC	125	BUA	SLU	125	SLU	MPI	STI	KO	UMA
	tj [min]	0,21	19	6	5	5	6,2	0	4,8	8,3	4	7,2	5	8,1	6,2	4,8	3,7	4	4,8	5	5	4,8	8,1	4	4,8	4	6,5	2	0	0,2
	tpz [min]	2	40	15	110	110	30	0	30	35	5	35	110	25	30	30	35	5	30	110	110	30	25	5	30	5	30	10	0	5
B	3114832-01	PIŁ	SUJ	SUJ	FAZ	M	FAZ	BUA	LOZ	SLU	MN	BKR	AVI	SLU	MH	SV	SV	FAZ	SV	SV	FAZ	PLL	SV	125	FYN	SLU	MPI	STI	KO	
	tj [min]	0,21	19	19	1,8	0	1,8	8,1	8,3	4	0	11	9,37	4	6	7,1	7,1	1,8	7,1	7,1	1,8	9	7,1	4,8	28,1	4	6,5	2	0	
	tpz [min]	2	40	40	10	0	10	25	35	5	0	25	30	5	30	40	40	10	40	40	10	60	40	30	75	5	30	10	0	
C	3122926-01	PIŁ	U	SV	SV	TBT	SV	SV	BRT	FAZ	BUA	SV	SV	FAZ	BUA	KAP	DR	FYN	FAZ	PLL	SLU	MPI	STI	KO						
	tj [min]	0,21	6	7,1	7,1	9,3	7,1	7,1	1,8	1,8	8,1	7,1	7,1	1,8	8,1	24,4	4,5	28,1	1,8	9	4	6,5	2	0						
	tpz [min]	2	15	40	40	30	40	40	10	10	25	40	40	10	25	75	60	75	10	60	5	30	10	0						
D	3071087-01	PIŁ	TZC	TZC	U	TZC	TZC	125	125	95	SLU	LOZ	GD	SLU	125	BUA	PLL	HAU	SLU	MPI	KO									
	tj [min]	0,21	5	5	6	5	5	4,8	4,8	16,6	4	8,3	4,5	4	4,8	8,1	9	6,8	4	6,5	0									
	tpz [min]	2	110	110	15	110	110	30	30	0	5	35	60	5	30	25	60	35	5	30	0									
E	3023252	PIŁ	TZC	TZC	M	BUA	OFA	SLU	NH	SV	125	BUA	FYN	SLU	LOZ	SLU	BUA	KAP	SLU	MPI	STI	KO								
	tj [min]	0,21	5	5	0	8,1	1,8	4	7,2	7,1	4,8	8,1	28,1	4	8,3	4	8,1	24,4	4	6,5	2	0								
	tpz [min]	2	110	110	0	25	10	5	35	40	30	25	75	5	35	5	25	75	5	30	10	0								
F	3123415-01	TZC	TZC	NOR	TZC	TZC	FAZ	BUA	LOZ	LOZ	FYN	SLU	FYN	SLU	FYN	120	SLU	FAZ	BUA	BUA	125	SLU	MPI	STI	KO					
	tj [min]	5	5	6	5	5	1,8	8,1	8,3	8,3	28,1	4	28,1	4	28,1	11	4	1,8	8,1	8,1	4,8	4	6,5	2	0					
	tpz [min]	110	110	15	110	110	10	25	35	35	75	5	75	5	75	25	5	10	25	25	30	5	30	10	0					
G	3112770-01	PIŁ	SUJ	U	TZC	TZC	M	BUA	OFA	OFA	SLU	NH	TZC	SLU	WOT	TZC	125	BUA	FYN	SLU	KAP	KAP	SLU	MPI	STI	KO				
	tj [min]	0,21	19	6	5	5	0	8,1	1,8	1,8	4	7,2	5	4	9,5	5	4,8	8,1	28,1	4	24,4	24,4	4	6,5	2	0				
	tpz [min]	2	40	15	110	110	0	25	10	10	5	35	110	5	50	110	30	25	75	5	75	75	5	30	10	0				
H	3108312-01	TZC	TZC	FYN	SLU	M	SV	OHA	SLU	NH	TZC	WOT	125	FYN	SLU	BUA	WOT	SLU	KAP	SLU	HAU	SLU	MPI	STI	KO					

	tj [min]	5	5	28,1	4	0	7,1	11,8	4	7,2	5	9,5	4,8	28,1	4	8,1	9,5	4	24,4	4	6,8	4	6,5	2	0					
	tpz [min]	110	110	75	5	0	40	75	5	35	110	50	30	75	5	25	50	5	75	5	35	5	30	10	0					
I	3008778	PIŁ	85	95	FAZ	M	FAZ	BUA	125	LOZ	LOZ	SLU	FAZ	SV	SV	SLU	MPI	STI	KO	PIŁ										
	tj [min]	0,21	6,7	16,6	1,8	0	1,8	8,1	3,5	8,3	4,1	4	6,3	7,1	4,5	7,6	6,5	2	0	0,21										
	tpz [min]	0	80	0	10	0	10	25	30	35	0	5	10	40	0	5	30	10	0	0										
J	3018834	PIŁ	SUJ	U	TZC	TZC	WOT	VAR	SLU	M	125	LOZ	SLU	NH	SLU	BUA	WOT	AVI	TZC	125	125	TZC	SLU	MPI	STI	KO				
	tj [min]	0,21	19	6	5	5	9,5	3,7	4	0	4,8	8,3	4	7,2	4	8,1	9,5	9,37	5	4,8	4,8	5	4	6,5	2	0				
	tpz [min]	2	40	15	110	110	50	35	5	0	30	35	5	35	5	25	50	30	110	30	30	110	5	30	10	0				
K	3071418-01	PIŁ	TZC	SV	FAZ	M	FAZ	BUA	125	LOZ	SLU	NH	SV	SV	FAZ	300	AVI	310	315	SLU	MPI	STI	KO							
	tj [min]	0,21	5	7,1	1,8	0	1,8	8,1	4,8	8,3	4	7,2	7,1	7,1	1,8	7	9,37	6,4	5	4	6,5	2	0							
	tpz [min]	2	110	40	10	0	10	25	30	35	5	35	40	40	10	40	30	30	40	5	30	10	0							
L	3059735-01	DAI	SLU	LOZ	SLU	LOZ	SLU	KO																						
	tj [min]	0,4	4	8,3	4	8,3	4	0																						
	tpz [min]	3	5	35	5	35	5	0																						
M	3104961-01	PIŁ	SUJ	SUJ	U	TZC	TZC	LOZ	SLU	LOZ	SLU	LOZ	SLU	MPI	STI	KO														
	tj [min]	0,21	19	19	6	5	5	8,3	4	8,3	4	8,3	4	6,5	2	0														
	tpz [min]	2	40	40	15	110	110	35	5	35	5	35	5	30	10	0														
N	3119127-01	PIŁ	SUJ	U	TZC	TZC	WOT	M	125	OHA	SLU	NH	TZC	TZC	SLU	BUA	WOT	125	LOZ	KAP	125	285	SLU	STI	KO	PLL	MPI	KO		
	tj [min]	0,21	19	6	5	5	9,5	0	4,8	11,8	4	7,2	5	5	4	8,1	9,5	4,8	8,3	24,4	4,8	3,7	4	2	0	9	6,5	0		
	tpz [min]	2	40	15	110	110	50	0	30	75	5	35	110	110	5	25	50	30	35	75	30	35	5	10	0	60	30	0		
O	3109560-01	TZC	TZC	FYN	SLU	M	SV	OHA	SLU	NH	TZC	WOT	125	FYN	SLU	BUA	WOT	SLU	KAP	SLU	HAU	SLU	MPI	STI	KO					
	tj [min]	5	5	28,1	4	0	7,1	11,8	4	7,2	5	9,5	4,8	28,1	4	8,1	9,5	4	24,4	4	6,8	4	6,5	2	0					
	tpz [min]	110	110	75	5	0	40	75	5	35	110	50	30	75	5	25	50	5	75	5	35	5	30	10	0					

P	3118073-01	PIŁ	SR	TAE	WOT	FAZ	M	FAZ	BUA	125	LOZ	LOZ	SLU	NH	FAZ	BUA	TZC	TZC	BKR	FAZ	BUA	SV	SLU	MPI	STI	KO				
	tj [min]	0,21	4,5	15	9,5	1,8	0	1,8	8,1	4,8	8,3	8,3	4	7,2	1,8	8,1	5	5	11	1,8	8,1	7,1	4	6,5	2	0				
	tpz [min]	2	55	70	50	10	0	10	25	30	35	35	5	35	10	25	110	110	25	10	25	40	5	30	10	0				

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z firmy

Wyjaśnienie symboli:

125- szlifowanie otworów

AVI- frezowanie poziome

BKR- wiercenie

BUA- szlifowanie

DR- drążenie

FAZ- wiercenie

FYN- frezowanie

KAP- szlifowanie uzębień

KO- kontrola ostateczna

LOZ- dłutowanie

M-miedziowanie

MPI- kontrola magnetyczna

NH- nawęglanie i hartowanie

NOR- ulepszanie

OFA- frezowanie obwiedniowe

OHA- dłutowanie

PIŁ- cięcie

PLL- szlifowanie

ROT- cechowanie

U- ulepszanie

STI- kontrola przypaleń

SUJ- toczenie

TAE- toczenie

TZC- toczenie CNC

VAR- przeciąganie

WOT- szlifowanie płaskie

MH- miedziowanie i hartowanie

SLU- szlifowanie

SR- drążenie

UMA- cechowanie

Technologię produkcji przykładowego sprzęgła – PN 3008778 przedstawia tabela 13.

Tab. 13. Technologia produkcji sprzęgła PN 3008778

Tj	Tpz	Stanowisko	Linia	Nazwa	Nazwa operacji
0	0	90050-01	1434	Przygotowanie robót w rozdzielni	Przygotowanie
0,21	0	00600-01	1001	Piła	Cięcie
0	0	90050-01	1434	Przygotowanie robót w rozdzielni	Przygotowanie
6,7	80	14202-01	1671	Hyundai	Toczenie CNC
5	110	03291-05	1431	TZC-32	Toczenie CNC
0,5	5	90010-01	1491	Cechowanie	Cechowanie
11,6	80	14202-01	1671	Hyundai	Toczenie CNC
19	40	03238-03	1431	SV18R	Toczenie
1,8	10	03545-03	1431	WS-15	Docieranie fazek
2	10	90021-01	1511	Hanson	mycie wg instrukcji
0	0	M			Miedziowanie 1
1,8	10	03545-03	1431	WS-15	Docieranie fazek
8,16	25	03646-03	1431	BUA-25	Szlifowanie
3,5	30	03215-01	1431	Sl125	Szlifowanie
8,34	35	03357-02	1431	Lorenz ziel.	Dłutowanie
4,19	20	03357-02	1431	Lorenz ziel.	Dłutowanie "SPC"
4	5	90012-04	1431	Ślusarnia	Ślusarska
2	10	90021-01	1511	Hanson	mycie wg instrukcji
0	0	90040-00		Kontrola międzyoperacyjna	Kontrola
0	0	MNH			Miedziowanie II
1	0	MNH			Oczyszczanie chemiczne
1,5	5	MNH	1531	Oczyszczarka inżektorowa	Oczyszczanie
0	0	MNH		Kontrola międzyoperacyjna	Kontrola
1,2	35	MNH	1531	Piec	Nawęglanie
0,2	5	MNH	1531	Cechowanie próbek	Cechowanie próbek
0	0	MNH			Miedziowanie próbek
0	0	MNH	1531	Piec	Obróbka cieplna próbek
0	0	MNH		Kontrola międzyoperacyjna	Kontrola
0	0	MNH			Odmiedziowanie
0,75	5	MNH	1531	Oczyszczarka inżektorowa	Oczyszczanie
0	0	MNH			Miedziowanie
8,3	30	MNH	1531	Piec	Hartowanie
0,1	10	MNH	1531	Myjka	Mycie
1	10	MNH	1531	Komora	Obróbka podzerowa
1	2	MNH	1531	SEL11	Niskie odpuszczanie
0	0	MNH			Odmiedziowanie
0,75	5	MNH	1531	Oczyszczarka inżektorowa	Oczyszczanie
0,3	10	MNH	1531	Polerka	Zaczyszczanie
0	0	MNH		Kontrola międzyoperacyjna	Kontrola
		MNH			Konserwacja

6,5	30	90040-00		Kontrola międzyoperacyjna	Kontrola
0,5	5	90010-01		Cechowanie	Cechowanie
6,3	10	03545-03		WS-15	Docieranie fazek
7,14	40	03238-03		SV18R	Toczenie
0,5	5	90010-01		Cechowanie	Cechowanie
4,54	45	03238-03		SV18R	Toczenie
2,95	25	03646-03		BUA-25	Szlifowanie
7,68	5	90012-04		Ślusarnia	Ślusarska
2	10	90021-01		Hanson	mycie wg instrukcji
6,5	30	90039-01		Kontrol (H810)	Kontrola magnetyczna
2	10	90020-02		Myjka ze stołem ob. (WM35x27W-35x27R)	mycie wg instrukcji
2	10	90045-01		Kontrola stanu powierzchni STI (CEIM-5)	Kontrola przypaleń
2	10	90020-01		Myjka ze stołem ob. (DT 40x48E-2000)	mycie wg instrukcji
3	5	90010-01		Cechowanie	Cechowanie
0	0	90041-00		KO	Kontrola ostateczna
4	10	90056-01		Konserwacja i pakowanie	Konserwacja wg instrukcji
4	10	90056-01		Konserwacja i pakowanie	Konserwacja wg instrukcji

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych z firmy

Przeprowadzając badania bazowano na harmonogramie produkcji (*załącznik 1- harmonogram produkcji sprzęgieł dla wyjściowych wielkości partii*) oraz dwóch innych zmodyfikowanych harmonogramach ukazujących produkcję w mniejszych i większych partiach produkcyjnych. W przypadku mniejszych wielkości partii dokonano symulacji harmonogramu produkcji pod mniejsze zamówienia. W harmonogramie o większych wielkościach partii dla zleceń będących na dane sprzęgło dzień po dniu skumulowano wielkość partii dając termin zlecenia dla pierwszego z terminów (*załączniki 2 i 3- harmonogram produkcji sprzęgieł dla zmniejszonych wielkości partii, harmonogram produkcji sprzęgieł dla skumulowanych wielkości partii*)

4.3. Charakterystyka proponowanej metody harmonogramowania i określania wielkości partii

4.3.1. Założenia algorytmu genetycznego

a) Schemat symulacyjny

Symulacja przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego obejmuje procesy realizacji zamówień na produkcję określonego zbioru sprzęgół o zadanej wielkości partii i w określonym przez *harmonogram produkcji* czasie (specyficznym dla każdego typu sprzęgła i wynikającym z kart technologicznych.).

Ze względu na tą specyfikę problemu, czyli ilość zmiennych niezależnych, zagadnienie jest rozwiązywane z zastosowaniem algorytmu genetycznego, który skutecznie przeszukuje olbrzymią przestrzeń rozwiązań problemu.

Na początek warto zdefiniować podstawowe pojęcia schematu symulacyjnego. **Środowisko** jest zbiorem możliwych „zamówień” na realizację produkcji sprzęgół (przyjęto maksymalnie 16 różnych typów), przy czym w zamówieniach mogą wystąpić powtórzenia tego samego sprzęgła dowolną ilość razy (ale mające np. inne terminy realizacji).

Wielkość przestrzeni rozwiązań to $16!$ czyli 20 922 789 888 000 możliwych rozwiązań.

Osobnikiem jest konkretna realizacja zamówienia (jednostka symulacji).

Genotypem danego osobnika jest określona sekwencja produkcji sprzęgół i danych niezbędnych do ich produkcji.

Przykładowe genotypy pokazane poniżej. Każdy genotyp składa się max z 16 sprzęgół. Dane sprzęgło może występować kilka razy w zależności od harmonogramu produkcji. Każde sprzęgło ma swój symbol A, B, C itd.

BBAAKAPBPAPCCBOB
PAPBAABBAKBCCOBP
ABCBOPBKBAPCAA
AACPOBBKAPBABBPC
AACBPCBPAPBKBAB

Poprzez **gen** rozumiemy pojedyncze sprzęgło, zawierające całą informację dotyczącą procesów produkcji - typów stosowanych maszyn i ich czasów przezbrojeń i jednostkowych „tpz” i „tj”.

Genotyp zawiera zatem uporządkowany zbiór genów (**chromosom** = **określona sekwencja produkcji sprzęgieł**), uzupełniony o czasy realizacji zamówienia i ilości sprzęgieł (**fenotyp**). Informacje zawarte w fenotypie, pozwalają na wstępna selekcję wylosowanych osobników, ze względu na *funkcję oceny* jaką jest sprawdzenie czy czasy realizacji poszczególnych sprzęgieł mieszczą się w harmonogramie zamówień ($t_{\text{produkcji}} < t_{\text{harmonogram}}$).

Jeśli sprzęgła się nie mieszczą generowana jest informacja o ile są opóźnione w harmonogramie względem terminów ustalonych przez klientów. Na tej podstawie istnieje możliwość ustalania z klientami nowych terminów realizacji zleceń ze względu na istniejące zdolności produkcyjne na linii sprzęgieł.

W pierwszym kroku algorytm generuje dużą liczbę osobników (rzędu tysięcy), następnie sprawdza ich przydatność do dalszej symulacji poprzez *funkcję oceny*.

Dla każdego chromosomu wykonywana jest tzw. funkcja oceny, czyli akceptacja ze względu na zgodność z harmonogramem. Wartość czasu zakończenia produkcji każdego sprzęgła (zapisana w tablicy `czasZ[]`) jest porównywana z harmonogramem produkcji sprzęgieł (tablica `tr[]`). Jeśli któryś czas wykonania przekracza harmonogram, wtedy wartość pola „akceptacja” ma wartość „false”. Taki chromosom jest odrzucany a czas przekroczenia terminu zapamiętywany. Funkcja oceny wygląda następująco:

```
for (int i=0; i<16; i++)
    if (czasZ[i]>tr[i])
    {
        akceptacja = false;
        Tpoza = czasZ[i] - tr[i]; //czas poza harmonogramem
    }
```

Obie tablice `czasZ[]`, `tr[]` i zmienna „Tpoza” są polami chromosomu.

b) Funkcja celu

Te osobniki które spełniają wymogi *funkcji oceny* są porządkowane poprzez *funkcję celu*, jaką jest *minimalizacja czasu realizacji* (T_r) całego zamówienia. Wynika to założenia, że zakład produkuje w sposób ciągły ze stałą liczbą pracowników (w stałym trybie

zmianowym), zatem zmniejszenie czasu realizacji całości jest równoznaczne z obniżeniem kosztów całego zamówienia (krótszy czas robocizny i koszt produkcji). Z punktu widzenia symulacji jest to tzw. etap badania przystosowania populacji.

W celu określenia optymalnego czasu wykonania całej produkcji dla każdego chromosomu określa się funkcje celu. Spośród czasów wykonania poszczególnych sprzęgła (w tablicy `czasZ[]`) wybiera się termin najdalszy.

Należy zauważyć, że nie koniecznie jest to czas dla ostatniego sprzęgła w chromosomie - może się ono zakończyć wcześniej niż duża partia innego sprzęgła rozpoczynającego produkcję wcześniej (wcześniejszy gen).

Ten maksymalny czas jest jednocześnie czasem ukończenia całości (`czasTotal`) i stanowi wartość zwracaną przez funkcję celu. Funkcja zapamiętuje numer „kończącego sprzęgła” (`maxTsp`)

```
float czasTotal=0;
for (int i=0; i<16; i++)
    if (czasZ[i]>czasTotal)
    {
        czasTotal = czasZ[i];
        maxTsp = i;
    }
```

Wartość liczbowa funkcji celu (**czasTotal**) jest podstawą do przesortowania chromosomów od najlepszych (**min T**) do najgorszych (**max T**).

Oprogramowanie opracowano w taki sposób, że wygenerowane wyniki gwarantują, iż zadania produkcyjne na poszczególnych maszynach w linii produkcyjnej i w kooperacji się nie pokrywają. Algorytm losuje optymalną konfigurację. Z punktu widzenia technicznego jeden chromosom liczy się od 1 min do 5 min. W celu uzyskania optymalnych wyników wykonano symulację 7000 chromosomów.

Algorytm został napisany w języku C++ w środowisku Visual Studio 2012. Poniżej prezentowane są podstawowe klasy zdefiniowane w bibliotece *defLiniSprzegiel.h*. Najbardziej podstawowym elementem programu jest klasa *maszyna*, zawierająca pola do opisu produkcji na poziomie elementarnym

```

class maszyna
{
public:
    char m_ozn[3];
    float tj, tpz; //czas jedn., czas przezbrojenia
    maszyna();
    maszyna(char*, float, float);
    maszyna kopiuuj();
    void drukuj();
};

```

Konstruktor jawny pozwala na pobieranie danych z innego pliku, gdzie są specyfikacje dla wszystkich parametrów maszyny (uwzględniono 29 typów maszyn).

Kolejnym elementem jest klasa *sprzeglo*:

```

class sprzeglo
{
public:
    char s_ozn[1];
    maszyna m[29];
    sprzeglo();
    sprzeglo(char*, maszyna, ...maszyna); //29 x „maszyna”
    sprzeglo kopiuuj();
    void drukuj();
};

```

Podobnie jak poprzednio konstruktor jawny pozwala przekopiować specyficzne definicje ciągów produkcji dla sprzęgła (złożonych z maszyn zdefiniowanych poprzednio). Uwzględniono 16 specyficznych typów sprzęgieł tj. tyle ile mamy wybranych typów sprzęgieł dla 16 analizowanych rodzin.

Najważniejsza z punktu widzenia symulacji genetycznej klasa jest *chromosom*:

```

class chromosom
{
public:
    char ch_ozn[3];

```

```

    sprzeglo s[16]; // właściwy chromosom
    int il[16]; //tablica z iloscia zam. Sprzegiel      - el. fenotypu
    int tr[16]; //czas dopuszcz. realizacji sprzegiel  - el. fenotypu
    int maxTsp;
    chromosom(char*, sprzeglo,..sprzeglo, int,..int, int,..int); //po 16x
    bool funkcjaOceny();
    float czasWszystko(); // oblicza i drukuje czasy szczegolowo
    float czas(); //oblicza czas realizacji
    void drukujWszystko(); //drukuj pelna informacje
    void drukujSkład(); //drukuj skrocony sklad chromosomu
};

```

Klasa zawiera wszystkie niezbędne informacje dotyczące genotypu osobnika, czyli *zbiór genów-sprzęgieł w określonej kombinacji (właściwy chromosom)*, *zbiór ilości zamówionych sztuk (16x) i zbiór czasów realizacji (16x w [min])*.

Zmienna logiczna *bool* przyjmuje wartość *true* jedynie gdy osobnik spełnia wymogi harmonogramu zamówienia, jest to wynik wbudowanej tutaj *funkcji oceny()*.

W klasie znajduje się funkcja *czas()* (lub bardziej rozbudowana *czasWszystko()*), będąca silnikiem symulacji, bowiem oblicza czas realizacji zamówienia dla określonej konfiguracji, czyli element niezbędny do klasyfikacji osobnika.

Deklaracja każdego nowego osobnika odbywa się w programie sterującym (*main.cpp*). Na początku programu obliczeniowego deklarujemy obiekt, który pełni rolę chromosomu bazowego.

```

chromosom chBaza("Ch1",
    A,O,P,B,B,P,C,A,B,P,K,C,P,P,H,I,
    20,10,20,20,10,5,20,15,20,10,30,10,20,20,15,81,
    5760,7680,7680,9600,15360,15360,15360,15360,
    16320,17280,17280,18240,19200,19200,19200,19200);

```

W linii pierwszej deklaracji jest nazwa obiektu (*chBaza*), jego identyfikator (*Ch1*), a następnie pobierana jest sekwencja sprzęgieł (16 liter ze zbioru {*A..P*}) wg. konkretnego planu zamówień, dalej w odpowiedniej kolejności wprowadzone są ilości z zamówienia (16 razy) oraz maksymalne czasy realizacji poszczególnych sprzęgieł (w minutach, wyliczonych z roboczo godzin z harmonogramu zamówienia). Te dane są przetwarzane do konkretnej postaci sprzęgieł (maszyn) poprzez odpowiednie konstruktory klas. Dla takiej sekwencji możemy obliczyć czasy realizacji poszczególnych sprzęgieł i sprawdzić zgodność z harmonogramem zamówień. Dokonujemy zatem *funkcji oceny* osobnika.

Dalsza symulacja polega na losowym przestawieniu chromosomu bazowego i szukaniu optymalnego czasu realizacji, dla jego pochodnych. Na końcu każdego cyklu - służącego do zbudowania pokolenia - chromosomy są sortowane pod względem *funkcji celu*, czyli całkowitego czasu realizacji zamówienia. Najlepsze osobniki służą do budowy kolejnego pokolenia, itd.

Algorytm zawiera zastosowano funkcje umożliwiające sprawdzanie dostępności maszyny i uwzględnianie zajętości maszyn na harmonogramie.

bool sprawdzDostepnoscMaszyny() - sprawdza czy w wyznaczonym czasie maszyna jest dostępna, jeśli nie to szuka najbliższego wolnego okresu do wykonania zlecenia
void zapiszCzasyMaszynLinia() - zapisuje zajętość wszystkich maszyn przez procesy produkcyjne sprzęgieł i generuje harmonogram dla maszyn (załączam dla chromosomu bazowego)

Dane technologiczne przyjęte w symulacji zawarte są w pliku parametry.h:

```
#ifndef parametry_h
#define parametry_h

const maszyna PIL (0,"PIL",0.21,2); //0
const maszyna C85 (1,"85_",6.7,80); //1
const maszyna C95 (2,"95_",16.6,0); //2
const maszyna FAZ (3,"FAZ",1.8,10); //3
const maszyna MIE (4,"M__",0,0); //4
const maszyna BUA (5,"BUA",8.1,25); //5
const maszyna SOT (6,"125",4.8,30); //6
const maszyna LOZ (7,"LOZ",8.3,35); //7
const maszyna SPC (8,"LO2",4.1,20); //8 LOZ - inny czas!
const maszyna SL1 (9,"SLU",4,5); //9
const maszyna FA2 (10,"FA2",6.3,10); //10 FAZ - inny czas!
const maszyna SV1 (11,"SV1",7.1,40); //11
const maszyna SV2 (12,"SV2",4.5,0); //12
const maszyna SL2 (13,"SLU",7.6,5); //13 SLU - inny czas!
const maszyna MPI (14,"MPI",6.5,30); //14
const maszyna STI (15,"STI",2,10); //15
```

```
const maszyna KOO (16,"KO_",0,0); //16
const maszyna SUJ (17,"SUJ",19,40); //17
const maszyna TZC (18,"TZC",5,110); //18
const maszyna NHH (19,"NH_",7.2,35); //19
const maszyna ROT (20,"ROT",6.2,30); //20
const maszyna VAR (21,"VAR",3.7,35); //21
const maszyna AVI (22,"AVI",9.37,30); //22
const maszyna GDD (23,"GD_",4.5,60); //23
const maszyna UUU (24,"U__",6,15); //24
const maszyna NOR (25,"NOR",6,15); //25
const maszyna FYN (26,"FYN",28.1,75); //26
const maszyna TAE (27,"TAE",15,70); //27
const maszyna SRR (28,"SR_",4.5,55); //28
const maszyna TBT (29,"TBT",9.3,30); //29
const maszyna KAP (30,"KAP",24.4,75); //30
const maszyna OFA (31,"OFA",1.8,10); //31
const maszyna MNN (32,"MN_",0,0); //32
const maszyna PLL (33,"PLL",9,60); //33
const maszyna WOT (34,"WOT",9.5,50); //34
const maszyna BRT (35,"BRT",1.8,10); //35
const maszyna BKR (36,"BKR",11,25); //36
const maszyna HAU (37,"HAU",6.8,35); //37
const maszyna UMA (38,"UMA",0.2,5); //38
const maszyna DRR (39,"DRR",4.5,60); //39
const maszyna OHA (40,"OHA",11.8,75); //40
const maszyna MHH (41,"MH_",6,30); //41
const maszyna PRZ (42,"285",3.7,35); //42
const maszyna SZ1 (43,"120",11,25); //43
const maszyna SZ2 (44,"300",7,40); //44
const maszyna SZO (45,"315",5,40); //45
const maszyna SZ3 (46,"310",6.4,30); //46
const maszyna DAI (47,"DAI",0.4,3); //47
const maszyna nnn (48,"---",0,0); //48
```

sprzęgło A ("A",PIL,SUJ,UUU,TZC,TZC,ROT,MIE,SOT,LOZ,SL1,NHH,TZC,
BUA,ROT,SOT,VAR,SL1,SOT,TZC,TZC,SOT,BUA,SL1,SOT,SL1,MPI,STI,KOO,UMA); //I

sprzęgło B("B",PIL,SUJ,SUJ,FAZ,MIE,FAZ,BUA,LOZ,SL1,MNN,BKR,AVI,
SL1,SV1,MHH,SV1,FAZ,SV1,SV1,FAZ,PLL,SV1,SOT,FYN,SL1,MPI,STI,KOO,nnn); //II

sprzęgło C("C",PIL,UUU,SV1,SV1,TBT,SV1,SV1,BRT,FAZ,BUA,SV1,SV1,
FAZ,BUA,KAP,DRR,FYN,FAZ,PLL,SL1,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //III

sprzęgło D("D",PIL,TZC,TZC,UUU,TZC,TZC,SOT,SOT,C95,SL1,LOZ,GDD,
SL1,SOT,BUA,PLL,HAU,SL1,MPI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //IV

sprzęgło E("E",PIL,TZC,TZC,MIE,BUA,OFA,SL1,NHH,SV1,SOT,BUA,FYN,
SL1,LOZ,SL1,BUA,KAP,SL1,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //V

sprzęgło F("F",TZC,TZC,NOR,TZC,TZC,FAZ,BUA,LOZ,LOZ,FYN,SL1,FYN,
SL1,FYN,SZ1,SL1,FAZ,BUA,BUA,SOT,SL1,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //VI

sprzęgło G("G",PIL,SUJ,UUU,TZC,TZC,MIE,BUA,OFA,OFA,SL1,NHH,TZC,
SL1,WOT,TZC,SOT,BUA,FYN,SL1,KAP,KAP,SL1,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn); //VII

sprzęgło H("H",TZC,TZC,FYN,SL1,MIE,SV1,OHA,SL1,NHH,TZC,WOT,SOT,
FYN,SL1,BUA,WOT,SL1,KAP,SL1,HAU,SL1,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //VIII

sprzęgło I("I",PIL,C85,C95,FAZ,MIE,FAZ,BUA,SOT,LOZ,LOZ,SL1,FAZ,
SV1,SV2,SL2,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //IX

sprzęgło J("J",PIL,SUJ,UUU,TZC,TZC,WOT,VAR,SL1,MIE,SOT,LOZ,SL1,
NHH,SL1,BUA,WOT,AVI,TZC,SOT,SOT,TZC,SL1,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn); //X

sprzęgło K("K",PIL,TZC,SV1,FAZ,MIE,FAZ,BUA,SOT,LOZ,SL1,NHH,SV1,
SV1,FAZ,SZ2,AVI,SZ3,SZO,SL1,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //XI

sprzęgło o L("L",DAI,SL1,LOZ,SL1,LOZ,SL1,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,
nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //XII

```
sprzęgło M("M",PIL,SUJ,SUJ,UUU,TZC,TZC,LOZ,SL1,LOZ,SL1,LOZ,SL1,  
MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //XIII
```

```
sprzęgło N("N",PIL,SUJ,UUU,TZC,TZC,WOT,MIE,SOT,OHA,SL1,NHH,TZC,  
TZC,SL1,BUA,WOT,SOT,LOZ,KAP,SOT,PRZ,SL1,STI,KOO,PLL,MPI,KOO,nnn,nnn); //XIV
```

```
sprzęgło O("O",TZC,TZC,FYN,SL1,MIE,SV1,OHA,SL1,NHH,TZC,WOT,SOT,  
FYN,SL1,BUA,WOT,SL1,KAP,SL1,HAU,SL1,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //XV
```

```
sprzęgło P("P",PIL,SRR,TAE,WOT,FAZ,MIE,FAZ,BUA,SOT,LOZ,LOZ,SL1,  
NHH,FAZ,BUA,TZC,TZC,BKR,FAZ,BUA,SV1,SL1,MPI,STI,KOO,nnn,nnn,nnn,nnn); //XVI
```

```
sprzęgło Q("Q",nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,  
nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn); //zero
```

```
#endif
```

Dane zawierają kolejność operacji technologicznych dla poszczególnych sprzęgieł oraz czasy trwania operacji t_j i przezbrajania t_{pz} wynikające z kart technologicznych.

Istnieje możliwość zmodyfikowania technologii, zmiany konkretnego sprzęgła na inne. Jednak w niniejszej pracy nie modyfikuje się technologii, jedynie harmonogram produkcji i wielkości partii produkcyjnych.

c) Operatory genetyczne

Po wybraniu grupy osobników (sekwencji) o najniższych wartościach T_r (wybieramy najlepsze 50% populacji metodą rankingową), dokonujemy mutacji tych najlepszych poprzez niewielką permutację genów wewnątrz chromosomu. Ta zmiana kolejności cyklu produkcyjnego może się odbywać poprzez np. zamianę wybranych par genów miejscami. Celem takiej mutacji jest udoskonalenie osobnika. Nowa populacja uzupełniana jest przez zmutowane osobniki.

Zaproponowany tutaj schemat mutacji ma uzasadnienie w tym, że kolejność realizacji ma olbrzymie znaczenie dla czasu całości produkcji. Wynika to z faktu, że te same sprzęgła (geny) produkowane po sobie, nie wymagają ponownego przebrojenia urządzeń wszystkich maszyn procesu produkcji sprzęgła. Zatem sekwencja ...ABA... jest mniej korzystna niż ...AAB.

Wykorzystywany algorytm jest klasycznym algorytmem ewolucyjnym, w którym dominującą rolę odgrywa mutacja. Mutacja polega na odwróceniu sąsiednich zleceń sprzęgieł sprawdzając kombinację AB i BA. Taki operator genetyczny gwarantuje zgodność ilości sprzęgieł. Krzyżowanie w tym przypadku okazuje się mało efektywne. Krzyżowanie powoduje optymalizację rodziców w ramach ich chromosomów już wylosowanych. Mutacja umożliwia znajdowania nowych rozwiązań optymalnych znajdując inne minima lokalne w przestrzeni rozwiązań. Algorytm jest dość szybko zbieżny i kolejne chromosomy niewiele są zbliżone do otrzymanych wcześniej wartości minimalnych ze względu na analizować funkcję celu.

Kolejne pokolenia generowane są w analogiczny sposób. Zapewnia to ciągłe obniżanie czasu realizacji T_r w każdym kolejnym pokoleniu przy jednoczesnym sprawdzaniu wykonalności danego harmonogramu produkcji uwzględniając terminy realizacji poszczególnych zleceń. W kolejnych pokoleniach najlepsze chromosomy ulegają mutacji. Realizowane jest to przez następującą funkcję:

chromosom mutacja(chromOpis ChOp)

```
{  
    sprzęgło sp[16]; // pusta tablica  
  
    for (int i=0; i<16; i++)  
        switch (ChOp.spASCII[i])
```

```

{
case 65: sp[i] = A.kopiuuj(); break; //zdefionowane sprzegla A...P
case 66: sp[i] = B.kopiuuj(); break;
..... //analogiczny kod
case 80: sp[i] = P.kopiuuj(); break;
default: break;
}
chromosom ChromMut("ChM",sp[0],sp[1],sp[2],sp[3],sp[4],sp[5],sp[6],sp[7],
    sp[8],sp[9],sp[10],sp[11],sp[12],sp[13],sp[14],sp[15],
    ChOp.il[0],ChOp.il[1],ChOp.il[2],ChOp.il[3],ChOp.il[4],ChOp.il[5],
    ChOp.il[6],ChOp.il[7],ChOp.il[8],ChOp.il[9],ChOp.il[10],ChOp.il[11],
    ChOp.il[12],ChOp.il[13],ChOp.il[14],ChOp.il[15],
    ChOp.tr[0],ChOp.tr[1],ChOp.tr[2],ChOp.tr[3],ChOp.tr[4],ChOp.tr[5],
    ChOp.tr[6],ChOp.tr[7],ChOp.tr[8],ChOp.tr[9],ChOp.tr[10],ChOp.tr[11],
    ChOp.tr[12],ChOp.tr[13],ChOp.tr[14],ChOp.tr[15]);

for (int i=0; i<4; i++) //4 losowe mutacje
{
    int los1 = rand()%16;
    int los2 = (los1 + 1)%16; //numer sąsiada modulo 16
    sprzeglo tmpsprzeglo = ChromMut.s[los2].kopiuuj();
    ChromMut.s[los2] = ChromMut.s[los1].kopiuuj();
    ChromMut.s[los1] = tmpsprzeglo.kopiuuj();
}

return ChromMut;
}

```

Funkcja pobiera chromosom z programu sterującego, następnie dokonywane jest czterokrotne losowanie par sąsiednich genów i ich zamiana miejscami (czyli wymiana informacji o sprzęgłach, zawartych w obiekcie s[nr]). Funkcja zwraca nowy chromosom ze zmutowaną sekwencją.

Taka procedura stosowana jest wobec wszystkich zaakceptowanych chromosomów (rodziców) w jednym pokoleniu. Nowe chromosomy dodawane są do następnego pokolenia wraz z rodzicami i uzupełniane losowo do założonej wielkości populacji pokolenia.

d) Wyniki symulacji - założenia

Wyniki symulacji są konwertowane do plików excelowych gdzie zapisywane są informacje dotyczące:

- a) obciążenia maszyn przez poszczególne sprzęgła,
- b) analizowane sekwencje sprzęgieł w kolejnych chromosomach i wybór chromosomu zwycięskiego,
- c) przechodzenie sprzęgieł przez poszczególne maszyny ukazujące dla zwycięskiego chromosomu czasy produkcji i oczekiwania na kolejnych maszynach wynikających z technologii produkcji
- d) czasy obciążeń maszyny i przestojów w analizowanym horyzoncie planistycznym
- e) opóźnienia realizacji zleceń względem wyjściowego harmonogramu i ustalonych w nim terminów realizacji dla poszczególnych sprzęgieł

4.4. Wyniki badań

4.4.1. Wyniki badań dla wybranych zleceń produkcyjnych z harmonogramu na podstawie danych rzeczywistych z przedsiębiorstwa

Pierwszą przeprowadzoną symulacją przy pomocy opracowanego oprogramowania była analiza harmonogramu produkcji sprzęgła na podstawie danych z badanego przedsiębiorstwa, przy założeniu że sprzęgło dla każdej rodziny sprzęgła uwzględniane jest sprzęgło wcześniej wybrane. Harmonogram z danymi znajduje się w załączniku 1.

Przykładowe chromosomy będące wynikiem symulacji pokazane są poniżej. Zwycięski chromosom miał minimalny czas całkowity wynoszący 8248 min. Co w stosunku do chromosomu o maksymalnym czasie stanowi spadek o 2423,1 min tj. 22,7%.

lp.	akcept.	czas	czas poza	kombinacja
0	1	8418	0	AOPBBPCABPKCPPHI
1	0	9284	1604	CHOAPPKBBIPBAPPC
2	0	9500,1	2432	BBPPOBCPCHAKIAPP
3	0	9231	159	AAKPPBBCIPOCHPPB
4	0	10083,1	1423	PBBHBAPCOPCAIPKP
5	0	10469	3480	APPKBHCPPBBOIPCA
6	0	9140,5	2402	APBOPIPKPCBPABCH
7	0	8693	1531	PPPCBIKBOCPPHBAA
8	0	9926,1	1616	CCBPBAIHBABPOKPP
9	0	9243	2719	IPCOKACBBPPHPAPB
10	0	10076	898	BIPPPPOAHPKBCPBCA
11	0	9304	34	PABABPICHPCCKPPOB
12	0	8142	535	PBBKIOAAPCBHPCPP
13	1	9931	0	APKPOBIACPBBBCPHP
14	1	8794	0	IPCABOPHPKBBCPAP
15	0	9670,1	71	BPICPHCPBOAABKPP
16	0	10438,1	455	PHABBOCPBPCIPAPK
17	1	9191	0	HPCPBIBACPPPOKBP
18	0	9974	2985	IPBKCPPOPBABPPCAH
19	0	10040,1	1050	PPACPPHBPBPAOBCBK
20	0	9251,1	1000	ACPPBCBAPOPHKBPI
21	0	10468	661	PIBBPOAPKCAPBCHP
22	1	8610	0	BBPIKAPPCCPOAHBCP
23	0	10054	1754	HICAPBPPAPPBKOBK
24	0	10041,1	14	BBAIPPPACPBCHPOK
25	0	9530	3424	KPBCPPHBBPPCAAO

26	0	9934	161	BBAICBPPPAKPPHOC
27	0	9943	238	APPBOAPPBBIPCHCK
28	1	8626	0	BAPCKPPCIPPBAOHB
29	0	10240,1	641	PCAOBPHBIPCBPKPA
30	0	8551	86	HBCPAIPOPKBBPCPA
31	0	8004	6	CACBPPPBKPAIHPOB
32	0	10671,1	1015	BIOHCBAPPABPPCKP
33	1	8248	0	KPICPHACBOBBPPAP
34	0	8685	1520	BPAKIPBAPCCPOBPH
35	0	9113	2509	PHBOPKBPCAPCABPI
36	0	10018	418	IAKBPCPABBOPCHPP
37	0	10174	1870	CKOPICPPBPABBAHP
38	0	9947	942	KHPBPPCAPPIABCBO
39	0	8454	2119	BBIBAPPCPAHKCPPO
40	0	9919	781	PHIPBBPAAOBKCCPP
41	0	9091	195	BAPPOHPABIPCBPKC
42	0	8593	2833	ACPPCBOHIPKBBPPA
43	0	8841	2929	PPBPAHKOCBCBPIPA
44	0	9013	1333	COPBPAPIBPHBAKPC
45	0	9083	505	PBBAIPCPBKCOPPHA
46	0	9186	291	CBAHOIABBPKPCPPP
47	0	8933	3173	BOCPPPPBHIBKCPAA
48	1	9311	0	OAPPCHCIKPBBAPPB
49	0	9487	9	PCAKOBIBPAPBCPPH
Suma:		8		

Chromosom zwycięski o min T
(zaakceptowany):

33 8248 KPICPHACBOBBPPAP

Chromosom o max T:

32 10671,1 BIOHCBAPPABPPCKP

Oprogramowanie umożliwia analizę obciążenia poszczególnych maszyn pod kątem kolejności wykonywanych zleceń, czasów przestoju, obciążenia. Z drugiej strony możliwa

jest kontrola marszrut produkcyjnych sprzęgła i ich przebiegu przez kolejne maszyny wynikające z technologii produkcji.

Przykładowa analiza obciążenia maszyn wygląda następująco, gdzie T_{we}- czas wejścia – rozpoczęcia operacji danego sprzęgła, T_{wy}- czas wyjścia – zakończenia operacji na danym sprzęgle. przestój – czas oczekiwania sprzęgła na rozpoczęcie operacji na danej maszynie ze względu na jej obciążenie inną partią produkcyjną.

Analiza pokazuje obciążenie piły (PIL), 85, 95 – tokarek CNC z kooperacji – uwzględniono tylko obciążenie wynikające z analizowanych sprzęgła bez faktycznego obciążenia przez inne detale produkowane w kooperacji, wiertarki (FAZ)

maszyna PIL	Sprzegło	T _{we}	T _{wy}	T _{wy} -T _{we}	przestój
	K	0	8,3	8,3	0
	P	8,3	14,5	6,2	0
	I	14,5	22,8	8,3	0
	C	22,8	29	6,2	0
	P	29	35,2	6,2	0
	A	454	460,2	6,2	0
	C	460,2	464,3	4,1	0
	B	464,3	468,4	4,1	0
	B	799	805,2	6,2	0
	B	805,2	811,4	6,2	0
	P	811,4	817,6	6,2	0
	P	817,6	821,7	4,1	0
	A	821,7	826,85	5,15	0
	P	826,85	829,9	3,05	0

maszyna 85_	Sprzęgło	T _{we}	T _{wy}	T _{wy} -T _{we}	przestój
	I	22,8	303,8	281	0

maszyna 95_	Sprzęgło	T _{we}	T _{wy}	T _{wy} -T _{we}	przestój
	I	303,8	801,8	498	0

maszyna FAZ	Sprzęgło	T _{we}	T _{wy}	T _{wy} -T _{we}	przestój
	K	521,3	585,3	64	0
	K	585,3	649,3	64	0
	K	2257,3	2321,3	64	0
	P	769,5	815,5	46	0
	P	815,5	861,5	46	0
	P	2042	2088	46	0
	P	2940	2986	46	0
	I	862	926	64	60,2
	I	926	990	64	0
	I	2471	2535	64	0
	C	1512	1558	46	0
	C	2986	3032	46	16
	C	4710	4756	46	0
	P	1140	1186	46	0

P	1186	1232	46	0
P	3032	3078	46	20
P	4212	4258	46	0
C	3494	3522	28	0
C	4258	4286	28	47
C	5361	5389	28	0
B	1341	1369	28	0
B	1369	1397	28	0
B	3862	3890	28	0
B	4433	4461	28	0
B	2181	2227	46	0
B	2322	2368	46	95
B	5252	5298	46	0
B	5662	5708	46	0
B	3078	3124	46	57
B	3124	3170	46	0
B	6312	6358	46	0
B	6722	6768	46	0
P	1572,6	1618,6	46	0
P	1618,6	1664,6	46	0
P	4000	4046	46	0
P	5596	5642	46	0
P	1718	1746	28	0
P	1746	1774	28	0
P	4107	4135	28	0
P	5806	5834	28	0
P	1815,5	1834,5	19	0
P	1834,5	1853,5	19	0
P	4558	4577	19	0
P	6206	6225	19	0

Analiza obciążenia wszystkich wykorzystywanych maszyn znajduje się w załączniku 4 (*załącznik 4- Analiza obciążenia maszyn dla harmonogramu produkcji maszyn z wyjściowymi wielkościami partii*).

Podobna analiza wykonywana jest dla sprzęgła. Algorytm genetyczny umożliwia automatyczne ustalenie kolejności wykonywanych operacji. Dla każdego sprzęgła ustalony jest termin realizacji i całkowity czas trwania. Dla sprzęgła które nie mieszczą się w harmonogramie generowany jest raport określający czas opóźnień.

Poniżej dwa przykładowe sprzęgła K i P. Wszystkie analizowane sprzęgła dla jednej symulacji (16 zleceń) znajdują się w załączniku (*załącznik 5- Sprzęgła- obciążenie maszyn przez poszczególne sprzęgła*).

sprzęgło K	termin realizacji:	17280
	czas rozpoczęcia:	0
	czas zakończenia:	3714,4
	czas trwania:	3714,4

Maszyna	przestój	Twe	Twy	Twy-Twe
PIL		0	0	8,3
TZC		0	8,3	268,3
SV1		0	268,3	521,3
FAZ		0	521,3	585,3
M__		0	585,3	585,3
FAZ		0	585,3	649,3
BUA		0	649,3	917,3
	125	0	917,3	1091,3
LOZ		0	1091,3	1375,3
SLU		0	1375,3	1500,3
NH_		0	1500,3	1751,3
SV1		0	1751,3	2004,3
SV1		0	2004,3	2257,3
FAZ		0	2257,3	2321,3
	300	0	2321,3	2571,3
AVI		0	2571,3	2882,4
	310	0	2882,4	3104,4
	315	0	3104,4	3294,4
SLU		0	3294,4	3419,4
MPI		0	3419,4	3644,4
STI		0	3644,4	3714,4
KO_		0	3714,4	3714,4
---		0	3714,4	3714,4
---		0	3714,4	3714,4
---		0	3714,4	3714,4
---		0	3714,4	3714,4
---		0	3714,4	3714,4
---		0	3714,4	3714,4
---		0	3714,4	3714,4

sprzęgło P **termin realizacji: 19200**
czas rozpoczęcia: 8,3
czas zakończenia: 3855
czas trwania: 3846,7

Maszyna	przestój	Twe	Twy	Twy-Twe
PIL		0	8,3	14,5
SR_		0	14,5	159,5
TAE		0	159,5	529,5
WOT		0	529,5	769,5
FAZ		0	769,5	815,5
M__		0	815,5	815,5
FAZ		0	815,5	861,5
BUA		56,5	918	1105
	125	0	1105	1231
LOZ		145	1376	1577
LOZ		0	1577	1778
SLU		0	1778	1863
NH_		0	1863	2042
FAZ		0	2042	2088
BUA		0	2088	2275
TZC		0	2275	2485
TZC		0	2485	2695

BKR	0	2695	2940	245
FAZ	0	2940	2986	46
BUA	0	2986	3173	187
SV1	0	3173	3355	182
SLU	65	3420	3505	85
MPI	140	3645	3805	160
STI	0	3805	3855	50
KO_	0	3855	3855	0
---	0	3855	3855	0
---	0	3855	3855	0
---	0	3855	3855	0
---	0	3855	3855	0

4.4.2. Badania dla zmodyfikowanego harmonogramu – małe wielkości partii

a) wariant bez kumulacji wielkości partii

Kolejnym krokiem badań było przeprowadzenie symulacji dla nowych wielkości partii dla poszczególnych sprzęgieł. Założeniem nowych wielkości partii było przeprowadzenie symulacji pod indywidualne zamówienia klienta, dążąc do produkcji w mniejszych partiach.

Nowe wielkości partii dla poszczególnych sprzęgieł są następujące:

Sprzęgło A – 14 sztuk

Sprzęgło B – 8 sztuk

Sprzęgło C – 9 sztuk

Sprzęgło D – 15 sztuk

Sprzęgło E – 10 sztuk

Sprzęgło F – 10 sztuk

Sprzęgło G – 11 sztuk

Sprzęgło H – 11 sztuk

Sprzęgło I – 7 sztuk

Sprzęgło J – 13 sztuk

Sprzęgło K – 12 sztuk

Sprzęgło L – 7 sztuk

Sprzęgło M – 10 sztuk

Sprzęgło N – 13 sztuk

Sprzęgło O – 11 sztuk

Sprzęgło P – 12 sztuk

Terminy realizacji zleceń pozostają bez zmian, zmodyfikowana zostaje jedynie wielkość partii produkcyjnych.

W pierwszej symulacji program analizuje sekwencję 16-sprzęgieł bazowych, ustawionych kolejno wg sekwencji:

AAOPBBBPCABBAPKC

Jest to przypadek bez kumulacji zleceń, co oznacza, że operujemy krótkimi niezależnymi seriami produkcyjnymi na sprzęgła tego samego typu (pomimo tego, że występują kolejno: np. AA... BBB... BB) z możliwymi powtórzeniami w dalszej kolejności (np. AA....A...A). Wielkości partii wykorzystujemy takie jak obliczono powyżej.

Przeprowadzono dwie odrębne symulacje dla odrębnych zleceń z harmonogramu obejmujących po 16 zleceń (co było uwarunkowane ustaloną długością chromosomu)

Wszystkie szczegółowe dane (ilości i czasy realizacji) dotyczące tego chromosomu zawarte są plikach w katalogu: bez_kumulacji/chr_baza- załącznik 6. Czas realizacji takiej bazowej kombinacji wynosi 7198,5 [min]. Dla takiego zestawienia sprzęgieł, wykonano 7000 rekombinacji losowych (7 pokoleń po 1000 osobników) i uzyskano optymalną sekwencję – CAPOABBAABBCPPKB, dla której czas realizacji wynosi 6340 [min], co stanowi 12% zysk czasowy. Bez wątpienia układ uległ widocznej optymalizacji.

Szczegółowy skład chromosomu zwycięskiego pokazujący czas realizacji poszczególnych sprzęgieł na kolejnych maszynach na linii sprzęgieł i w kooperacji jest następujący:

sprzęgło: C

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: U,	czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: TBT,	czas tj: 9.30	czas tpz: 30
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: BRT,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: KAP,	czas tj: 24.40	czas tpz: 75
maszyna: DRR,	czas tj: 4.50	czas tpz: 60
maszyna: FYN,	czas tj: 28.10	czas tpz: 75

maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL,	czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: A

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: U,	czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: ROT,	czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: ROT,	czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: VAR,	czas tj: 3.70	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: UMA,	czas tj: 0.20	czas tpz: 5

sprzęgło: P

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SR,	czas tj: 4.50	czas tpz: 55
maszyna: TAE,	czas tj: 15.00	czas tpz: 70
maszyna: WOT,	czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110

maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BKR, czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO, czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: O

maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: FYN, czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: M, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: OHA, czas tj: 11.80	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH, czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: WOT, czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: FYN, czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: WOT, czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: KAP, czas tj: 24.40	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: HAU, czas tj: 6.80	czas tpz: 35
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO, czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: A

maszyna: PIL, czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ, czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: U, czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: ROT, czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: M, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ, czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH, czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: ROT, czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: VAR, czas tj: 3.70	czas tpz: 35
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30

maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: UMA, czas tj: 0.20	czas tpz: 5

sprzęgło: B

maszyna: PIL, czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ, czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: SUJ, czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: LOZ, czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MN, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: BKR, czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: AVI, czas tj: 9.37	czas tpz: 30
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: MH, czas tj: 6.00	czas tpz: 30
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL, czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: FYN, czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO, czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: B

maszyna: PIL, czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ, czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: SUJ, czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: LOZ, czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MN_, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: BKR, czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: AVI, czas tj: 9.37	czas tpz: 30

maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: MH, czas tj: 6.00	czas tpz: 30
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL, czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: FYN, czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO, czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: A

maszyna: PIL, czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ, czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: U, czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: ROT, czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: M, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ, czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH, czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: ROT, czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: VAR, czas tj: 3.70	czas tpz: 35
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: UMA, czas tj: 0.20	czas tpz: 5

sprzęgło: A

maszyna: PIL, czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ, czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: U, czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: ROT, czas tj: 6.20	czas tpz: 30

maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: ROT,	czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: VAR,	czas tj: 3.70	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: UMA,	czas tj: 0.20	czas tpz: 5

sprzęgło: B

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.0	czas tpz: 5
maszyna: MN,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: BKR,	czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: AVI,	czas tj: 9.37	czas tpz: 30
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: MH,	czas tj: 6.00	czas tpz: 30
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL,	czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: FYN,	czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: B

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MN,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: BKR,	czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: AVI,	czas tj: 9.37	czas tpz: 30
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: MH,	czas tj: 6.00	czas tpz: 30
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL,	czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: FYN,	czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: C

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: U,	czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: TBT,	czas tj: 9.30	czas tpz: 30
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: BRT,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: KAP,	czas tj: 24.40	czas tpz: 75
maszyna: DRR,	czas tj: 4.50	czas tpz: 60
maszyna: FYN,	czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL,	czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: P

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SR,	czas tj: 4.50	czas tpz: 55
maszyna: TAE,	czas tj: 15.00	czas tpz: 70
maszyna: WOT,	czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BKR,	czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: P

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SR,	czas tj: 4.50	czas tpz: 55
maszyna: TAE,	czas tj: 15.00	czas tpz: 70
maszyna: WOT,	czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BKR,	czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: K

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: 300,	czas tj: 7.00	czas tpz: 40
maszyna: AVI,	czas tj: 9.37	czas tpz: 30
maszyna: 310,	czas tj: 6.40	czas tpz: 30
maszyna: 315,	czas tj: 5.00	czas tpz: 40
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: B

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MN,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: BKR,	czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: AVI,	czas tj: 9.37	czas tpz: 30
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: MH,	czas tj: 6.00	czas tpz: 30
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL,	czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: FYN,	czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

Obciążenie maszyn, kolejność wykonywanych operacji na sprzęgłach oraz serie wygenerowanych chromosomów przedstawiają załączniki- zał 7 i zał.8 – sprzęgła – obciążenie maszyn przez sprzęgła dla zmniejszonych wielkości partii_chr_bazowy i chr_zwycięski, zał.9 – seria wygenerowanych chromosomów z chromosomem zwycięskim, zał.10 i zał.11- obciążenie maszyn przez sprzęgła dla chr_baza i chr_zwycięski oraz zał.12 i zał.13- graficzne obciążenie maszyn_chr_baza i chr_zwycięski

b) Wariant skumulowanych wielkości partii

W kroku drugim zanalizowano sekwencję bazową złożoną ponownie z 16 sprzęgieł, ale skumulowano zamówienia na kolejne sprzęgła tego samego typu. Wielkości partii kumulowano wtedy, gdy zlecenia tego samego typu następowały po sobie, lub na kolejnych pozycjach ale o podobnym terminie realizacji (maksymalna różnica pomiędzy terminami realizacji 2 dni robocze). Przyjęto zasadę, że nowe skumulowane zlecenie jest wykonywane w najkrótszym z częściowych czasów realizacji w harmonogramie. Zatem np. z kombinacji B1,B2,B3 powstaje nowa kombinacja B, gdzie :

ilość = suma ilości **B1+B2+B3**,

czas realizacji = najkrótszy czas realizacji z pośród **B1,B2,B3**.

W miejsce zwolnionych pól chromosomu wprowadzono fikcyjne “zerowe” sprzęgło Q (wszystkie tpz = tj = 0, czas realizacji maksymalny = 19.000 minut).

W takim chromosomie bazowym jest dalej 16 sprzęgieł, ale część z nich jest niefizyczna, co oznacza, że symulujemy skróconą sekwencję.

AQOPBQQPCABQQPKC => APBPCABPKC

Czas realizacji takiego wyjściowego chromosomu to 7220,375 [min]. Wszystkie dane związane z chromosomem bazowym przedstawia załącznik 11.

W dalszym kroku poddano rekombinacji losowej w/w chromosom celem optymalizacji czasu wykonania całości usługi. Znalezione chromosom optymalny QAABCQPPOCBQQQKP => AABCPPOCBKP ma czas realizacji: 6860,4 [min], co stanowi zysk rzędu 5% względem kombinacji wyjściowej. Optymalizacja jest zatem stosunkowo niewielka.

Skład chromosomu zwycięskiego jest następujący:

sprzęgło A

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: U,	czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: ROT,	czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: ROT,	czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: VAR,	czas tj: 3.70	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: UMA,	czas tj: 0.20	czas tpz: 5

sprzęgło A

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: U,	czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: ROT,	czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: M,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: ROT,	czas tj: 6.20	czas tpz: 30
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: VAR,	czas tj: 3.70	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30

maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO_, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: UMA, czas tj: 0.20	czas tpz: 5

sprzęgło B

maszyna: PIL, czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ, czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: SUJ, czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: LOZ, czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MN, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: BKR, czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: AVI, czas tj: 9.37	czas tpz: 30
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: MH, czas tj: 6.00	czas tpz: 30
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL, czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: FYN, czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO, czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: C

maszyna: PIL, czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: U, czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: TBT, czas tj: 9.30	czas tpz: 30
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: BRT, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25

maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: KAP,	czas tj: 24.40	czas tpz: 75
maszyna: DRR,	czas tj: 4.50	czas tpz: 60
maszyna: FYN,	czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL,	czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: P

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SR_,	czas tj: 4.50	czas tpz: 55
maszyna: TAE,	czas tj: 15.00	czas tpz: 70
maszyna: WOT,	czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH_,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BKR,	czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: P

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SR_,	czas tj: 4.50	czas tpz: 55
maszyna: TAE,	czas tj: 15.00	czas tpz: 70
maszyna: WOT,	czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35

maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH_, czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BKR, czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO_, czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: O

maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: FYN, czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: M_, czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: OHA, czas tj: 11.80	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH_, czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: TZC, czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: WOT, czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: 125, czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: FYN, czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: WOT, czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: KAP, czas tj: 24.40	czas tpz: 75
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: HAU, czas tj: 6.80	czas tpz: 35
maszyna: SLU, czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI, czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI, czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO_, czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: C

maszyna: PIL, czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: U_, czas tj: 6.00	czas tpz: 15
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: TBT, czas tj: 9.30	czas tpz: 30
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: BRT, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: FAZ, czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA, czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SV1, czas tj: 7.10	czas tpz: 40

maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: KAP,	czas tj: 24.40	czas tpz: 75
maszyna: DRR,	czas tj: 4.50	czas tpz: 60
maszyna: FYN,	czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL,	czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: B

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: SUJ,	czas tj: 19.00	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MN_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: BKR,	czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: AVI,	czas tj: 9.37	czas tpz: 30
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: MH_,	czas tj: 6.00	czas tpz: 30
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: PLL,	czas tj: 9.00	czas tpz: 60
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: FYN,	czas tj: 28.10	czas tpz: 75
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło: K

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30

maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH_,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: 300,	czas tj: 7.00	czas tpz: 40
maszyna: AVI,	czas tj: 9.37	czas tpz: 30
maszyna: 310,	czas tj: 6.40	czas tpz: 30
maszyna: 315,	czas tj: 5.00	czas tpz: 40
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

sprzęgło P

maszyna: PIL,	czas tj: 0.21	czas tpz: 2
maszyna: SR_,	czas tj: 4.50	czas tpz: 55
maszyna: TAE,	czas tj: 15.00	czas tpz: 70
maszyna: WOT,	czas tj: 9.50	czas tpz: 50
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: M_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: 125,	czas tj: 4.80	czas tpz: 30
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: LOZ,	czas tj: 8.30	czas tpz: 35
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: NH_,	czas tj: 7.20	czas tpz: 35
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: TZC,	czas tj: 5.00	czas tpz: 110
maszyna: BKR,	czas tj: 11.00	czas tpz: 25
maszyna: FAZ,	czas tj: 1.80	czas tpz: 10
maszyna: BUA,	czas tj: 8.10	czas tpz: 25
maszyna: SV1,	czas tj: 7.10	czas tpz: 40
maszyna: SLU,	czas tj: 4.00	czas tpz: 5
maszyna: MPI,	czas tj: 6.50	czas tpz: 30
maszyna: STI,	czas tj: 2.00	czas tpz: 10
maszyna: KO_,	czas tj: 0.00	czas tpz: 0

Obciążenie maszyn wg sprzęgieł, kolejność realizacji sprzęgieł na poszczególnych maszynach, serie wygenerowanych chromosomów z chromosomem zwycięskim i obciążenie maszyn w analizowanym okresie czasu dla chromosomu bazowego i zwycięskiego ukazują załączniki 14-20.

Mniejsze wielkości partii a tym samym krótsze sekwencje produkcji sprzęgieł tego samego typu lepiej się optymalizują ze względu na funkcję celu czyli minimalny czas realizacji

całości produkcji i pozwalają zoptymalizować nie tylko całkowity cykl produkcji jak i obciążenie maszyn i ich przestoje.

Optymalne sekwencje nie konieczne układają się w ciągi A,A,A, ale rozkładają się losowo pomiędzy innymi zleceniami: zmniejszenie cyklu produkcyjnego wynikająca z pozbycia się czasu przebrojenia jest znikoma (de facto oznacza jedynie zaoszczędzenie pracy mechanika obsługującego stanowisko, ale nie skrócenie czasu realizacji całości).

Skumulowane wielkości partii duże zlecenia (A+A, B+B+B, P+P) wyraźnie źle się układają w optymalne sekwencje. Wynika to z blokady maszyn w cyklu “na dłuższy czas” i konieczność oczekiwania na zwolnienie maszyn przez inne sprzęgła w kolejce. W związku z tym wzrasta czas związany z przestojami na maszynach a tym samym rośnie poziom zapasów robót w toku. Skumulowane wielkości partii spełniają w bardzo małym stopniu kryterium celu (harmonogram produkcji i ustalone w nim terminy realizacji zleceń), tylko 21 % w stosunku do 30 % przy mniejszych sekwencjach. Produkcja małymi seriami (mniejszymi wielkościami partii) wydaje się zatem bardziej optymalna.

c) inna sekwencja zleceń produkcyjnych z harmonogramu – małe wielkości partii

Kolejne badania przy wykorzystaniu modelu przeprowadzono dla innej sekwencji produkcji i zleceń produkcyjnych dla małych wielkości partii produkcyjnych. Przeprowadzono eksperyment zarówno dla wyjściowych wielkości partii i jak partii skumulowanych tworzonych na takich samych zasadach jak powyżej.

Wybraną sekwencją bazową była:

a) bez kumulacji:

- sprzęgła: M, P, P, H, I, H, I, D, I, P, E, I, K, I, P, P
- ilości: 10,12,12,11,7,11,7,15,7,12,10,7,12,7,12,12
- czasy z harmonogramu (całkowite cykle wykonania poszczególnych detali) [min]:
5760,5760,5760,5760,5760,5760,5760,6720,6720,7680,7680,7680,9600,9600,9600,9600;

b) z kumulacją:

- sprzęgła: M, P, H, I, D, P, E, K, P (w programie: MPQHIIQQDQPEQKQPQ)
- ilości (skumulowane): 10,24,22,35,15,12,10,12,24

- czasy z harmonogramu (całkowite cykle wykonania poszczególnych detali) [min]:
5760,5760,5760,5760,6720,7680,7680,9600,9600

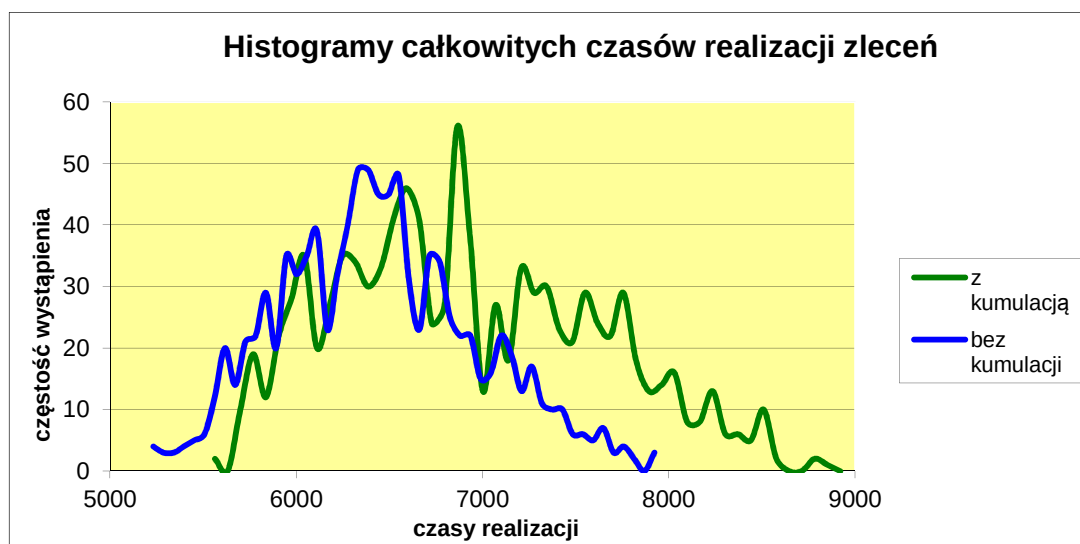
Jak widać w przypadku skumulowanych wielkości partii zmniejszyła się liczba zleceń i wprowadzono do sekwencji produkcji fikcyjne zlecenia Q konieczne ze względu na ustalone założenia modelu. Ich czas jest zerowy więc nie wpływają na całkowitą długość trwania cyklu produkcyjnego.

W przypadku bez kumulacji mamy $16! = 20\,922\,789\,888\,000$ potencjalnych kombinacji (przestrzeń optymalizacji), z kumulacją mamy tylko $9! = 362\,880$ kombinacji (stosunek $16!/9! = 100$ mln, co oznacza nieporównywalnie większa przestrzeń możliwych rozwiązań.

Przypadek bez kumulacji optymalizuje się lepiej:

- ma mniejszy rozrzut wyników (czasów dla losowych chromosomów),
- niższą wartość średnią czasu realizacji,
- mniejsze odchylenie standardowe w/w,
- daje lepszą redukcję czasu wzgl. chromosomu bazowego (wiele zależy od tego, jak zostanie on skonstruowany).

Częstotliwość pojawiania się o wyższych czasach realizacji jest znacznie większa w przypadku modelu z kumulacją partii produkcyjnych. Dla mniejszych wielkości partii całkowita długotrwałość jest znacznie krótsza, co widać na histogramie (wykres



Rys. 13. Histogramy całkowitych czasów realizacji zleceń dla małych wielkości partii z kumulacją i bez kumulacji
Źródło: Opracowanie własne

Tabela 14 ukazuje częstotliwość występowania chromosomów z poszczególnymi czasami realizacji.

Tab. 14. Porównanie częstotliwości występowanie wybranych czasów realizacji dla przypadku z kumulacją partii produkcyjnych i bez kumulacji

Przypadek bez kumulacji		Przypadek z kumulacją	
Czas realizacji	Częstotliwość występowania	Czas realizacji	Częstotliwość występowania
5562,763	2	5232,459	4
5631,289	0	5287,377	3
5699,815	10	5342,295	3
5768,341	19	5397,213	4
5836,867	12	5452,131	5
5905,393	22	5507,049	6
5973,919	28	5561,967	12
6042,445	35	5616,885	20
6110,971	20	5671,803	14
6179,497	27	5726,721	21
6248,023	35	5781,639	22
6316,549	34	5836,557	29
6385,075	30	5891,475	20
6453,601	33	5946,393	35
6522,127	41	6001,311	32
6590,653	46	6056,229	35
6659,179	41	6111,147	39
6727,705	24	6166,065	23
6796,231	27	6220,983	32
6864,757	56	6275,901	40
6933,283	38	6330,819	49
7001,809	13	6385,737	49
7070,335	27	6440,655	45
7138,861	18	6495,573	45
7207,387	33	6550,491	48
7275,913	29	6605,409	31
7344,439	30	6660,327	23
7412,965	23	6715,245	35
7481,491	21	6770,163	34
7550,017	29	6825,081	25
7618,543	24	6879,999	22
7687,069	22	6934,917	22
7755,595	29	6989,835	15
7824,121	18	7044,753	16
7892,647	13	7099,671	22
7961,173	14	7154,589	19
8029,699	16	7209,507	13

8098,225	8	7264,425	17
8166,751	8	7319,343	11
8235,276	13	7374,261	10
8303,803	6	7429,179	10
8372,329	6	7484,097	6
8440,854	5	7539,015	6
8509,381	10	7593,933	5
8577,906	2	7648,851	7
8646,433	0	7703,769	3
8714,959	0	7758,687	4
8783,484	2	7813,605	2
8852,011	1	7868,523	0
8920,537	0	7923,441	3

Źródło: Opracowanie własne

Wyniki badań z kumulacją i bez kumulacji pokazujące kolejność wykonywanych zleceń, obciążenie maszyn i znajdują się w pliku_wyniki2- załącznik 21.

4.5. Analiza otrzymanych wyników i proponowane kierunki rozwoju metody

W celu porównania otrzymanych wyników wygenerowanych dla harmonogramu dla wyjściowych wielkości partii, zmniejszonych wielkości partii z kumulacją i bez porównano zmiany w obrębie czasów trwania poszczególnych zleceń, przestojów dla sprzęgół i maszyn produkcyjnych.

W tabeli 15 ukazano czasy trwania i przestoje dla analizowanych zleceń produkcyjnych wykorzystujących dane z pierwotnego harmonogramu produkcji. Sumaryczny czas przestojów wyniósł 37 633,85 minut.

Tab. 15. Czasy trwania i przestoje dla harmonogramu z wyjściowymi wielkościami partii

sprzęgło	termin realizacji (min)	czas trwania (min)	prześtój (min)
K	17280	3 714,40	0,00
P	19200	3 846,70	406,50
I	19200	3 436,50	406,20
C	15360	5 268,20	1 376,00
P	19200	4 893,00	1 452,80
H	19200	5 373,30	1 514,80
A	5760	5 145,00	1 173,80

C	18240	5 248,80	2 956,70
B	15360	5 422,70	2 874,90
O	7680	6 582,60	3 688,60
B	16320	6 432,00	2 023,40
B	9600	7 442,80	3 034,20
P	7680	6 579,60	3 139,40
P	17280	6 653,40	4 552,30
A	15360	68 836,00	3 599,15
P	15360	6 866,65	5 435,10
suma			37 633,85

Źródło: Opracowanie własne

Czasy przestojów na maszynach wahały się w przedziale od 0- 10 180,7 minut. Przy czym na 33 maszynach odnotowano czas przestoju 0. Przy czym należy zaznaczyć że w badaniach nie uwzględniamy produkcji wynikającej z kooperacji, która bez wątpienia zmodyfikowałaby istniejące czasy przestojów.

Tab. 16. Przestoje na maszynach dla analizy wykonanej dla harmonogramu z wyjściowymi wielkościami partii

maszyna (przyjęty symbol)	prześtój (min)
PIL	0,00
85	0,00
95	0,00
FAZ	295,20
M_	0,00
BUA	5 739,40
125	242,50
LOZ	7 100,30
LO2	0,00
SLU	1 895,00
FAZ	0,00
SV1	10 180,70
SLU	0,00
MPI	987,00
STI	0,00
KO_	0,00
SUJ	4 512,15
TZC	3 916,90
NH_	161,50
ROT	0,00
VAR	0,00
AVI	0,00
GD_	0,00
U_	0,00
NOR	0,00

FYN	1 126,00
TAE	907,50
SR_	499,20
TBT	0,00
KAP	30,00
OFA	0,00
MN	0,00
PLL	0,00
WOT	0,00
BRT	0,00
BKR	0,00
HAU	0,00
UMA	0,00
DRR	0,00
OHA	0,00
MH_	0,00
285	0,00
120	0,00
300	0,00
315	0,00
310	0,00
DAI	0,00
SUMA	37 593,35

Źródło: Opracowanie własne

Spośród 16 zleceń produkcyjnych u 8 z nich spadł czas trwania w wyniku przeprowadzonej optymalizacji i czas przestojów. Sumaryczny czas trwania przestojów dla wszystkich zleceń produkcyjnych zmalał o 5 753,01 min, co stanowiło spadek 16,13%.

Zmiany w różnicach przestojów dla poszczególnych sprzęgieł ukazuje wykres 1.

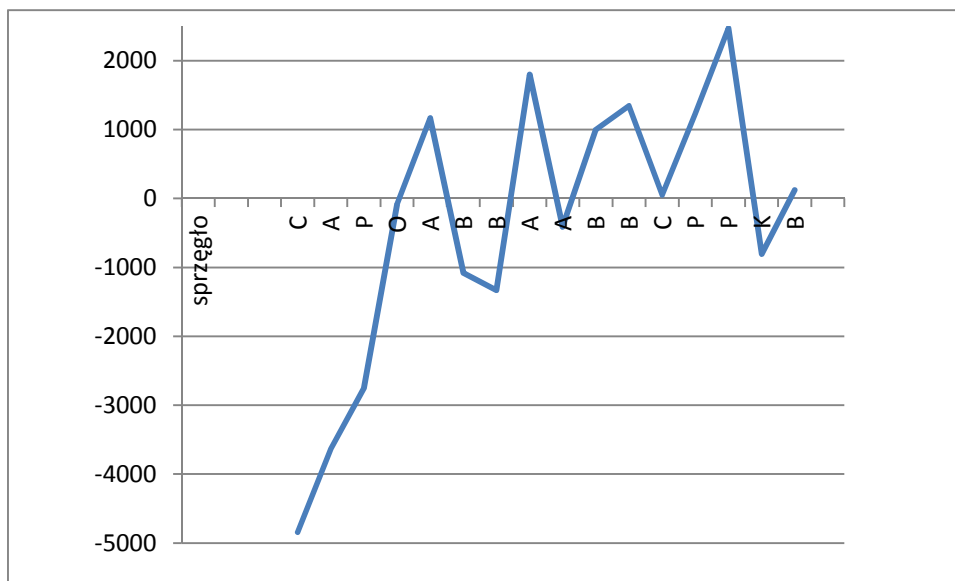
W porównaniu z harmonogramem dla większych wielkości partii sumaryczny czas przestojów spadł o 7 720,52 minuty co stanowiło spadek o 20,51 punktu procentowego. Wyniki przedstawia tabela 17.

Tab. 17. Czasy trwania i przestoje dla harmonogramu ze zmniejszonymi wielkościami partii_chromosom bazowy i zwycięski

lp.	sprzęgło	termin realizacji	zwycięski		bazowy		różnica w czasie trwania (bazowy-zwycięski)	różnica w przestojach (bazowy-zwycięski)
			czas trwania	przerwa	czas trwania	przerwa		
		(min)	(min)	(min)	(min)	(min)		
1	C	18 240	2 132,09	0	6 973,47	4 841,38	-4 841,38	-4 841,38
2	A	16 320	3 151,91	60,97	6 782,65	3 691,71	-3 630,74	-3 630,74
3	P	17 280	2 739,37	370,45	5 493,11	3 124,19	-2 753,74	-2 753,74
4	O	7 680	3 416,95	330,05	3 493,62	406,72	-76,67	-76,67
5	A	5 760	4 258,45	1 167,51	3 090,40	0	1 168,05	1 167,51
6	B	15 360	3 323,71	1 148,07	4 404,24	2 228,60	-1 080,53	-1 080,53
7	B	16 320	3 798,23	1 622,59	5 130,21	2 954,57	-1 331,98	-1 331,98
8	A	6 720	5 439,35	2 348,41	3 640,86	549,92	1 798,49	1 798,49
9	A	15 360	5 829,01	2738,07	6 239,95	3 149,01	-410,94	-410,94
10	B	9 600	4 527,47	2 351,83	3 528,60	1 352,96	998,87	998,87
11	B	9 600	5 091,99	2 916,35	3 748,12	1 572,48	1 343,87	1 343,87
12	C	15 360	3 018,61	886,52	2 967,54	835,45	51,07	51,07
13	P	15 360	5 201,22	2 832,30	3 975,56	1 606,64	1 225,66	1 225,66
14	P	7 680	6 123,70	3 754,78	3 651,12	1 282,20	2 472,58	2 472,58
15	K	17 280	5 506,18	3 674,22	6 314,39	4 482,43	-808,21	-808,21
16	B	16 320	5 886,86	3 711,22	5 763,73	3 588,09	123,13	123,13
SUMA				29 913,34		35 666,35		

Źródło: Opracowanie własne

Wykres 1. Zmiany czasów przestoju dla poszczególnych sprzęgieł



Źródło: Opracowanie własne

Porównując harmonogram dla wyjściowych wielkości z partii bazujących na normatywach stałych wielkości partii a zmniejszonych wielkości partii uwzględniających zamówienia klientów można zaobserwować spadek sumy czasów przestojów o 4 147,8 min dla chromosomu bazowego bez kumulacji, 7 680,01 min dla chromosomu zwycięskiego bez kumulacji, 22 089,76 min dla chromosomu bazowego z kumulacjami, 20 656,99 min dla chromosomu zwycięskiego z kumulacjami. (patrz tab.18)

Zmiany w różnicach pomiędzy chromosomem bazowym a zwycięskim dla przypadku z kumulacją wielkości partii i bez kumulacji ukazuje wykres 2.

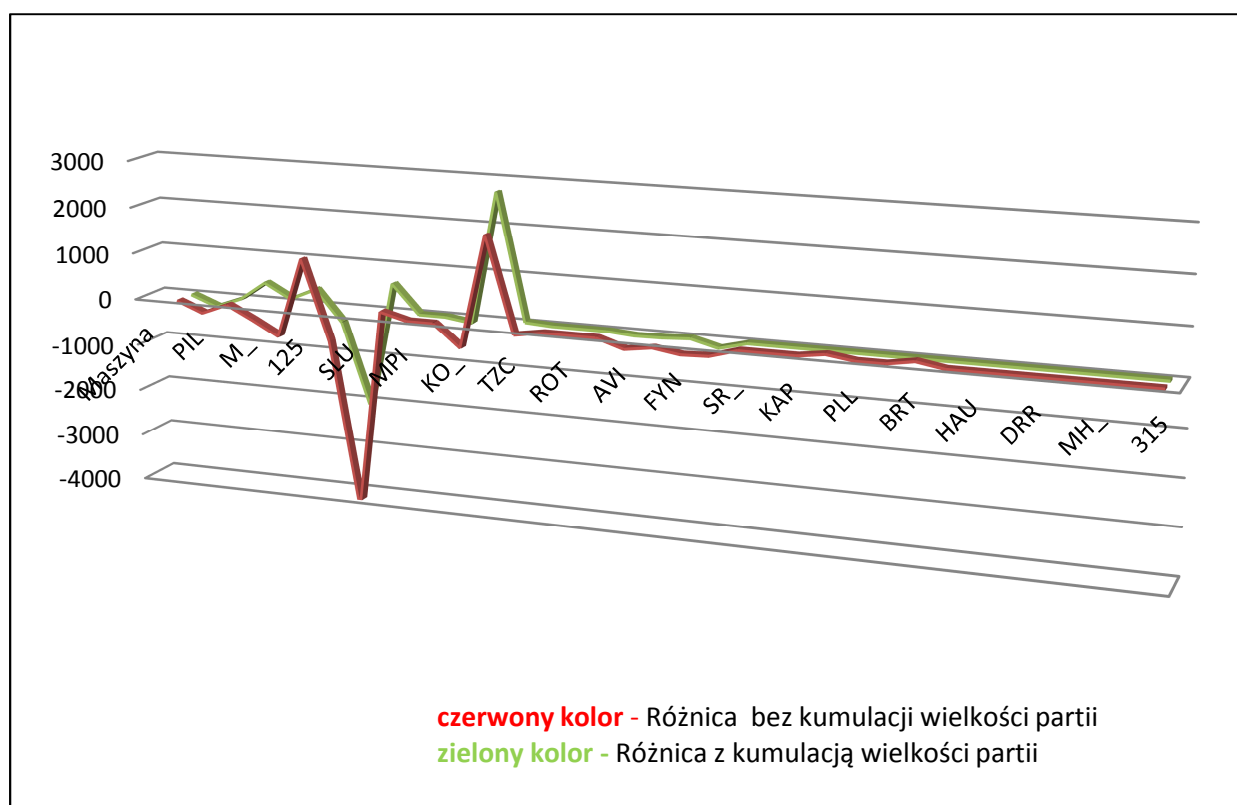
Tab. 18. Przestoje na maszynach dla analizy wykonanej dla harmonogramu z mniejszymi wielkościami partii bez kumulacji i z kumulacją_chromosom bazowy i zwycięski

	Bez kumulacji wielkości partii			Z kumulacją wielkości partii		
Maszyna	Przestój dla chromosomu bazowego	Przestój dla chromosomu zwycięskiego	Różnica	Przestój dla chromosomu bazowego	Przestój dla chromosomu zwycięskiego	Różnica
	(min)	(min)		(min)	(min)	
PIL	0	0	0	0	0	0
FAZ	303	80	-223	238	24,8	-213,2
M_	0	0	0	0	0	0
BUA	4 858,10	4 578,45	-279,65	2 657,50	3 054,69	397,19
125	1 113,50	532,7	-580,8	371,10	467,90	96,8
LOZ	0	1 123,20	1123,2	525,80	874,80	349

SLU	1 338,74	754,57	-584,17	669,52	357,51	-312,01
SV1	8 197,13	4 025,23	-4171,9	4 551,23	2 505,45	-2045,78
MPI	467,96	614	146,04	35,90	644,00	608,1
STI	0	0	0	0,00	0,00	0
KO_	0	0	0	0,00	0,00	0
SUJ	11 051,34	10 581,85	-469,49	3 704,74	3 627,46	-77,28
TZC	5 038,07	6 976,86	1938,79	1 397,39	4 116,70	2719,31
NH_	94,4	3,1	-91,3	69,00	103,80	34,8
ROT	0	0	0	0,00	0,00	0
VAR	0	0	0	0,00	0,00	0
AVI	0	0	0	0,00	0,00	0
U_	180,98	0	-180,98	42,98	0,00	-42,98
FYN	98	0	-98	34,00	0,00	-34
TAE	423	235,7	-187,3	423,00	423,00	0
SR_	271,43	105,18	-166,25	283,43	136,25	-147,18
TBT	0	0	0	0,00	0,00	0
KAP	0	0	0	0,00	0,00	0
MN	0	0	0	0,00	0,00	0
PLL	9,9	92,9	83	0,00	0,00	0
WOT	0	0	0	0,00	0,00	0
BRT	0	0	0	0,00	0,00	0
BKR	110,8	209,6	98,8	0,00	0,00	0
HAU	0	0	0	0,00	0,00	0
UMA	0	0	0	0,00	0,00	0
DRR	0	0	0	0,00	0,00	0
OHA	0	0	0	0,00	0,00	0
MH_	0	0	0	0,00	0,00	0
300	0	0	0	0,00	0,00	0
315	0	0	0	0,00	0,00	0
310	0	0	0	0,00	0,00	0
suma	33 445,55	29 913,34	- 3532,21	15 503,59	16 936,36	1432,77

Źródło: Opracowanie własne

Wykres 2. Zmiany w różnicach pomiędzy chromosomem bazowym i zwycięskim dla czasów przestoju



Źródło: Opracowanie własne

W przypadku badań przeprowadzonych dla harmonogramu dla małych wielkości partii bez kumulacji na 11 maszynach spadła wielkość całkowita przestoju. Sumaryczny spadek czasów przestoju na tych maszynach wyniósł 7 032,84 min. Z kolei na 5 maszynach czas przestoju wzrósł i ich suma wynosiła 3389,83 min.

Dla skumulowanych wielkości partii znacznie spadł całkowity czas przestoju na analizowanych maszynach. Ilościowo spadek wyniósł 17 941,96 dla chromosomu bazowego i 12 976,98 dla chromosomów zwycięskich. Procentowo był to spadek o 53,65% i 43,48%.

Przestoje to norma dla dalszych sprzęgieł w chromosomie, ponieważ mają już wyznaczony cykl produkcji poprzednich sprzęgieł więc czekają na zwolnienie stanowiska roboczego. Porównując obciążenia maszyn widać, iż zajętość maszyn ulega optymalizacji dla zwycięskich chromosomów zarówno dla wyjściowych wielkości partii jak i mniejszych wielkości partii. Przy czym dla przypadku bez kumulacji zleceń i uruchamiania małych wielkości partii analizowana linia produkcyjna i stanowiska produkcyjne są najlepiej zbilansowane.

Opracowany model umożliwia sterowanie przepływem produkcji, którego głównym celem jest wyprodukowanie wyrobów w ilościach i terminach określonych w planie przy zapewnieniu ciągłego przepływu.

Zakończenie

Jednym z ważniejszych problemów wyłaniających się w obszarze planowania operacyjnego jest problem określania wielkości partii oraz problem harmonogramowania produkcji. Zadaniem harmonogramowania jest określenie terminów realizacji produkcji uwzględniając terminy poszczególnych zadań równocześnie odpowiednio bilansując istniejące zdolności produkcyjne. Z kolei odpowiednio przyjęta wielkość partii produkcyjnej dla produkowanych detali pozwala zminimalizować zapasy robót w toku, usprawnić przepływ materiałów i zagwarantować efektywny przebieg produkcji, której celem jest przede wszystkim realizacja zleceń klientów na czas oraz minimalizacja całkowitego cyklu i kosztów.

Praca zajmuje się rozwiązywaniem problemu optymalnego harmonogramowania produkcji oraz określania wielkości partii w przedsiębiorstwie produkcyjnym posiadającym zmienny asortyment produkowanych wyrobów gotowych.

Celem niniejszej pracy było opracowanie metody harmonogramowania produkcji i optymalizowania wielkości partii produkcyjnych, która pozwoli wykonywać to zadanie efektywnie dla warunków otoczenia zmiennego i dynamicznego, przy znacznie mniejszej ilości danych wejściowych i nakładzie czasu. Prowadzone badania potwierdzają, że stosowanie algorytmów genetycznych jest zasadne i efektywne dla problemu harmonogramowania produkcji i określania wielkości partii.

Algorytm genetyczny umożliwia szybkie wygenerowanie rozwiązań dopuszczalnych określając terminy realizacji zleceń bilansując linię produkcyjną określając obciążenia maszyn na linii sprzęgieł i maszyn z kooperacji.

Wykorzystanie opracowanego modelu bazującego na algorytmie genetycznym do harmonogramowania produkcji i optymalizacji wielkości partii produkcyjnej pozwala szybko i sprawnie wygenerować harmonogram produkcji, ustalić sekwencję zleceń i obciążenie stanowisk roboczych w taki sposób, aby całkowity cykl produkcji był zminimalizowany, przestoje na maszynach w miarę możliwości wyeliminowane a obciążenie maszyn zwiększone. Stanowi to znaczną wartość dodaną w stosunku do tradycyjnych metod harmonogramowania produkcji bazujących na doświadczeniu planistów oraz narzędziach bez możliwości dynamicznej optymalizacji z punktu widzenia ustalonej funkcji celu jak MS Excel, MS Project.

Opracowany model liczy jeden chromosom od 1 min do 5 min. Tak więc symulacja 7000 chromosomów to około 6000 minut = 100h pracy komputera. Istnieje możliwość przeprowadzenia obliczeń na klastrze i zredukowania czasu obliczeń około trzydziestukrotnie.

Przeprowadzenie symulacji przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego umożliwia analizę maszyn wykorzystywanych w procesie produkcji kolejnych sprzęgieł wynikających ze zleceń produkcyjnych zawartych w harmonogramie produkcji. Oprócz tego przeprowadzana jest analiza obciążenia wszystkich maszyn wykorzystywanych w produkcji (zarówno na analizowanej linii sprzęgieł jak i maszyn z kooperacji). Harmonogram obciążenia maszyn zawarty w załączniku w Excelu pokazuje obciążenia wszystkich maszyn (na osi x kolejne maszyny zgodnie z harmonogramem produkcji) z dokładnością minutową. Można zauważyć płynne przechodzenie sprzęgieł pomiędzy stanowiskami roboczymi. Najważniejsze, że model gwarantuje, iż nie dojdzie do nałożeń pracy maszyn w produkcji różnych sprzęgieł.

Proces produkcji ulega przesunięciu, gdy kolejna maszyna zgodnie z marszrutą produkcyjną jest zajęta. Okres oczekiwania jest generowany w formie raportu i informacji zawartych pod parametrem przestój. Przestoje to norma dla dalszych sprzęgieł w chromosomie (one mają już wyznaczony cykl produkcji poprzednich sprzęgieł więc czekają na wolne urządzenia). W konsekwencji globalny czas realizacji danej sekwencji jest uzależniony od: czasów wynikających z technologii – czas przezbierania, czas jednostkowy; wielkości produkowanych partii produkcyjnych i istniejących przestojów na linii produkcyjnej.

Wszystkie szczegółowe dane (ilości i czasy realizacji) dotyczące chromosomów zawarte są w plikach w załącznikach. Przeprowadzone badania wykonywano dla około 7000 rekombinacji losowych (7 pokoleń po 1000 osobników) i w rezultacie uzyskiwano optymalną sekwencję.

Można śmiało stwierdzić, że układ uległ widocznej optymalizacji. Przeprowadzone badania udowadniają, iż produkcja małymi seriami wydaje się bardziej optymalna. Krótkie sekwencje produkcji sprzęgieł tego samego typu lepiej się optymalizują ze względu na funkcję celu - czyli minimalny całkowity czas realizacji produkcji. Optymalne sekwencje nie koniecznie układają się w ciągi A,A,A, (produkcja tych samych typów sprzęgieł po sobie), ale rozkładają się losowo pomiędzy innymi zleceniami. Zysk z pozbycia się czasu przezbierania jest znikomy. Zysk czasu w sekwencji A,A to skrócenie czasu takiej pary jedynie o ostatni tpr z cyklu produkcji (sprzęgło A(1) produkowane jest w czasie obejmującym wszystkie tpr i tj, a gdy ostatnia maszyna kończy produkcję sprzęgła A(1) wykonywane jest natychmiast

zlecenie a $A(2)$, bez ostatniego tpz-u, co stanowi jedyny zysk z takiej sekwencji. Skumulowane-duże zlecenia ($A+A$, $B+B+B$, $P+P$) wyraźnie gorzej się układają w optymalne sekwencje. Wynika to z blokady maszyn w cyklu “na dłuższy czas” i konieczność oczekiwania na zwolnienie maszyn przez inne sprzęgła w kolejce. Wydłużenie czasów przestoju wpływa na zwiększanie wartości funkcji celu. Skumulowane duże zlecenia spełniają w bardzo małym stopniu kryterium celu - tylko 21 % zleceń uzyskuje akceptację ze względu na ustalony termin realizacji wynikający z harmonogramu. Dla pozostałych mamy do czynienia z opóźnieniami i koniecznością negocjowania nowych terminów realizacji bądź wycofywania zleceń z harmonogramu produkcji.

Przypadek bez kumulacji zleceń produkcyjnych optymalizuje się lepiej:

- ma mniejszy rozrzut wyników (czasów dla losowych chromosomów),
- niższą wartość średnią czasu realizacji,
- mniejsze odchylenie standardowe w/w,
- daje lepszą redukcję czasu wzgl. chromosomu bazowego (wiele zależy od tego, jak zostanie on konstruowany).

Opracowana metodyka posiada kilka uproszczeń i ograniczeń ze względu na złożoność obliczeniową i skalę opracowywanego problemu odnoszące się do ilości rozpatrywanych zleceń podczas jednej symulacji, rozpatrywanego horyzontu planistycznego, przyjętych czasów technologicznych wynikających z marszrut produkcyjnych. Jednakże istnieje możliwość modyfikacji istniejącego modelu i bazowanie na dynamicznej tablicy umożliwiającej swobodę wyboru zleceń produkcyjnych oraz ich marszrut produkcyjnych i wielkości partii bez konieczności ręcznej modyfikacji ustawień programowych w modelu.

Dalsze prace powinny iść w kierunku rozbudowania istniejącego modelu i jego parametrów wejściowych wpisując je w dynamiczną tablicę. Podczas operowania na dynamicznych strukturach danych może okazać się, że taką strukturę należy zwiększyć lub zmniejszyć w czasie działania programu. Będzie można wówczas dynamicznie zmienić rozmiar struktury uwzględniając zmienną ilość zleceń produkcyjnych w jednej symulacji, na bieżąco w sposób zintegrowany aktualizować technologię produkcji i przeprowadzać analizę scenariuszy wprowadzając nowe maszyny, nowe zlecenia produkcyjne i modyfikując wielkości partii i terminy realizacji oraz uwzględniając wielopoziomową strukturę wyrobów i wieloetapowe planowanie produkcji.

W procedurach planowania i sterowania produkcją można korzystać z wielu różnorodnych metod optymalizacyjnych. Metody te wykazują różnorodność w zakresie

złożoności, pracochłonności i generowanych wyników. Efektywność uzyskanych wyników powinna być oparta o analizę wielokryterialną uwzględniającą nie tylko ustaloną funkcję celu ale również kryteria kosztowe, poziom zapasów robót w toku. W tym kierunku również będą prowadzone kolejne badania w ramach harmonogramowania produkcji i określania wielkości partii.

Opracowany model może być również w przyszłości odpowiednio zaadaptowany dla innych rzeczywistych warunków produkcyjnych umożliwiając wygenerowanie harmonogramu produkcji i optymalizację wielkości produkcji. Konieczna będzie aktualizacja baz danych zawierających parametry wejściowe i uwzględnienie ograniczeń wynikających z nowego środowiska produkcyjnego. Bez wątpienia jest to pomocne narzędzie dla efektywnego planowania produkcji dla dużej liczby zleceń produkcyjnych, zmiennego asortymentu produkcji przy konieczności minimalizacji wąskich gardeł produkcyjnych, minimalizacji zapasów robót w toku oraz uwzględnienia różnorodnych ograniczeń czasowych, kosztowych i zasobowych.

Model mógłby być zaimplementowany i zintegrowany z istniejącymi systemami klasy MRPII/ERP w przedsiębiorstwach produkcyjnych generując optymalne harmonogramy produkcji i optymalizując wielkość produkcji ze względu na ustaloną funkcję celu.

Bazując na opracowanym modelu możliwa jest płynna produkcja w całym łańcuchu logistycznym produkcji, której warunkiem jest synchronizacja produkcji i dostaw zasilających linię wyrobu finalnego oraz produkcja w małych partiach, a także szybkie przebrojenia. W efekcie płynnej produkcji jest możliwa redukcja strat spowodowanych nadmiernymi zapasami oraz możliwość szybkiej reakcji na zmiany w popycie. Pojedyncza linia będzie mogła produkować każdego dnia wiele różnych wyrobów z danej rodziny i zaspokajać popyt rynku z produkcji, a nie z zapasów.

Spis rysunków

Rys. 2. Przepływ jednej sztuki (one piece flow)	36
Rys. 3. Etapy SMED dla szybkiej zmiany oprzyrządowania	37
Rys. 4. Integracja określania wielkości partii i sekwencjonowania	48
Rys. 5. Schemat prostego algorytmu genetycznego według J. Hollanda	54
Rys. 6. Ogólny schemat algorytmu genetycznego	55
Rys. 7. Selekcja ruletkowa (proporcjonalna)	61
Rys. 8. Rozmnażanie przez krzyżowanie jednopunktowe	63
Rys. 9. Rozmnażanie przez mutację	65
Rys. 10. Zróżnicowanie problemów określania wielkości partii	69
Rys. 11. Schemat linii produkcyjnej 1431	106
Rys. 12. Diagram Ishikawy- problemy na linii sprzęgieł	107
Rys. 13. Histogramy całkowitych czasów realizacji zleceń dla małych wielkości partii z kumulacją i bez	158

Spis tabel

Tab. 1. Porównanie algorytmów określania wielkości partii dla konkretnych danych wejściowych ..	26
Tab. 2. Skutki zmniejszania czasu przeobrażania na środowiska Make-To-Order (MTO) i Make-To-Stock (MTS)	40
Tab. 3. Podział heurystyk ze względu na rozważany problem, zastosowaną metodę, zmienną decyzyjną, ograniczenia i funkcję celu	80
Tab. 4. Zestawienie prac omawiających wykorzystanie algorytmów genetycznych w problematyce określania wielkości partii	91
Tab. 5. Porównanie modeli wykorzystujących algorytmy genetyczne w obszarze harmonogramowania i określania wielkości partii	94
Tab. 6. Stanowiska produkcyjne na badanej linii produkcyjnej	105
Tab. 7. Wielkości partii produkcyjnych dla analizowanych sprzęgieł	108
Tab. 8. Prognozy sprzedaży sprzęgieł na rok 2009	109
Tab. 9. Prognoza sprzedaży sprzęgieł od stycznia do sierpnia na rok 2010	111
Tab. 10. Średnie czasy przebrojeń (setup'y) dla wybranych maszyn	113
Tab. 11. Klasyfikacja sprzęgieł wg rodzin produktów	115
Tab. 12. Technologie produkcji sprzęgieł w wybranych rodzinach	118
Tab. 13. Technologia produkcji sprzęgła PN 3008778	121
Tab. 14. Porównanie częstotliwości występowanie wybranych czasów realizacji dla przypadku z kumulacją partii produkcyjnych i bez kumulacji	159
Tab. 15. Czasy trwania i przestoje dla harmonogramu z wyjściowymi wielkościami partii	160
Tab. 16. Przestoje na maszynach dla analizy wykonanej dla harmonogramu z wyjściowymi wielkościami partii	161
Tab. 17. Czasy trwania i przestoje dla harmonogramu ze zmniejszonymi wielkościami partii_chromosom bazowy i zwycięski	163

Tab. 18. Przestoje na maszynach dla analizy wykonanej dla harmonogramu z mniejszymi wielkościami partii bez kumulacji i z kumulacją_chromosom bazowy i zwycięski	164
--	-----

Spis wykresów

Wykres 1 Zmiany czasów przestoju dla poszczególnych sprzęgieł.....	163
Wykres 2 Zmiany w różnicach pomiędzy chromosomem bazowym i zwycięskim dla czasów przestoju	166

Spis załączników

Załącznik nr 1 – Harmonogram produkcji sprzęgieł dla wyjściowych produkcji partii bazujących na danych z przedsiębiorstwa	
Załącznik nr 2 – Harmonogram produkcji dla zmniejszonych wielkości partii na podstawie wzoru na ekonomiczną wielkość partii w oparciu o czasy tpz i tj	
Załącznik nr 3 – Harmonogram produkcji dla skumulowanych wielkości partii	
Załącznik nr 4 – Analiza obciążenia maszyn _harmonogram z wyjściowymi wielkościami partii	
Załącznik nr 5 – Sprzęgła_obciążenie maszyn przez poszczególne sprzęgła dla wyjściowych wielkości partii	
Załączniki od 6–21 w wersji elektronicznej na dołączonej płycie	

Bibliografia

1. Afentakis P., Gavish B., Karmakar U., Computationally efficient optima solutions to the lot sizing problem in multistage assembly systems, *Management Science*, 30, 222-239 (1984).
2. Aggarwal A., Park J.K., Improved algorithms for economic lot size problems, *Operations Research*, vol. 41, no. 3, 549-571, May-June (1993).
3. Anderson G.W., *SAP Planning. Best Practices in Implementation*, Sams Publishing, Indianapolis (2002).
4. Anwar M.F., Nagi R., Integrated lot sizing and scheduling for just in time production of complex assemblies with finite set-ups, *International Journal of Production Research*, Volume 35, Issue 5 May (1997), pages 1447–1470.
5. Arabas J., *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*, WNT, Warszawa (2001).
6. Axsater S., Evaluation of lot sizing techniques. *Int. J. Prod. Res.*, 24(1), (1986), 51-57.
7. Baker K.B., Dixon P., Magazine M.J., Silver E.A., An algorithm for the dynamic lot size problem with time-varying production capacity constraints, *Management Science* 1978, 24(16), 1710-1720.
8. Berry W.L., Lot sizing procedures for requirements planning systems: A framework for analysis, *Production and Inventory management*, (1972), 2 (19-34).
9. Bicheno J., Elliott B., *Operations Management*, Oxford: Open Learning Foundation / Blackwell, (1997).
10. Bicheno J., *The lean toolbox 2nd edition*, PICSIE books, (2000).
11. Bicheno J., Holweg M., Niessmann J., Constraint batch sizing in a lean environment *Int. J. Production Economics* 73, (2001), 41-49.
12. Bitrain G., Matrus H., The Multi-Item Capacitated Lot Size Problem: Error Bounds of Manne's Formulations, *Management Sci.*, 32 (1986), 350-359.
13. Bitran G.R., Matsuo H., (1986), Approximation formulations for the single-product capacitated lot size problem. *Operations Research* nr 34, 63-74.
14. Bitran G.R., Tirupati D., (1993), Hierarchical production planning, *Handbooks of Operation Research and Management Science* nr 28(10), 1174-1186.
15. Blackburn J.D. and Millen R.A., "Improved Heuristics for Multi-Stage Requirements Planning Systems," *Management Sci.*, 28, 1 (1982), 44–56.
16. Blackburn J.D. and Millen R.A., An evaluation of heuristic performance in multi-stage lot sizing systems, *International Journal of Production Research*, 23(5), 857-866, (1985).
17. Blackstone J.H. (red), *APICS dictionary. The standard for excellence in the operations management profession*. 12th edition, University of Georgia, Athens (2008).
18. Bodt, M.A., Gelders L.F., Wassenhove L.N., Lot sizing under dynamic demand conditions: a review. *Engineering Costs and Production Economics* 8, 165-187, (1984).
19. Boppana V., Chowdary James Slomp "Production planning under dynamics product environment: a multi objective goal programming approach", (2001).
20. Boszko J., *Struktura organizacyjna przedsiębiorstwa i drogi jej optymalizacji*, WNT Warszawa (1973).
21. Braglia M. and R. Gabbrielli, "A Genetic Approach for Setting Parameters of Reorder Point Systems." *International Journal of Logistics: Research and Applications* 4 n.s. 3 (2001), 345-358.
22. Brahimi N., Dauzere-Peres S., Najid N.M., Nordi A., (2006), Single item lot sizing problems, *European Journal of Operational Research* nr 168 (1), 1-16.
23. Brahimi N., Dauzere-Peres S., Najid N.M., Nordi A., (2006), Single item lot sizing problems, *European Journal of Operational Research* nr 168 (1), 1-16.
24. Brüggemann W., Jahnke H., DLSP for two-stage multi-item batch production, *International journal of production research* 32: 755–768, (1994).
25. Brzeziński M., *Organizacja produkcji*, Wydawnictwa uczelniane Politechnika Lubelska, Lublin (2000).
26. Burbidge J.L., *Zasady organizacji produkcji*, WNT Warszawa (1966).
27. Bursche J., *Planowanie wewnątrz-zakładowe i ewidencja produkcji*, WNT, Warszawa (1963).

28. Bursche J., Lis S., Wagner K., Wróblewski K.J., Organizacja podstawowych procesów produkcyjnych i sterowanie produkcją, cz. III, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa (1978).
29. Callarman T.F. and Hamrin R.S., A comparison of dynamic lot sizing rules for use in a single stage MRP system with demand uncertainty. *Int. J. Ops Prod. Managmt*, 4(2), (1984), 39-48.
30. Carlson, J.G., Yao, A.C. and Girouard W.F., "The Role of Master Kits in Assembly Operations," *International Journal of Production Economics*, 35 (1994), 253-258.
31. Chakravarty A.K., Shtub A., An experimental study on efficiency of integer multiple lot sizes in multi-echelon production inventory systems, *Int. Journal of Production Research*, (1985), vol. 23, no. 3, pp. 469-478.
32. Chan H.K., Chung S.H., Lim M.K., Recent research trend of economics lot scheduling problems, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24(3), 465-482.
33. Chang P.T., Yao M.J., Huang S.F., & Chen C.T. (2006), A genetic algorithm for solving economic fuzzy lot-size scheduling problem. *International of Production Economics*, 102, 265–288.
34. Chatfield, D.C., (2007), The economic lot scheduling problem: A pure genetic search approach. *Computers & Operations Research*, 34, 2865–2881.
35. Chen J.H., Ho S.Y., A novel approach to production planning of flexible manufacturing systems using an efficient multi - objective genetic algorithm", *International Journal of Machine Tools&Manufacture* vol. 45, no. 7–8, June, (2005), pp. 949-957.
36. Chen H., Chu C., (2003), A lagrangian relaxation approach for supply chain planning with order/setup costs and capacity constraints. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 12(1), 98-110.
37. Cheng T.C.E., (1989), An economic production quantity model with flexibility and reliability considertions, *European Journal of Operations Research* 39, 174-179.
38. Cheng T.C.E., (1991), Economic order quantity model with demand-dependent unit production cost and imperfect production processes, *IIE Transactions*, 23, 23-28.
39. Chu P., Chung K.H., Lan S.P., (1998), Economic order quantity of deteriorating items under permissible delay in payments. *Computer and Operations Research* 25 (10), 817–824.
40. Chung K.J. "A Theorem on the Determination of Economic Order Quantity under Conditions of Permissible Delay in Payments." *Computers & Operations Research* 25 n.s. 1 (1998a), 49-52.
41. Chung K.J., "Economic Order Quantity Model when Delay in Payments is Permissible." *Journal of Information and Optimization Sciences* 19 n.s. 3 (1998b), 411-16.
42. Ciura M., Rozwiązanie problem dostawy za pomocą algorytmu genetycznego, *Studia Informatica*, vol. 21, no. 3(41), (2000).
43. Clark A.R., Almada-Lobo B., Almeder C., Lot sizing and scheduling- industrial extensions and research opportunities, special issue on lot sizing and scheduling. *International Journal of Production Research*, (2011), 49(9), 2457-2461.
44. Clark A.R., Mahdiah M., Rangel S., Production lot sizing and scheduling with non-triangular sequence dependent setup times, *International Journal of Production Research*, (2014), vol. 52(8), 2490-2503.
45. Clark A.R., Morabito R., Toso E.A.V., Production setup sequencing and lot sizing at an animal nutrition plant through ATSP subtour eliminations and patching, *Journal of Scheduling*, (2010), 13(2), 111-121.
46. Coleman B.J., McKnew M.A., An improved heuristic of rmultilevel lot sizing in material requirement planning, *Decision Sciences*, Winter (1991), vol. 22, no. 1, pp. 136-156.
47. Crowston W.B., Wagner M.H., Dynamic lot size models for multi stage assembly systems, *Management Science* 19 (5), 517-527, (1973a).
48. Crowston W.B., Wagner M., Williams J..F. (1973b), Economic lot size determination in multi-stage assembly systems, *Management Science* 19, 517.
49. Cytowski J., Algorytmy genetyczne. Podstawy i zastosowania, Prbblemy współczesnej nauki. Teoria i zastosowania, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa (1996).
50. Davis L., Job shop scheduling with Genetic Algorithms, In *Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms and their applications*, edit.by JJ Greffenstette Hillsdadte, N.J. Lawrence Erlbaum Associates, (1985).

51. De Almeida M.R., Hamacher S., Cavalcanti Pacheco M.A., Vellasco M.M.B.R., Optimizing the production scheduling of a petroleum refinery through genetic algorithms, MIC'2001 – 4th Metaheuristics International Conference.
52. De Matta R., Guignard M., Production scheduling with sequence independent changeover cost, Working paper, The Wharton School, The University of Pennsylvania, (1989).
53. De Moya-Anegón F., López-Pujalte C., Guerrero-Bote V.P., Order-based fitness functions for Genetic Algorithms applied to relevance feedback, *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 54(2), 152-160, (2003).
54. Dellaert N. and Jeunet J., (2000), Solving large unconstrained multilevel lot-sizing problems using a hybrid genetic algorithm, *International Journal of Production Research*, 38(5), 1083-1099.
55. Dellaert N., Jeunet J., Jonard N., A genetic algorithm to solve the general multi-level lot-sizing problem with time-varying costs, *Int. J. Production Economics* 68 (2000) 241-257.
56. DeMatteis J.J., The part-period algorithm, *IBM Systems Journal*, Vol. 7, No. 1, pp. 30-38, (1968).
57. DeMatteis J.J., An Economic Lot-Sizing Technique I: The Part-Period Algorithm, *IBM Systems Journal* 7(1):30-38 (1968).
58. Dinkelbach W., Zum Problem der Produktionsplanung in Ein-und Mehrproduktunternehmen, 2nd ed. Physica-Wurzburg, (1964).
59. Domański R., Model integracji produkcji i zaopatrzenia w przemyśle według koncepcji Lean manufacturing, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań (2013).
60. Domschke U., Scholl A., VoB S., *Produktionsplanung*, Springer, Berlin (1993).
61. Drexel A., Kimms A., (1997), Lot sizing and scheduling – survey and extensions, *European Journal of Operational Research*, nr 99 (2), 221-235.
62. Drexel A., Haase K., (1996), Proportional lot sizing and scheduling, *International Journal of Production Economics* nr40, 73-87.
63. Duda J., Lot-Sizing in a Foundry Using Genetic Algorithm and Repair Functions, *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*, (2005).
64. Duda J., Osyczka A., A genetic algorithm for lot sizing optimization with a capacity loading criterion, (2007) IEEE Congress on Evolutionary Computation.
65. Durlik I., *Inżynieria Zarządzania. Strategia i Projektowanie Systemów Produkcyjnych*, Placet, Warszawa (1995).
66. Eilon S., Economic batch size determination for multi product scheduling, *Operations Research*, 10, 217-227, (1959).
67. Elmaghraby S.E., The economic lot scheduling problem (ELSP): review and extensions, *Management Science* 24 (1978), 578-598.
68. Enns S.T., MRP Performance effects due to lot size and planned lead time settings. *International Journal of Production Research*, vol. 39, No. 3, (2001), 461-480.
69. Fandel G., Stammen-Hegene C., "Simultaneous lot sizing and scheduling for multi-product multi-level production," *International Journal of Production Economics*, vol. 104, no. 2, pp. 308–316, (2006).
70. Fanti M.P., Maione B., Naso D., Turchiano B., Genetic multicriteria approach for flexible Line scheduling, *International Journal of Approximate Reasoning* 19, (1998), pp. 5-21.
71. Federgruen A., Tzur M., A simple forward algorithm to solve general dynamic lot sizing models with n periods in $O(n \log n)$ or $O(n)$ time, *Management Science* vol. 37, no. 8, August 1991, pp. 909-925.
72. Feldmann K., Franke J. and Rothhaupt A., Optimization and Simulation of the Printed Circuit Assembly. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, 17 (1994): 277-281.
73. Ferreira D., et al, Single stage formulations for synchronised two-stage lot sizing and scheduling in soft drink production. *International Journal of Production Economics*, 136(2), 255-265.
74. Fertsch M., (1998), A dynamic procedure for defining an order quantity, in: *Journal of Materials Processing Technology*, 76, (1-3), 276-278.
75. Fertsch M., Hadaś Ł, Cyplik P., Planowanie i sterowanie produkcją, Politechnika Poznańska, podręcznik w ramach projektu współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, Projekt Wiedza dla gospodarki (2011).

76. Fertsch M. (red.), Słownik terminologii logistycznej, Biblioteka Logistyka, Poznań (2006).
77. Fleischmann B., (1990), The discrete lot sizing and scheduling problem, *European Journal of Operational Research* nr 44, 337-348.
78. Fleischmann B., Meyr H., The general lot sizing and scheduling problem, *OR Spectrum*, vol. 19, no. 1, 11-21.
79. Florian M., Klein M., Deterministic production planning with concave costs and capacity constraints, *Management Science* (1971), 18(1), 12-20.
80. Gaafar L., Applying genetic algorithms to dynamic lot sizing with batch ordering, *Computers & Industrial Engineering*, 51 (3) (2006), pp. 433-444.
81. Girlich, H.J., "Naddor's Demand Patterns and the Economic Order Quantity Under Uncertainty." *Engineering Costs and Production Economics* 19 (1990), 327-31.
82. Glover F., Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. „*Computers and Operations Research*”, 13 (5), s. 533-549, (1986).
83. Glover F., Tabu search and adaptive memory programming – Advances, applications and challenges, *Interfaces in Computer Science and Operations Research*, (1996).
84. Głowacka-Fertsch D., Fertsch M., Zarządzanie produkcją, Wyższa Szkoła Logistyki, Poznań (2004).
85. Goldberg D.E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, WNT, Warszawa (2003).
86. Goren G.H., Tunali S., Jans R., A review of applications of genetic algorithms in lot sizing, *J Intell Manuf*, 21, 575-590, (2010).
87. Gregor M., Košturiak J., Mičieta B., Bubeník P. & Růžicka J., Dynamic planning and production control, Žilina (2000).
88. Groff G.K., A lot sizing rule for time-phased component demand, *Production and Inventory Management*, Vol. 20, 1st quarter, (1979), pp. 47-53.
89. Grupe F.H., Jooste S., Genetic algorithms. A business perspective, *Information management & Computer science*, vol. 12, no. 3, (2004), pp. 289-298.
90. Guild D., Synchronous Management, Capacity-Based Lot sizing. *Synchronous Management*, January (2003), white paper.
91. Guimaraes L., Klabjan D., Almada-Lobo B., Pricing, relaxing and fixing under lot sizing and scheduling, *European Journal of Operational Research*, 230(2), 399-411.
92. Gumus A.T., Guneri A.F., Multi-echelon inventory management in supply chains with uncertain demand and lead times: literature review from an operational research perspective, *Proc. IMechE*, vol. 221, part B: J. Engineering Manufacture, pp. 1553-1570, (2007).
93. Gunther H.O., Planning lot sizes and capacity requirements in a single-stage production system. *European Journal of Operational Research* 31, 2, 223-231, (1987).
94. Gunther H.O., Grunow M., Neuhaus U., Realizing block planning concepts in make and pack production using MILP modeling and SAP APO, *International Journal of Production Research*, 44(18-19), 3711-3726, (2006).
95. Gunther H.O., Tunali, S., Jans, R., (2010), A Review of Applications of Genetic Algorithms in Lot sizing, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21, 575-590.
96. Gupta O.K., "An Improved Procedure for Economic Order Quantity with All-Unit Price Discounts." *International Journal of Operations & Production Management* 8 n.s. 4 (1988), 79-83.
97. Hadley G., A comparison of order quantities computed using the average annual cost and discounted cost, *Management Science* 10(3), 472-476, (1964).
98. Hadley G. Whitin T.M., Analysis of inventory systems, Prentice-Hall (1963).
99. Haehling von Lanzénauer C., Production and employment scheduling in multistage production systems, *Naval Research Logistics*, vol. 17, wyd. 2, pp. 193-198, (1970).
100. Haneveld K., Teunter R.H., WK (1998), The "final order" problem, *European Journal of Operational Research*, vol. 107, no. 1, pp. 35-44.
101. Hanh P.H., Nguyen van Hop, Agent based genetic solution for lot sizing problem in multistage production, *Proceeding of 22nd International Conference on Production Research*, Bangkok, August 2-4, (2000).
102. Hanssman F., Operations Research in Production Planning and Control, New York, John Wiley, (1962).

103. Harris F.W., How many parts to make at once, *Factory*, The Magazine of management, vol. 10, no. 2, February (1913), pp. 135-136.
104. Haase K., Kohlmorgen U., "Parallel Genetic Algorithm for the Capacitated Lot-Sizing Problem", (1996), pp. 370-375.
105. Haupt R.L., Haupt S.E., *Practical Genetic Algorithms*, John Wiley&Sons New Jersey (2004).
106. Heinrich C. and Schneeweiss C., "Multi-Stage Lot-Sizing for General Production Systems," in S. Axsater, C. Schneeweiss, and E. Silver (eds.), *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Springer Verlag, Heidelberg, Germany, (1986).
107. Hernández W., & Süer G.A., (1999), *Genetic Algorithms in Lot Sizing Decisions*. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC99), Washington, DC.
108. Holland J.H., Outline for a logical theory of adaptive systems, in: *JACM*, Vol 9, 1962, no. 3, pp. 279-314.
109. Holland J.H., *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann.Avbor., University of Michigan Press (1975).
110. Homberger J., A parallel genetic algorithm for the multilevel unconstrained lot sizing problem, *Journal on computing*, vol. 20, no. 1, Winter (2008), pp. 124-132.
111. Hop N.V. and Tabucanon M.T., "Adaptive Genetic Algorithm for Lot-sizing Problem with Self-adjustment Operation Rate", *International Journal of Production Economics*, Vol. 98, No. 2, (2005), p. 129-135.
112. Hung Y-F., Chien K-L., A multi-class multi-level capacitated lot sizing model, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 51, no 11, (2000), pp. 1309-1318(10).
113. Jaber M., and Bonney M., "The Economic Manufacture/Order Quantity (EMQ/EOQ) and the Learning Curve: Past, Present, and Future." *International Journal of Production Economics* 59 (March 1999), 93-102.
114. Jans R., Degraeve Z., (2004), An Industrial Extension of the Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem. *IIE Transactions*, Vol. 36 (1), 47-58.
115. Jans R., Degraeve Z., Meta-heuristics for dynamic lot sizing: a review and comparison of solution approaches, *European Journal of production research* no 177(2007), pp. 1855-1875.
116. Jans R., Degraeve Z., (2008), Modeling industrial lot sizing problems: a review. *International Journal of Production Research*, 46, 1619-1643.
117. Jung H., Song I., Jeong B., Genetic algorithm based integrated production planning considering manufacturing patterns, *Journal of Advanced Manufacturing technology*, 32, 547-556, (2007).
118. Kampf M., Kochel P., Sequencing and lot size optimization of a production and inventory system with multiple items using simulation and parallel genetic algorithms, Springer (2006).
119. Karimi B., Fatemi Ghomi S.M.T., Wilson J.M., The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, (2003), 31, 365-378.
120. Karmarkar U.S., "Lot sizes, lead times, and in-process inventories", *Management Science*, 33 (1987), pp. 409-423.
121. Katok E., Lewis H., Harrison T., Lot sizing in general assembly systems with setup costs, setup times, and multiple constrained resources, *Management Science*, vol. 44 no. 6 859-877, June (1998).
122. Khouja M., Michalewicz Z., Wilmot M., The use of genetic algorithms to solve the economic lot size scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, vol. 110, issue 3, (1998), 509-524.
123. Kimms A., Multi-level single-machine lot sizing and scheduling (with initial inventory), *European Journal of Operational Research* 89 (1996), pp. 86-99.
124. Kimms A., A genetic algorithm for multi level multi machine lot sizing and scheduling, Working Paper No. 415, University of Kiel, (1996).
125. Knosala R. i zespół, Zastosowanie metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji, WNT, Warszawa (2002).
126. Kotowski S., Analiza algorytmów genetycznych jako układów dynamicznych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, rozprawa doktorska, Warszawa (2008).
127. Koza J.R., *Genetic Programming: On The Programming of Computers by Means of Natural Selection*. MIT Press, (1992).

128. Kubik Sz., Cellular manufacturing one-piece flow for workteams, oprac. przez The Productivity Press Development Team, Gniazdo produkcyjne: przepływ jednej sztuki dla zespołów roboczych; oprac. wersji pol. Szymon Kubik, Wrocław ProdPublishing.com, (2010).
129. Lahanas M., Baltas D., Zamboglou N., Anatomy based 3D Dose Optimization in Brachytherapy Using Multiobjective Genetic Algorithms”, (1999).
130. Li Y., Tao Y., Wang F., An effective approach to multi item capacitated dynamic lot sizing problems, International Journal of Production Research, vol. 50, no 19, 1 October (2012), 5348-6362.
131. Li Y., Chen J., & Cai X., (2007), Heuristic genetic algorithm for capacitated production planning problems with batch processing and remanufacturing. International Journal of Production Economics, 105(2), 301–317.
132. Liker J.K., The Toyota Way. 14th management principles from the world’s greatest manufacturer, McGraw-Hill (2004).
133. Lis S., Niziałek D., Wróblewski K.J., Organizacja podstawowych procesów produkcyjnych i sterowanie produkcją, cz. I, Warszawa (1976).
134. Love S.F., Bounded production and inventory models with piecewise concave costs, Management Science, (1973) 20(3), 313-318.
135. Manne A.S., (1958), Programming of economics lot sizes, Management Science nr 4(2), 115-135.
136. Maryniak M., Zastosowanie algorytmów genetycznych w rozwiązywaniu sieci liniowych i nieliniowych, praca magisterska, Politechnika Szczecińska, Instytut Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, praca magisterska, (2003).
137. Maxwell W.L., The scheduling od economic lot sizes, Naval Research Logistics Quarterly, 11, 89-124, (1964).
138. Megala N., Jawahar N., Genetic algorithm and Hopfield neural network for a dynamic lot sizing problem, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 27, no. 11, pp. 1178-1191, (2006).
139. Mehra S., and Inman R.A., Determining the Critical Elements of Just-in-Time Implementation. Decision Sciences, 23 (1992), 160-174.
140. Meyr H., Simultaneous lotsizing and scheduling by combining local search with dual reoptimization. European Journal of Operational Research, (2000), 120, 311-326.
141. Michalewicz Z., Algorytmy genetyczne + struktury danych= programy ewolucyjne, Warszawa WNT (1996).
142. Moon I., Silver E.A., Choi S., Hybrid genetic algorithm for the economic lot-scheduling problem, International Journal of Prod.Research, vol. 40, no. 4, 809-824, (2002).
143. Moon I.K., Cha B.C., Bae H.C., Hybrid genetic algorithm for group technology economic lot scheduling problem, International Journal of Production Research, 44(21), 4551-4568, (2006).
144. Morran T.J., A simulation and evaluation study of the economic production quantity lot size and kanban for a single line, multi product production system under various setup times, dissertation, August (2008), Kent State University.
145. Nguyen Van Hop, Mario T., Tabucanon “Adaptive Genetic Algorithm for Lot sizing problem with self adjustment operation rate”, (1999).
146. Oleśków J., Wybór metody określania wielkości partii w: Logistyka produkcji pod red. M. Fertscha, Biblioteka logistyka, Poznań (2003).
147. Oleśków J., Metody optymalizacji wielkości partii – analiza porównawcza, rozwój i korzyści wynikające z zastosowania algorytmów genetycznych, [w:] Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie pod red. M. Knosali, WNT, Warszawa (2004).
148. Oleśków J., Golińska P., Stachowiak A., Fertsch M., Multiobjective genetic algorithms – overview and their application to lot sizing optimization problems, Proceedings from 1st International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization, 1st IC-EpsMsO, Athens, 6-9 July, (2005).
149. Oleśków J., Zastosowanie sztucznej inteligencji do rozwiązywania problemów określania wielkości partii w systemach ERP, [w:] Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie pod red. M. Knosali, WNT, Warszawa (2007).
150. Oleśków-Szłapka J., Sobiś A., Manufacturing company. Activities during transforming push system into pull system – case study, Proceedings ISOMA, World Automation Congress, September 28 – October 2, (2008).

151. Oleśków-Szłapka J., Sobiś A., Lot sizing for lean manufacturing [in:] Modelling of modern enterprises logistics (red) M. Fertsch, K. Grzybowska, A. Stachowiak, Poznań (2009).
152. Oleśków-Szłapka J., Wybór metody określania wielkości partii, w: Logistyka produkcji. Teoria i praktyka (red.) Fertsch M., Cyplik P., Hadaś Ł., Biblioteka Logistyka, Poznań (2010).
153. Oleśków-Szłapka J., Informatyczne systemy planowania i sterowania produkcją, podręcznik w ramach projektu Wiedza dla gospodarki, wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań (2011).
154. Onwubolu G.C., Emerging optimization techniques in production planning and control, Imperial College Press, London (2002).
155. Orlicky J., Material requirements planning. The new way of life production and inventory management, McGraw-Hill, (1975).
156. Orlicky J., Planowanie potrzeb materiałowych. Nowy styl sterowania produkcją i zapasami, PWE, Warszawa (1981).
157. Ouenniche J., Boctor F.F., The G-group heuristic to solve the multi-product, sequencing, lot sizing and scheduling problem in flow shops, *Int. J. Prod. Reserach*, (2001), vol. 39, no 1, 81-89.
158. Özdamar L., Birbil S., "Hybrid heuristics for the capacitated lot sizing and loading problem with setup times and overtime decisions", *European Journal of Operations Research*, 110, 525-547, (1998).
159. Özdamar L., Barbarosoglu G., "Hybrid heuristics for the multi-stage capacitated lot sizing and loading problem", *Journal of the Operational Research Society*, 50, 810-825, (1999).
160. Özdamar L., Bozyel M.A., "The capacitated lot sizing problem with overtime decisions and setup times", *IIE Transactions*, 32, 1043-1057, (2000).
161. Palaniappan P.K., Jawahar N., A genetic algorithm for simultaneous optimisation of lot sizing and scheduling in a flow line assembly, *International Journal of Production Research*, Volume 49, Issue 2, (2011), 375-700.
162. Paszyńska A., Paszyński M., Parallel genetic algorithm finding optimal initial mesh for three dimensional self-adaptive hp finite element method, *Computer Methods in Material Science*, vol. 11, no. 1, p. 34-40, (2011).
163. Pawlak M., Algorytmy ewolucyjne jako narzędzie harmonogramowania produkcji, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa (1999), s. 9.
164. Pham Hong Hanh, Nguyen Van Hop, Agent-based genetic solution for lot sizing problem in multistage production, (1999).
165. Piasecki B. (red.), *Ekonomika i zarządzanie małą firmą*, Warszawa-Łódź, PWN (2001).
166. Pinto P.A., Rao B.M., Joint –lot sizing and scheduling for multi-stage multi-product flow shops, *Int. Journal of Prod. Research*, vol. 30, no 5, 1137-1152, (1992).
167. Piwońska A., An improved genetic algorithm for solving the selective travelling salesman problem on a road network, *Zeszyty naukowe Politechniki Białostockiej*, nr 7, (2011), s. 59-70.
168. Potoradi, J., Determining optimal lot-size for a semiconductor back-end factory, *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference Vol. 1*, pp. 720–726, Phoenix New York (1999).
169. Prasad P.S.S., Krishnaiah Chetty O.V., Multilevel lot sizing with genetic algorithm under fixed and rolling horizons, *International Journal Adv Manuf Technol*, (2001), 18: 520-527.
170. Deva Prasad S., Rajendran C., Krishnaiah Chetty O.V., A genetic algorithmic approach to multi-objective scheduling in a Kanban-controlled flowshop with intermediate buffer and transport constraints, *Int J Adv Manuf Technol* (2006) 29: 564–576.
171. Quadt D., Lot sizing and scheduling for flexible flow lines, *lecture notes in economics and mathematical systems*, Berlin Springer (2004).
172. Quadt D., Kuhn.H., Conceptual Framework for lot sizing and scheduling of flexible flow lines, *Int. Journal of Production Research*, vol. 43, no 11, June (2005), 2291-2308.
173. Qiushuang Z., Nengmin W., Decision for remanufacturing of dynamic lot sizing problem with limited inventory, *Proceedings of 27th Chinese Control Conference*, July 16-18, (2008), Kunming, Yunnan, China.
174. Rabta B., Reiner G., Batch sizes optimization by means of queueing network decomposition and genetic algorithms, *International journal of Production research*, vol. 50, no. 10, 15 May (2012), 2720-2731.
175. Radosiński E., *Systemy informatyczne w dynamicznej analizie decyzyjnej*, Wyd. naukowe PWN, Wrocław (2001).

176. Rechenberg J., Cybernetic solution path of an experimental problem, Library Translation 1122, Royal Aircraft Establishment, Farnborough, Hampshire, England (1965).
177. Rizk N., and Martel A., Supply Chain Flow Planning Methods: A Review of the Lot-Sizing Literature. CENTOR Working Paper, Université Laval, (2001).
178. Rogers J., A computational approach to the economic lot scheduling problem, *Management Science* 4 (1958) 264-291.
179. Roundy R., Rounding off to powers of two in continuous relaxations of capacitated lot sizing problems, *New York, Management Science* no 35, December (1989), 1433-1442.
180. Roundy R., A 98% effective lot sizing rule for a multi-product, multi-stage production/inventory system, *Mathematics of Operations Research*, vol. 11, no. 4, November (1986), pp. 699-727.
181. Rungreunganaun V., Woarawichai C., Applying Genetic Algorithms for Inventory Lot-Sizing Problem with Supplier Selection under Storage Space, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 7, (2013).
182. Rutkowska D., Piliński M., Rutkowski L., Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa (1999).
183. Rutkowski L., Metody i techniki sztucznej inteligencji, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa (2009).
184. Salomon M., *Lecture Notes in Economics and Math. Systems* vol. 355, Deterministic Lot Sizing Models for Production Planning, Springer, (1991) Berlin.
185. Salomon M., Kroon L.G., Kuik R., Van Wassenhove L.N., (1991), Some extensions of the discrete lot sizing and scheduling problem, *Management Science* nr 37(7), 801-812.
186. Sarker R., Newton C., Genetic algorithms for solving economic lot size scheduling problem, *Computers & Industrial Engineering* 42 (2), 189-198, (2002).
187. Shingo S., *A Revolution in Manufacturing: The Smed System*, Productivity Press, (1985).
188. Shingo S., *A Study of the Toyota Production System*, Productivity Press, (1981).
189. Shen W., and Norrie D.H., Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey. *Knowledge and Information Systems, an International Journal*, 1(2), 129-156, (1999).
190. Schonberger R.J., Knod E.M., *Operations Management: Customer-Focused Principles*, 6th Edition, Irwin, Chicago, (1997).
191. Silver E.A., Meal H.C., A heuristic for selecting lot size quantities for the case of a deterministic time-varying demand rate and discrete opportunities for replenishment, *Production & Inventory management* 14 (1973), pp. 64-74.
192. Slack N., Chambers S., Harland C., Harrison A., Johnson R., *Operations Management*, 2nd Edition, Financial Times. Pitman Publishing, London, (1998).
193. Słowiński B., *Wprowadzenie do logistyki*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin (2008).
194. Stachowiak A., *Metoda projektowania zwinnych jednostek wytwarzania w oparciu o wykorzystanie elementów koncepcji zarządzania obiektami*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Informatyki i Zarządzania, Poznań (2004).
195. Stadnicki J., *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji z przykładami zastosowań technicznych*, WNT, Warszawa (2006).
196. Staggemeier A.T., Clark A., A survey of lot sizing and scheduling models, presented at *Proceedings of 23rd Annual Symposium of the Brazilian Operational Research Society*, (2001).
197. Steinberg E., Napier A., Optimal multi level lot sizing for requirements planning systems, *Management Science*, vol. 26, no. 12, 1258-1271, (1980).
198. Stockton D.J., Quinn L., MRP lot sizing using Genetic Algorithms, *BPICS Control* December 1993/January 1994, pp. 21-27.
199. Studniarski M., Stopping criteria for genetic algorithms with application to multiobjective optimization, In: R. Schaefer et al. (Eds.), *Parallel Problem Solving from Nature – PPSN XI, Part I, Lecture Notes in Computer Science* 6238 (2010), 697-706.
200. Sufryd M., *Badanie algorytmów genetycznych*, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Opole (2009).

201. Swamidass Paul M., Encyclopedia of production and manufacturing management, SMED, Kluwer Academic Publishers, (2000), p. 713.
202. Tempelmeier H., Helber S., (1994), A heuristic for dynamic multi-item multi-level capacitated lotsizing for general product structures. *European Journal of Operational Research* 75, 296-311.
203. Teunter R.H., Klein Haneveld W.K., The "final order" problem. In: *European Journal of Operational Research*, Vol. 107, No. 1, (1998), p. 35-44.
204. Toledo C.F.M., França P.M., Morabito R., Kimms A., Multi-population genetic algorithm to solve the synchronized and integrated two-level lot sizing and scheduling problem, *International Journal of Production Research*, Volume 47, Issue 11, (2009), pp. 3097-3119.
205. Toso A.V., Morabito R., Clark A.R., Lot sizing and sequencing optimization and an animal feed plant, *Computers and Industrial Engineering*, vol. 57, issue 3, October (2009), 813-821.
206. Trigeiro W.W., Thomas L.J., McClain J.O., Capacitated lot sizing with set-up times, *Management Science* vol. 35 no. 3, pp. 353-366, (1989).
207. Wagelmans A., van Hoesel S., Kolen A., Economic lot sizing: an $O(n \log n)$ algorithm that runs in linear time in the Wagner-Whitin case, *Operations Research* 40 (1992), S145-S156.
208. Wagner H.M. and Whitin T., Dynamic version of the economic lot size model, *Management Science*, Vol. 5, pp. 89-96, (1958).
209. Whitmann H.F., How many parts to make at once. *The magazine of management*, 1913 (10), 135-136 reprinted in (1990) *Management Science* 38.
210. Wierzchoń S.T., Sztuczne systemy immunologiczne. Teoria i zastosowania. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa (2001).
211. Wight O.W., Production and inventory management in the computer age, Van Nostrand Company Limited, New York (1984), p. 24.
212. Willem K., Haneveld K. and Teunter R., Effects of discounting and demand rate variability on the EOQ, *International Journal of Production Economics* 54:173-192, (1998).
213. Williams J.J., (1982), On the optimality of integer lot size ratios in economic lot size determination in multi-stage assembly systems, *Management Science*, 28, 1341.
214. Wilson R.H., "A Scientific Routine for Stock Control" *Harvard Business Review*, 13, 116-128 (1934).
215. Winter G., "Multiobjective optimization problems & evolutionary algorithms" (CEANI), Proceedings "Evolutionary Multi-criterion optimization", Springer Verlag, (1993).
216. Womack James P., Daniel T. Jones, Lean thinking, Simon & Schuster, New York, (1996).
217. Vichai Rungreunganaun, Chirawat Woarawichai, (2013), Applying Genetic Algorithms for Inventory Lot-Sizing Problem with Supplier Selection under Storage Space, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol.7, 231-236.
218. Vollmann T.E., W.L. Berry D.C. Whybark F.R. Jacobs, Manufacturing planning and control systems for supply chain management, McGraw Hill, (2005), pp. 397-398.
219. Vörös J., Product balancing under conditions of quality inflation, cost pressures and growth strategies. *European Journal of Operational Research* 141(1): 153-166 (2002).
220. Xie J., An application of genetic algorithms for general dynamic lot sizing problems, *Proceedings of Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*, 414, 82-87, (1995).
221. Xie J., Dong J., Heuristic Genetic Algorithms for General Capacitated Lot sizing problems, *An international journal computer & mathematics with applications* (2002), 44 (263-276).
222. Xie J., Dong J., Heuristic genetic algorithms for solving a fuzzy economic lot size scheduling problem, *Int.Journal of Production Economics* 102(2), (2006), 265-288.
223. Yu, G. "Robust Economic Order Quantity Models." *European Journal of Operational Research* 100 n.s. 3 (1997): 482-493.
224. Zangwill W.I., Minimum Concave Cost Flows in Certain Networks, *Management Science*, (1968), 14(7, Theory Series), pp. 429-50.
225. Zangwill W.I., A Backlogging Model and Multi-Echelon Model of a Dynamic Economic Lot Size Production System-a Network Approach, *Management Science*, (1969), 15(9), pp. 506.
226. Zangwill W.I., Garcia C.B., Global Continuation Methods for Finding All Solutions to Polynomial Systems of Equations in N Variables, Center for Mathematical Studies in Business

- and Economics. Report; 7755; Chicago: Dept. of Economics and Graduate School of Business University of Chicago, (1977).
227. Zhao X., Xie J., Multilevel lot sizing heuristics and freezing the Master Production Schedule in Material Requirements Planning Systems, *Production Planning and Control*, Vol. 9, No. 4, (1998), pp. 371-384.
 228. Zhu, X., and W. E. Wilhelm (2006) Sequence-Dependent Scheduling: A Literature Review, *IIE Transactions*, 38, 987-100.
 229. Zieliński J.S., *Inteligentne systemy w zarządzaniu. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa (2000).
 230. Żywicki K., *Doskonalenie procesów wytwarzania z wykorzystaniem koncepcji Lean manufacturing*, *Zeszyty naukowe Politechniki Poznańskiej, Budowa Maszyn i Zarządzania Produkcją*, (2010), nr 4(14), s.103-121.

Źródła internetowe:

1. Jak zorganizować przepływ jednej sztuki w gnieździe, 6.11.2009, <http://zarzadzanie-produkcja.wip.pl/lean-management/jak-zorganizowac-przeplyw-jednej-sztuki-w-gniezdzcie>, śc.dn. 2.11.2011
2. Cincom, Best practices in Lean manufacturing. The Migration to a Lean Global Enterprise., 2008, white paper
3. Invistics, Breakthrough Manufacturing Performance, Processing Lean: Modifying Traditional Techniques for Complex Environments, 2004,
4. Bereta M., materiały dydaktyczne, Wydział Fizyki, Matematyki i Informatyki Politechniki Krakowskiej w Zakładzie Inteligencji Obliczeniowej, http://www.michalbereta.pl/dydaktyka/alg_imm/klasyczny_algorytm_genetyczny.pdf, 2014
5. <http://edu.pjwstk.edu.pl/wyklady/nai/scb/rW12.htm>
6. Burkett M., Lot size (batch size) optimization yields an effective balance among inventory levels, cycle times and throughput, AMR Research <http://www.invistics.com/Lot-Size-Optimization.aspx>
7. Carlos A. Coello Coello "An updated survey of evolutionary multiobjective optimization techniques: State of the art and future trends" - www.lania.mx/~ccoello/EMOO/EMOObib.html
8. Dan Reid R., Sanders Nada R., Just in time and Lean systems. Wiley 2007 and Strategos, Lot sizing and lean manufacturing strategy. January 2003, <http://jobfunctions.bnet.com/>
9. Gałda K., Zastosowanie algorytmów genetycznych do optymalizacji modelu SVM procesu stalowniczego, praca magisterska Politechnika Śląska, Katowice 2009, http://mblachnik.pl/lib/exe/fetch.php/dydaktyka/mgr_downloads/2009_galda_mgr_v_end.pdf
10. Gutierrez E. Genetic algorithms in capacitated lot sizing decisions, 2001, http://www.ece.uprm.edu/crc/crc2001/papers/eliacer_gutierrez.PDF
11. Kraszevska M., Przegląd modeli ustalania wielkości partii produkcyjnej dla pojedynczego wyrobu przy nieograniczonych zasobach, http://www.profuturo.agh.edu.pl/pliki/REFERATY_IKKMU/SI_PDF/KRASZEWSKA_Mart_a.pdf, śc. 4.03.2011
12. Mathew T.V., Genetic Algorithm, http://www.civil.iitb.ac.in/tvm/2701_dga/2701-ga-notes/gadoc.pdf, śc. dn.3.11.2011
13. Rudnicki J., Koncepcja poziomowania produkcji, <http://www.log24.pl/artykuly/koncepcja-poziomowania-produkcji,2771>
14. Strategos, Lot sizing and lean manufacturing strategy. January 2003, <http://jobfunctions.bnet.com/>
15. Yao, M. J., & Huang, J. X. (2005). Solving the economic lot scheduling problem with deteriorating items using genetic algorithms. *Journal of Food Engineering*, 70, 309–322. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.05.077.