

**Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w
Szczecinie
Wydział Informatyki**

Praca doktorska

**Zastosowanie priorytetów dynamicznych
do optymalizacji wieloproduktowych
systemów produkcyjnych w poligrafii**

**Autor pracy
mgr inż. Tomasz Wiśniewski**

**Promotor rozprawy
prof. dr hab. inż. Oleg Zaikin**

Szczecin 2013

Spis treści

<i>Wstęp</i>	str. 1
Rozdział 1. Charakterystyka złożonych, wieloproduktowych systemów produkcyjnych	str. 4
1.1. Klasyfikacja systemów produkcyjnych	str. 4
1.1.1 Analiza wieloproduktowych, złożonych systemów produkcyjnych ..	str. 8
1.1.2 Analiza systemu produkcji poligraficznej	str. 12
1.2 Charakterystyka problemu oceny efektywności wieloproduktowych systemów	str. 15
1.3 Modelowanie złożonych systemów przy użyciu dyskretnej symulacji komputerowej	str. 19
Rozdział 2. Wykorzystanie dynamicznych reguł priorytetowych w systemach wieloproduktowych	str. 27
2.1 Charakterystyka problemu szeregowania zadań.....	str. 27
2.1.1 Metody szeregowania	str. 30
2.2 Klasyfikacja reguł priorytetowych	str. 33
2.3 Przegląd literatury oraz podłoże problemu przydziału priorytetów	str. 36
2.3.1 Priorytety statyczne i dynamiczne	str. 36
2.3.2 Priorytety jednoatrybutowe oraz wieloatrybutowe.....	str. 38
2.3.3 Złożoność problemu przydziału priorytetów.....	str. 39
2.3.4 Zastosowanie priorytetów.....	str. 41
2.4 Modelowanie systemu wieloproduktowego z wykorzystaniem dynamicznych reguł priorytetowych	str. 43
2.4.1 Termin wykonania zadania.....	str. 45
2.4.2 Analizowane reguły priorytetowe	str. 45
2.4.3 Funkcje kryterialne modelu oceny systemu produkcyjnego	str. 49
Rozdział 3. Optymalizacja systemów z wykorzystaniem dynamicznych reguł priorytetowych	str. 50
3.1 Analiza problemu optymalizacji systemów.....	str. 50

3.2 Model oceny wieloproduktowego systemu produkcyjnego	str. 53
3.2.1 Założenia	str. 54
3.2.2 Parametry wejściowe	str. 55
3.2.3 Parametry sterujące.....	str. 56
3.2.4 Funkcje kryterialne	str. 56
3.3 Optymalizacja z wykorzystaniem symulacji	str. 57
3.4 Optymalizacja buforów przed stanowiskami przy użyciu algorytmu symulowanego wyżarzania.....	str. 61
3.5 Optymalizacja alokacji reguł priorytetowych przed każdym stanowiskiem przy użyciu algorytmów ewolucyjnych.....	str. 65
3.5.1 Algorytm genetyczny	str. 66
3.6 Analiza wrażliwości rozwiązania optymalnego	str. 75

Rozdział 4. Zastosowanie optymalizacji wieloproduktowych systemów

produkcyjnych w poligrafii	str. 80
4.1 Charakterystyka badanego systemu poligraficznego	str. 80
4.1.1 Założenia modelu symulacyjnego	str. 84
4.2 Wyniki optymalizacji systemu	str. 87
4.2.1 Wyniki optymalizacji buforów przed stanowiskami	str. 87
4.2.2 Analiza wpływu oraz interakcji parametrów decyzyjnych.....	str. 90
4.2.3 Wyniki optymalizacji alokacji reguł priorytetowych przed każdym stanowiskiem	str. 102
4.2.4 Wyniki analizy wrażliwości rozwiązania optymalnego	str. 108

Zakończenie str. 120

Spis rysunków str. 123

Spis tabel str. 126

Bibliografia str. 127

Wstęp

Konkurencja we wszystkich branżach produkcyjnych stale się zwiększa. Przedsiębiorstwa, które chcą odnieść sukces muszą już nie tylko dbać o jakość wyrobów oraz skuteczną strategię sprzedaży, ale także muszą zadbać o ciągłe doskonalenie swoich procesów zarządzania oraz wytwarzania.

Realizowaną koncepcją pracy doktorskiej jest udoskonalenie procesu produkcji poligraficznej poprzez stworzenie systemu wspomagania, który pozwoli na efektywniejsze zarządzanie tym procesem. W pracy zastosowano informatyczne narzędzia wspomagające zarządzanie procesem produkcyjnym, do których należą dyskretna symulacja komputerowa oraz optymalizacja z wykorzystaniem algorytmów heurystycznych i ewolucyjnych. Problemem w złożonych systemach produkcyjnych, gdzie występuje dużo rodzajów zleceń, staje się kolejność, w jakiej mają one być wykonywane na stanowiskach roboczych. Jest to znany z literatury naukowej problem szeregowania zadań mający istotne praktyczne zastosowanie w przemyśle. Coraz częściej wykorzystywaną metodą szeregowania zadań w systemach stają się dynamiczne reguły priorytetowe. Ze względu na łatwość oraz szybkość ich implementacji stosowane są często w systemach produkcji układów scalonych, płyt półprzewodnikowych, a także w poligrafii i innych branżach (Zhang i Jiang 2009, Sarin i in. 2011). Jednakże, dynamiczne reguły priorytetowe nie są jedyną metodą szeregowania zadań w dużych systemach. Częściej stosowane, zarówno w literaturze naukowej, jak i w praktyce, jest szeregowanie statyczne na podstawie historycznych danych. Metoda ta ma jednak swoje wady, którymi są stworzone sztywne harmonogramy, nieuwzględniające zmian zmieniających się czynników zewnętrznych, ale także i wewnętrznych zakłóceń systemu. Szybkość obliczania priorytetów pozwala na dobranie takiej strategii szeregowania zadań, która da najlepsze efekty wydajności danego systemu. Skomplikowane algorytmy ustalające harmonogramy są mniej elastyczne i trudniejsze do zrealizowania w praktycznych zastosowaniach w przemyśle. Dodatkowo nowoczesne, wieloatrybutowe reguły priorytetowe pozwalają optymalizować więcej niż jeden parametr jednocześnie. Zatem cel niniejszej pracy został określony jako:

Opracowanie modelu i algorytmów optymalizujących efektywność systemu produkcyjnego z priorytetami dynamicznymi na przykładzie systemu produkcji poligraficznej.

W systemach z priorytetami branży poligraficznej produkcja charakteryzuje się wysokim poziomem czynników losowych, które mają wpływ na proces. Plan produkcyjny powinien rozpatrywać niepewność tkwiącą w tych systemach spowodowaną zmiennością czasów produkcyjnych, niepewnością czasów produkcyjnych, nieoczekiwanym zapotrzebowaniem ze strony popytu, spersonalizowanymi zamówieniami, złożonością produktów oraz różnymi priorytetami nadawanymi zleceniom. Tworzące się kolejki w systemach tej klasy, szczególnie przed stanowiskami najbardziej obłożonymi, wymagają dobrania odpowiedniej strategii priorytetów w celu uzyskania najlepszych parametrów wyjściowych całego systemu lub poszczególnych zleceń. Wobec tego hipoteza pracy została określona jako:

Dobór odpowiedniej strategii priorytetów skutkuje podniesieniem efektywności systemu produkcyjnego.

W rozdziale pierwszym rozprawy została przedstawiona charakterystyka oraz klasyfikacja wieloproduktowych, złożonych systemów produkcyjnych. Przykładem takich systemów jest system produkcji poligraficznej, który został wybrany jako obiekt badań niniejszej pracy. Dodatkowo w rozdziale pierwszym opisano najczęstsze miary oceniania efektywności systemów produkcyjnych, a także narzędzie służące zbudowaniu modelu systemu produkcyjnego, czyli dyskretną symulacją komputerową.

Rozdział drugi został poświęcony zastosowaniu dynamicznych reguł priorytetowych w złożonych, wieloproduktowych systemach. Przedstawiono szeroką klasyfikację metod szeregowania wraz z podziałem na poszczególne rodzaje priorytetów. Rozdział drugi zawiera także sposób modelowania reguł priorytetowych. Zaprezentowano opis wszystkich reguł priorytetowych wykorzystywanych w tej pracy, wraz z powiązаныmi miarami efektywności systemów.

W kolejnym, trzecim rozdziale, omówiony został problem optymalizacji systemów produkcyjnych z wykorzystaniem reguł priorytetowych. Scharakteryzowany został model matematyczny oraz model dyskretnej symulacji komputerowej badanego systemu

produkcyjnego, na przykładzie systemu produkcji poligraficznej. Przedstawiono algorytm symulowanego wyżarzania wykorzystywany do optymalizacji buforów przed stanowiskami produkcyjnymi oraz algorytm genetyczny, który został użyty do optymalizacji rozmieszczenia reguł priorytetowych przed stanowiskami. Dodatkowo opisano metodę analizy wrażliwości rozwiązania optymalnego.

Ostatni, czwarty rozdział, zawiera wyniki opracowanego algorytmu optymalizacji systemu produkcji poligraficznej. Optymalizowany model systemu został scharakteryzowany na początku tego rozdziału. Oprócz wyników optymalnej alokacji reguł priorytetowych w tym rozdziale znajdują się również wyniki interakcji pomiędzy poszczególnymi parametrami decyzyjnymi modelu systemu, a także wyniki analizy wrażliwości rozwiązania optymalnego.

Rozdział 1

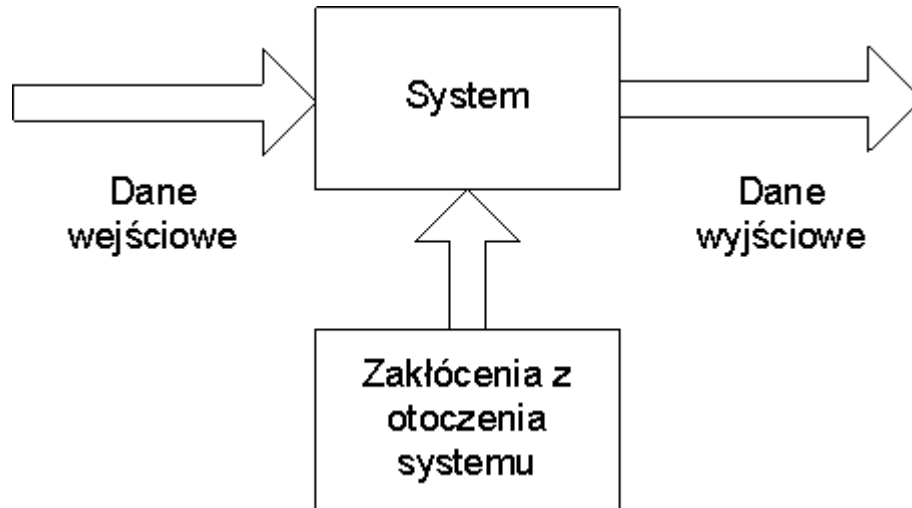
Charakterystyka złożonych, wieloproduktowych systemów produkcyjnych

W ostatnich dekadach strategie produkcyjne skupiają się zarówno na szybkości realizowania żądań klientów tak bardzo jak na kosztach i jakości. Klienci chcą mieć produkty dostosowane do ich indywidualnych potrzeb, lecz jednocześnie są niecierpliwi. Jednakże przedsiębiorstwa produkcyjne mogą tworzyć przewagę konkurencyjną oferując możliwość szybkiego wyprodukowania i dostarczenia różnorodnych produktów. Cel ten może być osiągnięty dzięki zaprojektowaniu takich produktów, które mogą być szybko wyprodukowane i zmontowane w różnych kombinacjach dla stosunkowo małych partii produkcyjnych w odpowiedzi na zamówienie klienta. Wymaga to zastosowania uniwersalnych stanowisk roboczych, na których może być wytwarzane wiele rodzajów produktów. Sektor produkcji na zamówienie, w której charakter produktu gotowego dostosowywany jest do specyfikacji zamówień poszczególnych klientów, rozszerza się na wszystkie branże. Począwszy od motoryzacji, poprzez dobra użytku codziennego, tekstylia, aż po przemysł poligraficzny. Produkcja na zamówienie odgrywa tym ważniejszą rolę im bardziej następuje personalizacja wykonywanych produktów. Odpowiedzią na te oczekiwania są wieloproduktowe systemy produkcyjne, w których dodatkowo procesy wytwarzania są ukierunkowane na optymalizację przepływu półproduktów.

1.1 Klasyfikacja systemów produkcyjnych

System produkcyjny stanowi celowo zaprojektowany i zorganizowany układ materialny, energetyczny i informacyjny eksploatowany przez człowieka i służący produkowaniu określonych produktów (wyrobów i usług) w celu zaspokajania

różnorodnych potrzeb konsumentów (Durlik, 2000). Samo pojęcie systemu definiowane jest jako powiązany ze sobą zbiór elementów działających wspólnie dla osiągnięcia założonego celu (Pająk, 2006).



Rys.1.1 Schemat systemu

Przy rozpatrywaniu ogólnych problemów dotyczących systemu jako całości ważne są tylko te właściwości elementów, które określają istotę wzajemnych powiązań z innymi elementami lub bezpośrednio oddziałują na właściwości systemu w całości. Zatem jako system rozumiana jest wyodrębniona z otoczenia część rzeczywistości, która spełnia następujące warunki:

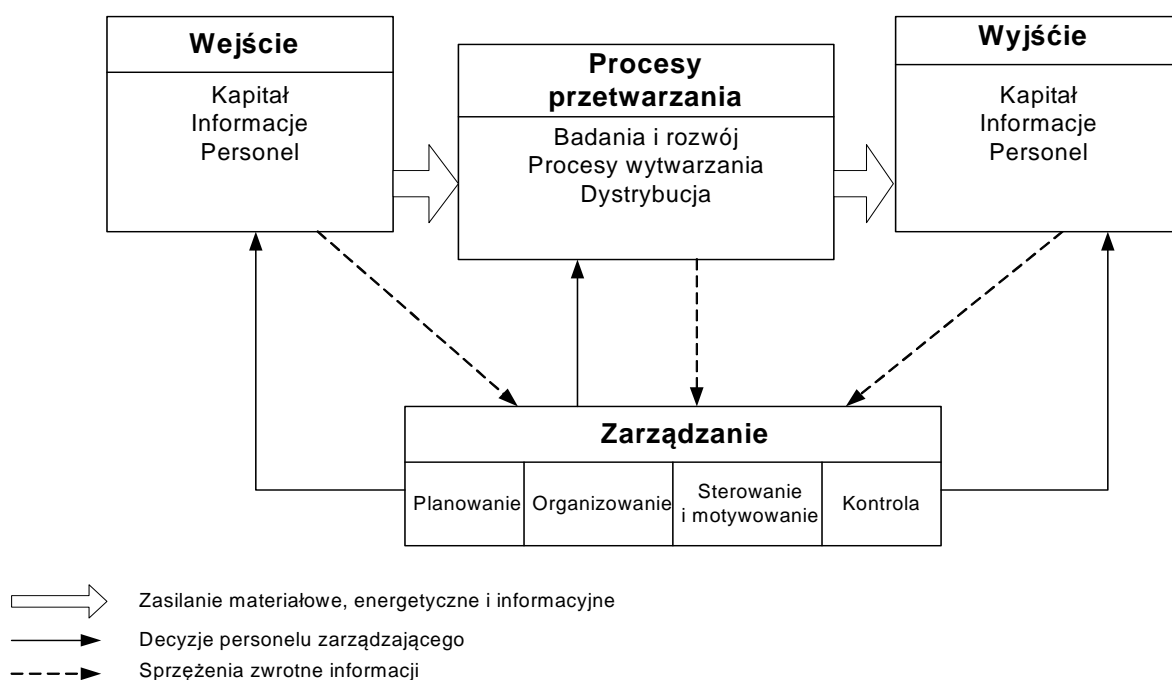
- składa się z podsystemów, które wzajemnie oddziałują na siebie,
- spełnia założony cel działania,
- w czasie działania zachowuje swoje podstawowe właściwości.

Na rysunku 1.1 przedstawiono schemat wyodrębnionego z otoczenia systemu, na który oprócz wielkości wejściowych oddziałują zakłócenia z otoczenia.

System produkcyjny składa się z:

- Elementy wejścia, w skład którego wchodzi wszystkie czynniki produkcji: techniczne środki produkcyjne (narzędzia), półprodukty, surowce, komponenty, czynniki energetyczne, ludzkie a także kapitał i wiedza (informacja) oraz personel.

- Elementy wyjścia, w skład którego wchodzi wyroby (produkty gotowe materialne), produkty niematerialne, usługi, odpady produkcyjne oraz informacje.
- Procesy przetwarzania elementów wejścia w elementy wyjścia nazywane procesem produkcyjnym.
- Proces zarządzania systemem.
- Sprzężenie materialne, energetyczne i informacyjne pomiędzy wyżej wymienionymi elementami składowymi systemu produkcyjnego.



Rys.1.2 Model systemu produkcyjnego (Pasternak, 2005)

Model systemu produkcyjnego wraz z przepływem materiałów i informacji przedstawiono na rysunku 1.2. W systemach produkcyjnych wykonywane są przede wszystkim procesy produkcyjne, które L. Dwiliński (2002) definiuje jako „transformacje wchodzących do systemu produkcyjnego czynników produkcji (materiałów, energii, informacji) w gotowe wyroby o odpowiedniej wartości dla klientów dzięki kwalifikowanej pracy ludzkiej oraz dostarczenie tych wyrobów klientom i roztaczanie serwisowej opieki nad sprzedanymi wyrobami”. Sam proces określić można jako kolejną zmianę stanu w cyklu następujących po sobie działań (Pająk, 2006). Procesy produkcyjne to głównie procesy wytwórcze. I. Durlik (2000) rozróżnia: proces wytwórczy podstawowy (wytwarzanie produktu), wytwórczy pomocniczy (utrzymanie ruchu, funkcjonowanie

infrastruktury), wytwórczy obsługowy (ochrona i utrzymanie czystości obiektu, BHP, obsługa administracyjna). Proces wytwórczy składa się z operacji technologicznych, czyli działań powodujących zmianę kształtów lub właściwości fizykochemicznych materiału wyjściowego lub półwyrobu. Zbiór operacji technologicznych nazywany jest procesem technologicznym natomiast zbiór działań kontroli procesem kontroli. Te dwa procesy, ich wzajemne powiązania są przedmiotem badań tej pracy.

Innego podziału procesów wytwórczych dokonuje E. Pająk (2006). Kryterium podziału odnosi się do przebiegu w czasie. Można tu wyróżnić procesy ciągłe, związane z automatyzacją, charakterystyczne dla przemysłu chemicznego, energetyki. Drugą grupą są procesy dyskretny, na których skupia się owa praca. Charakteryzują się one zmienną strukturą ilościowo-jakościową wyrobów. Duża jest rola człowieka w tworzeniu tych procesów. Procesy te spotykane są najczęściej w przemyśle elektromaszynowym. Kolejnym kryterium jest: technologia i środki. Kryterium to rozdziela procesy wytwórcze na procesy obróbki (przygotowanie półwyrobów, obróbka kształtująca, obróbka wykańczająca, obróbka cieplna, obróbka fizykochemiczna) i montażu. W modelu systemu produkcyjnego, który jest przedmiotem badań w kolejnych rozdziałach występują zarówno procesy montażu jak i obróbki.

Systemy produkcyjne można również sklasyfikować poprzez typy i formy organizacji produkcji. Forma organizacji produkcji jest to rodzaj przepływu części, zespołów, wyrobów między stanowiskami roboczymi w cyklu produkcyjnym (Durlak, 2000). Pojawia się tutaj pojęcie cyklu produkcyjnego, który definiuje się jako okres między rozpoczęciem a zakończeniem procesu produkcyjnego wyrobu. Obejmuje on czasy procesu technologicznego i procesów pomocniczych oraz czasy przerw międzyoperacyjnych i przerw między wykonaniem kolejnych faz procesu produkcyjnego. K. Pająk (2006) wyróżnia następujące formy organizacyjne:

- Formy gniazdowe i liniowe - Gniazdowa forma organizacji jest wynikiem przedmiotowej specjalizacji systemu produkcyjnego. Asortyment produkowanych w gnieździe wyrobów jest szeroki, wyroby te wykazują podobieństwo technologiczne. W liniowej formie organizacji produkcji wyroby wykazują również znaczne podobieństwo w większości operacji technologicznych, a także ich kolejności. Rozmieszczenie stanowisk jest zgodne z kolejnością wykonywanych operacji technologicznych.

- Formy potokowe i niepotokowe - podział na formy potokowe i niepotokowe skupiony jest przede wszystkim na przepływie produkcji a dopiero później na kolejności rozmieszczenia stanowisk. O produkcji niepotokowej mówi się gdy kierunek przebiegu przedmiotów pracy pomiędzy stanowiskami jest zmienny (w odróżnieniu do potokowej, gdzie jest stały), co oznacza, że każde stanowisko pracy może współpracować z różnymi stanowiskami i kolejność operacji technologicznych może być zmienna. W produkcji potokowej natomiast stanowiska pracy rozmieszczone są w kolejności odpowiadającej poszczególnym etapom przebiegu procesu. (potokowe linie produkcyjne).

Inną cechą, która uzupełnia klasyfikacje systemów produkcyjnych przez organizację procesu jest typ organizacji produkcji. Przez typ produkcji należy rozumieć system organizacji produkcji na stanowiskach roboczych obejmujący zespół stosowanych środków i metod produkcji wyrobów (technologii) (Łubniewski i in., 1986).

Zatem typ organizacji produkcji związany jest ze stopniem specjalizacji stanowisk roboczych i z wielkością produkcji. I. Durlik (2000) dzieli stanowiska robocze na:

- Uniwersalne – bez przydzielenia ściśle określonych części i operacji, wyposażone uniwersalnie i używające uniwersalnych narzędzi,
- Specjalizowane – z przydzieloną grupą części i operacji z możliwością przebrojeń, jednakże w zakresie zawężonym do pewnej klasy narzędzi,
- Specjalne – z przydzieloną ściśle jedną lub dwoma-trzema ściśle określonymi częściami i operacjami, bez możliwości przebrojeń.

1.1.1 Analiza wieloproduktowych, złożonych systemów produkcyjnych

Występowanie stanowisk danego stopnia specjalizacji wynika z typu konkretnej linii produkcyjnej i rodzaju produkcji (jedno lub wieloasortymentowa - wieloproduktowa). W systemach wieloproduktowych (ang. *multi-product production system*) w każdym odcinku czasu znajduje się wiele rodzajów produktów oraz pojedyncze stanowiska mogą wykonywać operacje uniwersalne dla wielu rodzajów produktów. Systemy wieloproduktowe to systemy produkcji, które mają zdolność do wytwarzania szeregu różnych produktów w ramach jednego systemu, który działa dzięki uniwersalnym i

elastycznym stanowiskom roboczym, szybkim przebrojeniom, przepływie jednej sztuki oraz bardzo krótkim czasem realizacji zleceń. Ten rodzaj systemów produkcji odgrywa coraz większe znaczenie w ostatnich latach w całej branży produkcyjnej, zwłaszcza w firmach, które wprowadziły odchudzone podejście do zarządzania (ang. *lean management*). Dla lepszej amortyzacji środków trwałych, wykorzystanie zasobów (fabryka, maszyny, kapitał ludzki) powinno być zmaksymalizowane poprzez poprawę ich wykorzystania tak, że aby jak najwięcej produkować z istniejących zasobów. Osiąga się to poprzez przestawienie linii poświęconej jednemu produktowi – która jest wrażliwa na wahania sprzedaży – na elastyczną linię przystosowaną do produkcji kilku rodzajów produktów. Różnice w zapotrzebowaniu na każdym produkcie są kompensowane przez elastyczność narzędzia produkcyjnego: nagłe wahania i zmienność są ograniczone.

Pomysł, aby produkować kilka rodzajów różnych produktów na jednej linii produkcyjnej lub w jednej komórce produkcyjnej nie jest nowy, ale tendencje opisane powyżej doprowadziły do nowej specyfiki, która charakteryzuje się bardzo krótkimi partiami produkcyjnymi a także znaczącym wzrostem wewnętrznych jak i zewnętrznych czynników losowych. Wytwarzanie szerokiej gamy produktów zabezpiecza przedsiębiorstwa przed wahaniami rynku (sezonowymi, cyklicznymi), ale sprawia, że coraz trudniej jest przewidzieć dokładną strukturę zamówień klientów. Dlatego też skutkiem personalizacji jest fakt, iż przyszły popyt może być traktowany jako parametr losowy z dużą zmiennością. Zmienność ta jest wynikiem niepewności przyszłych parametrów zamówień klienta, to jest: czasu złożenia zamówienia, rodzaju oraz ilości produktów lub wymaganiami co do jakości. Dodatkowo wspomniana zmienność wpływa na wydajność całego systemu produkcyjnego, ponieważ wielkość partii wyrobów danego typu jest zmienną losową zależną od wielkości zlecenia. A zatem analizując czas operacji na stanowisku roboczym pojedynczego zlecenia traktować go trzeba jako zmienną losową, nawet jeśli czas operacji pojedynczej sztuki tego rodzaju produktu jest stały. Tego rodzaju systemy produkcji wieloasortymentowej stoją pomiędzy liniowym przepływem produkcji a elastycznymi systemami produkcyjnymi (ang. *flexible manufacturing systems*).

W literaturze polskiej termin wieloproduktowe lub wieloasortymentowa produkcja nie jest często stosowany, choć takowa produkcja w Polsce w sposób oczywiste istnieje. Jednakże autorzy literatury światowej często używają terminu „multi-product” w oznaczeniu produkcji wielu rodzajów wyrobów w jednym czasie. Już w latach 70-tych ubiegłego wieku termin ten pojawiał się w publikacjach. Doll i Whybark (1973) opisują iteracyjną procedurę bezpośredniego ustalania sub-optimalnych częstotliwości produkcji

dla wielu produktów na jednej maszynie, a także czasu cyklu, który może być użyty, w wielu wypadkach, do konstruowania planów produkcyjnych. W artykule Lambrecht i Vanderveken (1979) analizowano wieloproduktowy, wielostanowiskowy dynamiczny system produkcyjny. Zaprezentowano heurystyczne metody dla liniowych i nieliniowych problemów szeregowania zadań. Problem jest ciągle niewyczerpany, o czym świadczą najnowsze prace taki jak m. in. Hodge i Glazebrook (2011), którzy rozwiązują problem dynamicznego przydzielania zasobów na stanowiskach w wieloproduktowym systemie produkcyjnym. Wykorzystano algorytmy heurystyczne w celu minimalizacji kosztów zapasów. Model problemu opóźnień w szeregowaniu i tworzeniu planów produkcyjnych został opracowany w Ip i in. (2000) oraz Guo i in. (2006) dla wielu produktów w systemie produkcyjnym. W obu artykułach zastosowano algorytm genetyczny w celu uzyskania optymalnego rozwiązania tego problemu w dużej skali (dla wielu stanowisk). Ryan i Vorasayan (2004) używają programowania nieliniowego do kontroli zasobów w systemie gdzie występuje wiele rodzajów produktów. Dodatkowym założeniem jest fakt, iż produkty mogą wiele razy przechodzić przez to samo stanowisko robocze z różnymi czasami operacyjnymi podczas każdej wizyty. Podobny problem kontroli zasobów w wieloproduktowym systemie produkcyjnym z montażem rozwiązywany jest w Park i Lee (2013). W artykule Diaby i in. (2013) pokazano natomiast jak skracać czasy przebrojeń na maszynach oraz zmniejszać liczbę defektów. Celem jest określenie optymalnego poziomu czasu przebrojeń i liczby defektów wraz z odpowiadającymi im optymalnym poziomem nakładów i czasem cyklu dla każdego z wielu rodzajów produktów. Taleizadeh i in. (2013) analizuje wieloproduktowy system produkcyjny z naprawami wadliwych półproduktów na linii. Celem badań jest minimalizacja całkowitych kosztów systemu, w zależności od poziomu obsługi oraz ograniczeń budżetowych. Wieloproduktowość analizowana jest nie tylko dla systemów produkcyjnych. W artykule de Souza Filho i in (2013) opisano badania wieloproduktowego systemu gazociągów, który transportuje zestaw produktów naftowych.

Wielkość produkcji, która charakteryzuje typ organizacji produkcji można podzielić za K. Pasternakiem (2005) na:

- Produkcję jednostkową – charakteryzuje się niepowtarzalnym (lub powtarzalnym w nieregularnych i bliżej nieokreślonych odcinkach czasu) wytwarzaniem pojedynczych (lub najwyżej kilku) wyrobów.

- Produkcję seryjną – to okresowe wytwarzanie oznaczonej liczby (serii) jednakowych wyrobów. Podjęcie produkcji w postaci serii wyrobów nie jest uwarunkowane ich liczbą, lecz podobieństwem i okresowością ich powtarzania.
- Produkcję masową – polega na długotrwałym wytwarzaniu wyrobów w jednym lub kilku zbliżonych do siebie wariantach. W tej sytuacji nie jest istotna liczba wyrobów, lecz ciągłość ich wytwarzania.

Ideą wieloproduktowych systemów produkcyjnych jest wytwarzanie typowych produktów seryjnych przy rozsądnie niskich kosztach oraz zwiększeniu elastyczności wykorzystywanego sprzętu i ścieżek technologicznych. Elastyczność sprzętu jest zazwyczaj zapewniona przez zastosowanie uniwersalnych maszyn (zamiast dedykowanych). W odróżnieniu od elastycznych linii produkcyjnych maszyny te nie są w pełni zautomatyzowanymi urządzeniami. Elastyczność ścieżek technologicznych pozwala na kierowanie półproduktów na równoległe pracujące stanowiska robocze wykonujące tą samą operację technologiczną. Jednakże elastyczność w wieloproduktowych systemach produkcyjnych musi być ograniczona do wytwarzania określonego zakresu wyrobu gotowego, aby nie mieć problemu z ograniczoną wydajnością jak w przypadku elastycznych linii produkcyjnych. To znaczy, że wieloproduktowy system produkcyjny może wytwarzać specyficzne zestawy produktów, które są określone w katalogu firmy (Bitran i Dasu, 1992).

Znaczenie ogólnych problemów dotyczących systemu jako całości wzrasta wraz ze wzrostem złożoności systemów. Naukową, przede wszystkim matematyczną podstawą techniki systemów jest teoria systemów złożonych (Buslenko i in., 1979). Podział systemów rzeczywistych na proste i złożone jest umowny i uzależniony od roli, jaką przy rozpatrywaniu danego systemu odgrywają problemy kompleksowe, dotyczące całości systemu. Zostało przyjęte, że system jest złożony, jeśli składa się z dużej liczby wzajemnie powiązanych i współdziałających ze sobą elementów. Systemy złożone to np. system kierowania lotem samolotów na dużych lotniskach lub kierowania komunikacją miejską, a także system informatyczny, komunikacyjny lub produkcyjny.

Proces produkcyjny rozumiany jest jako proces funkcjonowania systemu złożonego uzasadniając takie podejście tym bardziej im wyższy jest stopień mechanizacji operacji i automatyzacji sterowania poszczególnych operacji i skomplikowanych cykli technologicznych. W literaturze opisującej systemy produkcyjne najczęściej operacje technologiczne są ułożone liniowo lub przepływ jest fragmentami równoległy. Według

Monch (2007) o złożonym systemie produkcyjnym możemy mówić jeśli spełnione są następujące założenia:

- Duża liczba typów produktów ze zmiennymi czasami operacji,
- Różne czasy przebrojeń w zależności od produktów,
- Występowanie niezależnie pracujących równoległych maszyn,
- Różne typy zakłóceń zewnętrznych i wewnętrznych,
- Występowanie procesów ze sprzężeniem zwrotnym.

Jak już wspomniano systemy złożone (szczególnie wieloproduktowe) funkcjonują w warunkach działania wielu czynników przypadkowych i dlatego też wyniki badania pracy systemu złożonego nieuchronnie mają charakter przypadkowy. Zatem jeśli wynikiem funkcjonowania systemu złożonego jest pewne zdarzenie to powinno być ono rozpatrywane jako zdarzenie losowe (Gutenbaum, 1987). Dlatego też podczas badania systemów złożonych wyłania się wiele problemów statystycznych. Jest to spowodowane głównie tym, że podstawowym źródłem wiedzy o charakterystykach systemów złożonych, a szczególnie ich elementów, są obserwacje rzeczywistych systemów w trakcie ich funkcjonowania (Buslenko i in., 1979).

Podsumowując, system, który będzie rozważany w niniejszej pracy to złożony wieloproduktowy system produkcyjny, w którym występują procesy dyskretnie. Uwaga skupiona będzie głównie na zautomatyzowanych procesach wytwórczych. Rozważana wielkość produkcji, która charakteryzuje typ organizacji produkcji to produkcja masowa.

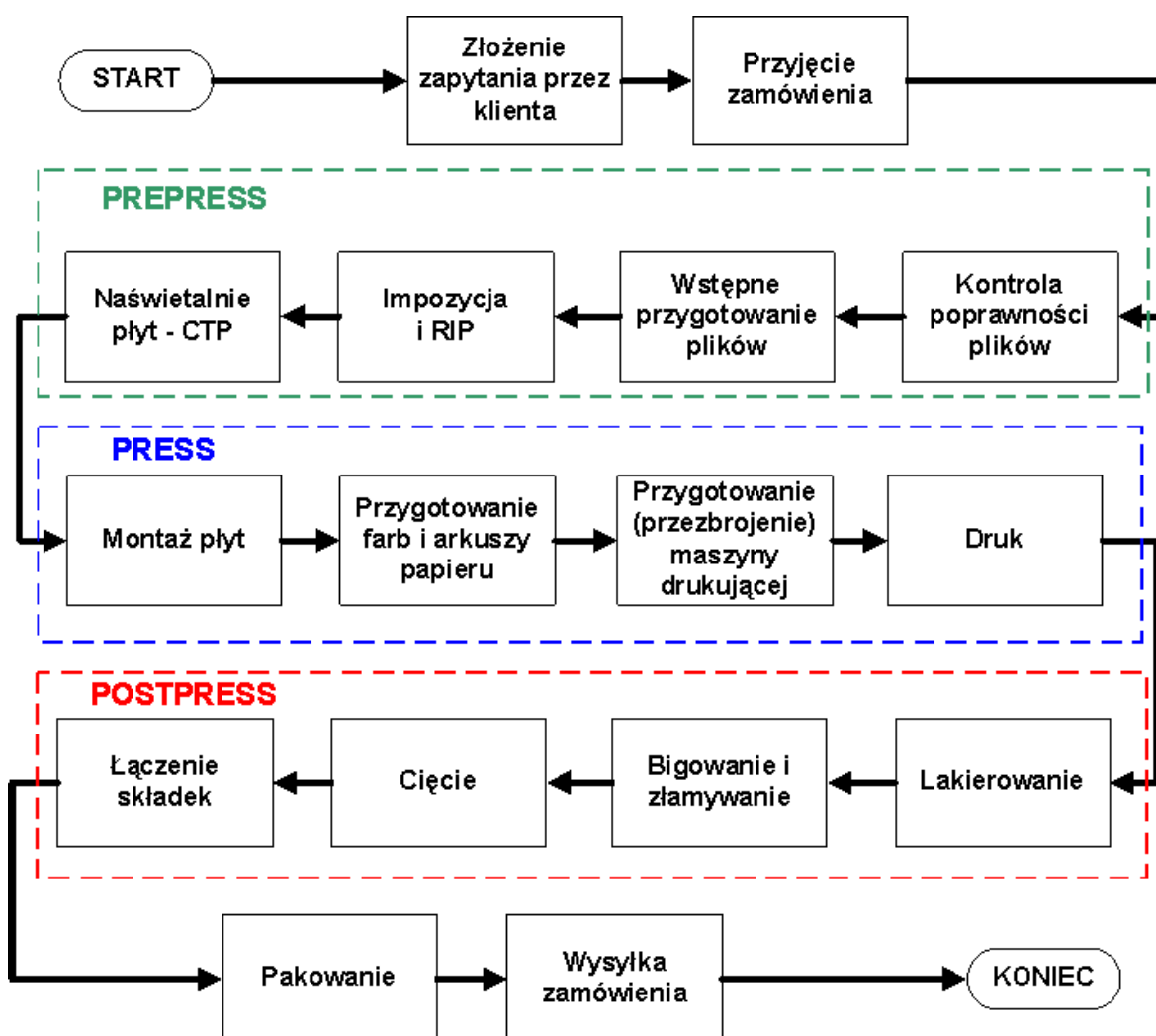
1.1.2 Analiza systemu produkcji poligraficznej

Systemy produkcji poligraficznej należą obok innych systemów produkcyjnych takich jak: systemy produkcji części motoryzacyjnych, systemy produkcji układów scalonych do złożonych, wieloproduktowych systemów. W praktyce produkcja poligraficzna opiera się głównie na druku offsetowym – jest to przemysłowa odmiana druku płaskiego, w której obraz przenoszony jest z płaskiej formy drukowej na podłoże drukowe (np. papier) za pośrednictwem cylindra pośredniego pokrytego obciążeniem. W odróżnieniu od druku cyfrowego, w którym formą drukową jest sam zapis cyfrowy. W urządzeniu drukującym brak jest formy drukowej. Obraz drukowy tworzony jest w cyfrowej maszynie drukarskiej,

bezpośrednio w miejscu, z którego rozpoczyna się druk. W tej pracy uwaga zostanie poświęcona systemom poligraficznym opartym na druku offsetowym, gdyż jest to obecnie jedna z najczęściej stosowanych technik druku w dużych drukarniach. Zatem maszyna offsetowa to najistotniejszy element w drukarni, ale należy pamiętać, iż proces druku składa się z innych licznych procesów, a nie tylko samego wydruku. Proces druku najogólniej można rozłożyć na trzy etapy:

- Prepress (przygotowanie do druku)
 - Wstępne przygotowanie - opracowanie wszystkich elementów graficznych (retusz, poprawienie kolorów, jasności i kontrastu, kadrowanie, skalowanie, zapisanie w odpowiednim formacie i rozdzielczości, nadanie odpowiedniego profilu koloru).
 - Impozycja - zaprojektowanie w programie obrazu całego arkusza druku oraz układu stron składki.
 - RIP (ang. *raster image processor*) – urządzenie lub oprogramowanie komputerowe, które umożliwia zamianę obrazu ciągłotonalnego na obraz rastra (siatki drukowanych punktów).
 - Naświetlanie metodą CTP (ang. *computer to plate*) – bezpośrednie naświetlanie formy drukowej na specjalnych płytach.
- Press (drukowanie)
 - Przygotowanie maszyny drukującej – zamontowanie naświetlonych płyt, farb, arkuszy papieru.
 - Wydruk na offsetowej maszynie drukującej.
- Postpress - prace wykończeniowe (introligatorskie) – procesy mające na celu nadanie ostatecznej formy i kształtu lub uszlachetniające druk.
 - Lakierowanie – nadawanie połysku, które jednocześnie może spełniać funkcję ochronną.
 - Bigowanie - robienie wgnieceń w postaci rowków w celu ułatwienia późniejszego zginania papieru.
 - Złamywanie - składanie papieru (np. składanie na pół broszur lub składanie całych arkuszy publikacji w wielostronicowe składki).
 - Cięcie na wymiar gotowych publikacji (obcięcie spadów).
 - Łączenie poszczególnych składek w gotowe publikacje razem z okładkami metodą szycia lub klejenia.

Na rysunku 1.3 przedstawiono schemat opisywanego procesu produkcyjnego w drukarni offsetowej.



Rys. 1.3 Proces produkcyjny w drukarni offsetowej

Technologia druku offsetowego jest najczęstszym sposobem drukowania większości popularnych produktów poligraficznych zarówno na rynku wydawniczym, czyli książki, czasopisma, gazety, jak i akcydensowym (komercyjnym – druk na specjalne wydarzenia i okazje o charakterze użytkowym) – ulotki, plakaty, broszury, wizytówki, a także bilety, znaczki, metki, etykiety oraz inne. Technologia druku offsetowego jest obecnie dobrze ugruntowana i dojrzała. Ze względu na szerokie rozpowszechnienie tej technologii na świecie, marże pozostają na niskim poziomie. Firmy, które chcą przetrwać na konkurencyjnym rynku muszą rywalizować poprzez podniesienie wydajności procesu produkcyjnego. Można tego dokonać poprzez modernizację sprzętu (zakup nowych maszyn) lub zmiany organizacyjne. Modernizacja sprzętu jest bardzo droga, ceny maszyn

drukarskich liczone są w milionach euro, a ich wydajność nie rośnie od kilku lat. Zatem optymalne planowanie produkcji pozwala na efektywne wykorzystanie dostępnego sprzętu bez nakładów inwestycyjnych. Otwiera się tutaj możliwość dla wykorzystania dynamicznie przydzielanych reguł priorytetowych na poszczególnych etapach procesu produkcji poligraficznej w celu optymalnego uszeregowania zadań w kolejkach. Problem szeregowania zadań w kolejkach w systemie poligraficznym jest jeszcze bardziej skomplikowany niż w innych wieloproduktowych, złożonych systemach produkcyjnych. W procesie poligraficznym występują procesy podziału oraz montażu - na przykład w zadaniu wydruku książki występuje rozdzielenie zlecenia przed etapem naświetlania na oprawę i poszczególne składki, które przez poszczególne pozostałe operacje w systemie mogą przejść osobno, a przed zszyciem lub sklejeniem na końcu ich ścieżki technologicznej należy ponownie zebrać w całość.

Kolejnym faktem, który komplikuje problem szeregowania w systemach poligraficznych, jest to, iż asortyment wytwarzanych produktów jest bardzo złożony. Każde zlecenie składa się nie tylko z rodzaju produktu, ale też personalizowanych zmiennych czynników, które w każdym zleceniu mogą być inne, jak: nakład, ilość stron (broszury albo książki), rodzaj papieru, wielkość papieru, elementy wykańczające. To wszystko oddziałuje na czasy przebiegów, a także czasy samych operacji technologicznych dla nawet tych samych typów produktów.

1.2. Charakterystyka problemu oceny efektywności wieloproduktowych systemów

Badając złożone, wieloproduktowe systemy produkcyjne dochodzi się do momentu, w którym należy ocenić lub porównać ze sobą analizowane systemy pod kątem przeprowadzonych zmian czy nawet optymalizacji. Istnieją przynajmniej trzy rodzaje problemów oceny efektywności systemów (Kim i Nelson, 2006):

- Typowanie systemu z najmniejszą lub największą miarą danego wskaźnika efektywności
- Porównanie alternatywnych rozwiązań wobec rozwiązania standardowego

- Wybieranie systemu z największym prawdopodobieństwem sukcesu przy danych ustawieniach

Z definicji, efektywność to rezultat podjętych działań, opisany relacją uzyskanych efektów do poniesionych nakładów. Oznacza najlepsze efekty produkcji, dystrybucji, sprzedaży, promocji (Stoner, 1994). Efektywność dotyczy tego, co wydarzyło się w przeszłości lub co dzieje się w teraźniejszości, a zatem jest to zauważalne i wymierne. Efektywność należy do właściwości przesądzających o istocie przedsiębiorstwa jako podmiotu gospodarującego, warunkuje ona funkcjonowanie organizacji i determinuje jej rozwój (Osbert-Pociecha, 2007). Inna definicja, zawierająca już elementy składające się na efektywność w rozumieniu produkcyjnym mówi, iż, przedsiębiorstwo uważa się za efektywne, kiedy w pełni wykorzystuje posiadane przez siebie zasoby do wytwarzania produktów, na które występuje zapotrzebowanie na rynku, przy czym działalność tę musi prowadzić bez zbędnego gromadzenia zapasów (Sulmicki, 1978). Na ocenę efektywności organizacji składają się czynniki ekonomiczne oraz pozaekonomiczne. Kategoria czynników ekonomicznych może być ujęta w podejściu finansowym oraz produktywnościowym. Autorzy literatury światowej, analizujący złożone systemy produkcyjne, oceniają je zarówno w jednym jak i drugim z wymienionych wyżej kontekstów.

Właściwości systemów złożonych oceniane są najczęściej za pomocą charakterystyk liczbowych. Każda charakterystyka liczbową wykorzystywana do oceny właściwości systemu złożonego powinna spełniać warunki (Hon, 2005):

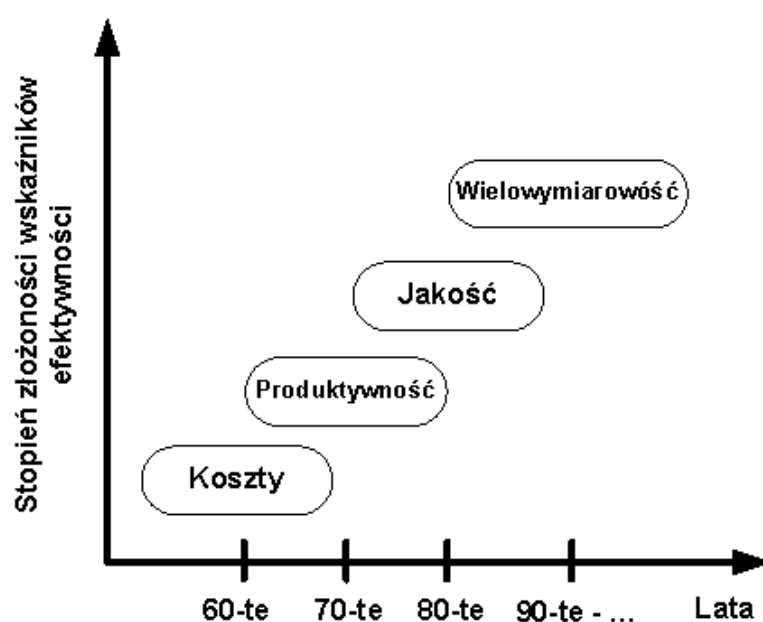
- Odzwierciedlać aktualny stan systemu,
- Wyrażać wielkość zależną od procesu funkcjonowania systemu, którą w miarę łatwo można określić na podstawie matematycznego opisu systemu,
- Dawać poglądowe wyobrażenie o jednej z rzeczywistych właściwości systemu,
- Prowadzić do zmian powodujących lepsze działanie systemu,
- Pozwalać na przeprowadzenie przybliżonej oceny skuteczności decyzji na podstawie danych eksperymentalnych.

Do charakterystyk liczbowych zależnych od procesu funkcjonowania systemu złożonego można zaliczyć wskaźniki efektywności. Dowolny system złożony można rozpatrywać jako obiekt przeznaczony do wykonania pewnego określonego rodzaju prac lub rozwiązywania dostatecznie dokładnie określonej klasy zadań. Proces funkcjonowania systemu złożonego przedstawia się przy tym jako zbiór działań elementów systemów podporządkowanych jednemu celowi. Pomiar efektywności jest niezbędny dla przedsiębiorstw produkcyjnych. Jeżeli efektywność nie może być zmierzona, wówczas nie może być odpowiednio kontrolowana. Podczas gdy pomiary mogą być wykonane bardzo dokładnie dzięki postępom w dziedzinie symulacji komputerowej, pomiar efektywności produkcji pozostaje nieustannie przedmiotem uwagi, ze względu na różnorodny i wielowymiarowy charakter produkcji. Jakość pracy systemu złożonego można oceniać za pomocą wskaźników efektywności. Pod podjęciem wskaźnika efektywności systemu złożonego rozumiemy taką charakterystykę liczbową, która określa stopień przystosowania systemu do wykonania podstawionych przed nim zadań (Buslenko i in., 1979).

Rozpatrując dowolny proces produkcyjny jako system złożony odnotowujemy, że celem jego funkcjonowania jest produkcja określonego rodzaju wyrobów. Następują różne warianty wyboru wskaźnika efektywności dla tego systemu. Kaplan i Norton (1996) przekładają misję przedsiębiorstwa na kompleksowy zestaw wskaźników efektywności, który zapewni ramy dla strategicznego i operacyjnego zarządzania. Obecnie powszechnie przyjmuje się, że konieczne jest, aby zmierzyć wszystkie rodzaje wskaźników efektywności, takich jak koszty, szybkość, niezawodność itp. Podstawowe wskaźniki efektywności w analizie systemów produkcyjnych to:

- Cykl produkcyjny
- Ilość produkcji w toku
- Wydajność mierzona średnią liczbą wyrobów produkowanych w ciągu danego przedziału czasu
- Czas oczekiwania do obsługi w kolejkach przed stanowiskami produkcyjnymi
- Długość kolejek
- Koszty magazynowania
- Koszty w zależności od opóźnienia w realizacji zamówienia

Przy tego typu wskaźnikach efektywności chcąc udoskonalić proces produkcyjny najwięcej uwagi należy poświęcać czynnikom sprzyjającym zwiększeniu wydajności. Omija się wówczas inne aspekty organizacji procesu produkcyjnego, niezwiązane bezpośrednio z wydajnością, takie jak jakość wyrobów, oszczędność surowców, energii, funduszu płac itp. Wskaźniki efektywności nie są nowe. Istnieją odkąd zaistniała potrzeba mierzenia i porównywania systemów produkcyjnych. Jednakże nacisk na poszczególne grupy wskaźników był inny w różnych okresach czasu. Ewolucyjny proces zmian podejścia do wskaźników efektywności pokazuje rysunek 1.4. W latach 60-tych ubiegłego wieku większość miar efektywności opierało się o czynniki związane z kosztami, automatyzacją i miarą produktywności pracowników. Wskaźniki lat 70-tych kładły główny nacisk na wszelkiego rodzaju produktywność oraz związane z nią miary finansowe. Ze względu na trudności w obliczaniu tego rodzaju wskaźników efektywności, w praktyce nie były one zawsze dokładne oraz trudne do interpretacji. Wobec tego w latach 80-tych nastąpił zwrot w kierunku wskaźników jakościowych zgodnych z podejściem kompleksowego zarządzania jakością (ang. *Total Quality Management*), w którym każdy aspekt działalności jest realizowany z uwzględnieniem spojrzenia projakościowego. W latach 90-tych i później wskaźniki efektywności stały się wielowymiarowe, obejmujące więcej niż jeden aspekt środowiska produkcyjnego. Skutkiem tego samo mierzenie oraz analizowanie wskaźników a przez nie systemów produkcyjnych stało się bardziej skomplikowane.



Rys. 1.4 Ewolucja wskaźników efektywności

Prawidłowego określania właściwości systemu na podstawie jego struktury oraz wartości parametrów nie można dokonać tylko za pomocą oceny zachowania się systemu w różnych warunkach funkcjonowania. Dane ilościowe o zachowaniu się systemu można uzyskać eksperymentalnie (np. symulacyjnie), jeżeli dostępne są obserwacje zachowania się odpowiednich obiektów rzeczywistych lub na drodze obliczeń jeżeli mamy matematyczny opis systemu, który w przypadku systemów złożonych jest bardzo trudny lub wręcz niemożliwy. Oprócz tego, że zarówno jeden, jak i drugi sposób otrzymywania danych ilościowych wiąże się z określonymi trudnościami, istnieje jeszcze problem pogładowej interpretacji danych, pozwalający rozwiązywać ważne zadania teoretyczne i praktyczne. W tym celu zestawy informacji opisującej stany systemu w różnych chwilach oraz przy różnorodnych warunkach powinny zostać sprowadzone do niewielkiej liczby uogólnionych charakterystyk.

W tej pracy przyjęte wskaźniki efektywności zostały opisane przy pomocy modelu matematycznego w podrozdziale 2.4.3, jako funkcje kryterialne modelu oceny wieloproduktowego, złożonego systemu produkcyjnego. Opierają się one w głównej mierze na podstawowych wskaźnikach systemów produkcyjnych takich jak: czas oczekiwania zleceń w kolejkach przed stanowiskami produkcyjnymi, produktywność systemu, ilość produkcji w toku, a także opóźnienia w wykonywaniu zleceń oraz ich pochodnych.

1.3 Modelowanie złożonych systemów przy użyciu dyskretnej symulacji komputerowej

Analiza wieloproduktowych, złożonych systemów jest trudnym zadaniem ze względu na trudności, które pojawiają się, gdy losowość jest osadzona w systemie. Niestety losowość jest powszechną i nieuniknioną cechą wśród systemów rzeczywistych. Komputerowe modelowanie i symulacja pozwala odzwierciedlić złożoną strukturę takie jak dynamiczne zachowanie się systemu produkcyjnego uwzględniając w pełni jego stochastyczność (Wang i Chatwin, 2005).

Definicja modelu systemu będzie rozumiana jako: zbiór założeń, pojęć i zależności między nimi, pozwalający opisać (zamodelować) w przybliżony sposób jakiś aspekt

rzeczywistości. W powyższej definicji należy zwrócić szczególną uwagę na pojęcie przybliżony. Model ujmuje tylko część rzeczywistości, jest pozbawiony wielu szczegółów i cech nieistotnych z punktu widzenia celów modelowania. Celem budowy modeli systemów może być (Buslenko i in. 1979, Popov 2004):

- opis i wyjaśnienie mechanizmu działania systemu (systemy produkcyjne, biologiczne, informatyczne),
- przewidywanie zachowania się systemów w przyszłości i przy różnorodnych warunkach działania otoczenia na system (systemy ekonomiczne, produkcyjne),
- wybór właściwych oddziaływań wejściowych, spełniających określone warunki (systemy sterowania),
- wybór struktury lub parametrów systemu, spełniającego określone zadania (wszelkie systemy techniczne).

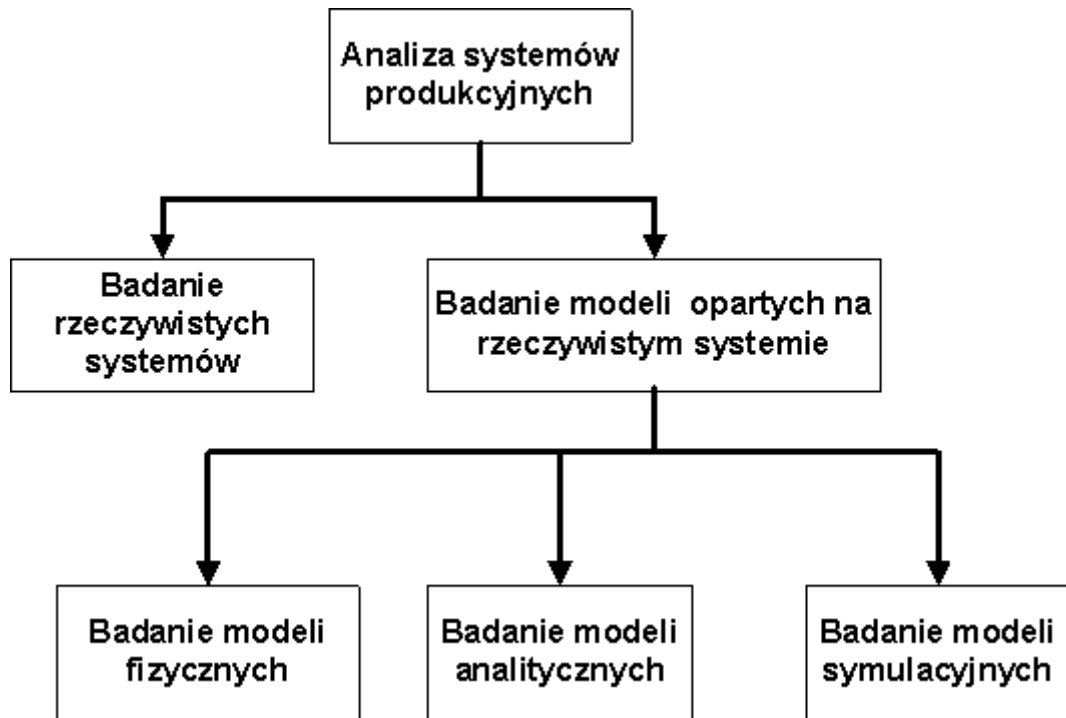
Pojęcie modelowania symulacyjnego pojawia się podczas tworzenia za pomocą komputera modeli systemów rzeczywistych. Zatem symulacja komputerowa to odtworzenie działania badanego systemu rzeczywistego na podstawie jego modelu matematycznego oraz zbadanie zmiennych wpływów otoczenia (zmienne wejściowe) i wewnętrznych właściwości systemu (parametry modelu) na charakterystyki systemu (Klempka i Stankiewicz, 2004). Wykorzystuje się tu pojęcie modelu matematycznego, który jest zbiorem symboli i relacji matematycznych oraz bezwzględnie ścisłych zasad operowania nimi, przy czym zawarte w modelu symbole i relacje mają interpretację odnoszącą się do konkretnych elementów modelowanego wycinka rzeczywistości. Modelowanie matematyczne polega na tworzeniu modeli matematycznych i wykorzystaniu aparatu matematycznego do ich analizy. Modelowanie i symulacja znalazły szerokie zastosowanie m.in. w ekonomii, przemyśle, fizyce, informatyce, chemii, biologii, biznesie, wojsku i wielu innych dziedzinach.

Odpowiednio zbudowany model symulacyjny umożliwia zbadanie działania układu na drodze doświadczalnej (obliczeniowej) bez konieczności budowy modelu fizycznego. Podejście takie umożliwia dowolną modyfikację parametrów modelu, typów i wartości wielkości wejściowych oraz wyznaczenie interesujących nas wielkości wyjściowych w sposób niewymagający dodatkowych nakładów finansowych. Istnieje kilka sposobów na sklasyfikowanie modelowania symulacyjnego. Pierwszym kryterium może być charakter

modelu symulacyjnego. Istnieją dwa główne typy modeli: dyskretne i ciągłe (Banks i in., 2001). Symulacja dyskretna charakteryzuje się wykorzystaniem funkcji dyskretnych w opisie formalnym charakterystyk zmiennych stanu systemu (zmiana stanu systemu jako funkcja dyskretna w losowych momentach czasu). Zatem do opisu zjawiska upływu czasu także wykorzystuje się funkcje dyskretne. Natomiast w symulacji ciągłej wykorzystuje się funkcje ciągłe do opisu formalnych charakterystyk zmiennych stanu systemu (zmiana stanu systemu jako funkcja ciągła). Zjawisko upływu czasu także są opisane za pomocą funkcji ciągłych lub quasi-ciągłych. Symulacje ciągłe są realizowane za pomocą stałego kroku czasowego, im mniejszy krok tym większa dokładność przybliżenia czasu. W ramach tych głównych typów istnieją podtypy. Symulacja typu Monte-Carlo (statyczna metoda symulacji polegająca na losowaniu wielkości charakteryzujących proces, przy czym losowanie dokonywane jest zgodnie z rozkładem, który musi być znany) (Glynn, 1986), symulacja czasu dyskretnego (Pidd, 1998), dyskretna symulacja zdarzeniowa (Law i Kelton, 2000) to wszystko podtypy symulacji dyskretnej. Jeżeli chodzi o zastosowanie poszczególnych typów modeli symulacyjnych to symulacje czasu dyskretnego są zwykle używane do modeli ekonomicznych, podczas gdy dyskretna symulacja zdarzeniowa jest szeroko stosowane w zarządzaniu, badaniach operacyjnych, przede wszystkim w produkcji, systemach komputerowych, procesach biznesowych oraz wojskowych (Robinson, 2002). Na ogół, te modele są wykorzystywane do eksperymentów statystycznych.

Modelowanie symulacyjne jako narzędzie ewaluacji złożonych systemów stochastycznych ułatwiło możliwość uzyskania szacunkowych pomiarów efektywności w ramach danej konfiguracji systemu (Scott i Harmonosky, 2005). Rysunek 1.5 przedstawia metody analizy systemów produkcyjnych.

Ponadto symulacja jest bardzo potężnym narzędziem, często używane w fazie projektowania systemów produkcyjnych. Porównywanie różnych alternatywnych układów systemu może być badana za pomocą symulacji (Gregor i Skorik, 2010). Raz stworzony model może być używany do eksperymentów statystycznych. Możliwie dowolnie długie przebiegu symulacyjne oraz dowolna liczba replikacji danego eksperymentu symulacyjnego pozwala osiągnąć wiarygodne rezultaty. Alternatywnie modele symulacyjne mogą być używane interaktywnie. Jest to rodzaj symulacji przesuwający ją w sferę gier komputerowych oraz modelowania interakcji człowiek-maszyna (Moffat, 2000). W niniejszej pracy symulacja rozważana będzie w pierwszym z wyżej wymienionych znaczeń, czyli jako metoda eksperymentów statystycznych.



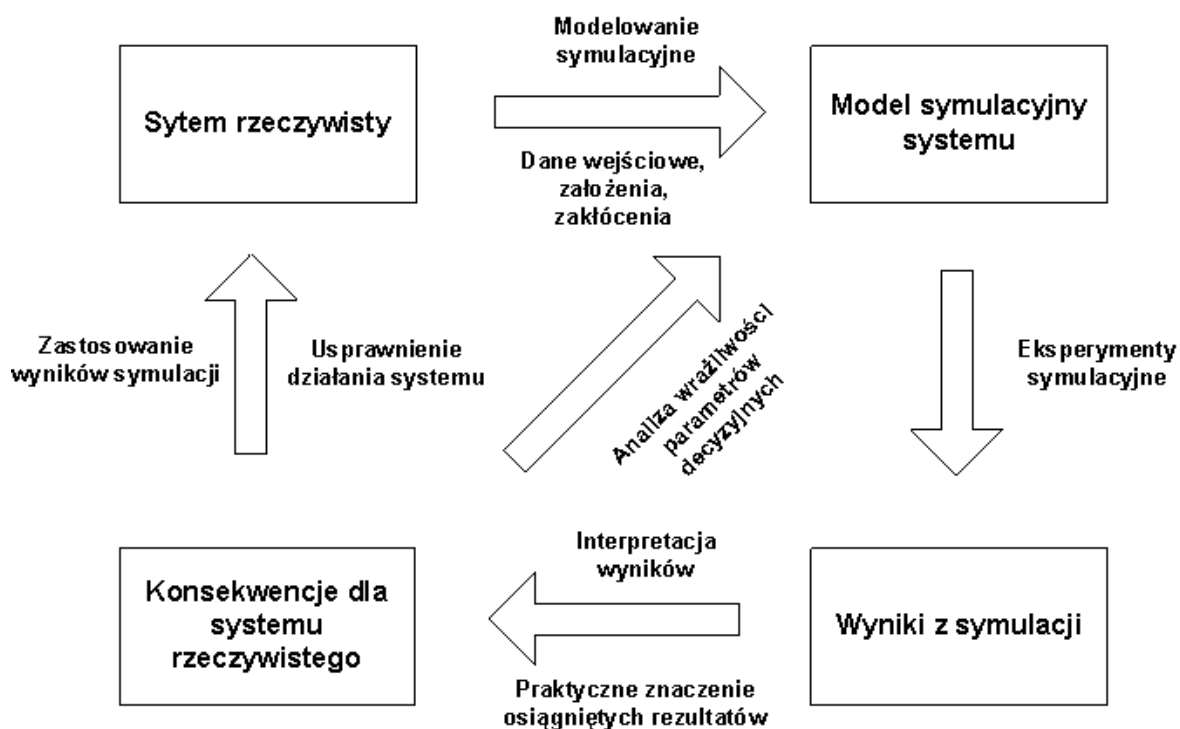
Rys. 1.5 Metody analizy systemów produkcyjnych

Modelowanie symulacyjne to nie tylko przeprowadzenie eksperymentów. Główne etapy modelowania symulacyjnego systemów to:

- definiowanie problemu
- gromadzenie wiedzy i danych
- budowa modelu konceptualnego
- implementacja modelu
- weryfikacja i walidacja modelu
- plan eksperymentów
- realizacja eksperymentów symulacyjnych
- analiza rezultatów
- dokumentowanie (wdrożenie wyników)

Podstawowe użycie modelowania rzeczywistych systemów z wykorzystaniem symulacji zostały pokazane na rysunku 1.6. Ukazuje on uproszczony system rzeczywisty, który jest przedmiotem zamodelowania. Po weryfikacji i walidacji modelu symulacyjnego, przeprowadzone zostają eksperymenty z dowolnie długim czasem symulacji lub liczbą replikacji danego wariantu. Wyniki eksperymentów symulacyjnych mogą być wdrożone

aby usprawnić rzeczywisty system lub mogą powodować zmiany w ustawieniach samego modelu symulacyjnego.



Rys. 1.6 Modelowanie systemów z wykorzystaniem symulacji komputerowej

Korzyści wynikające z zastosowania symulacji w analizie systemów produkcyjnych są dobrze znane. Liczne zastosowania symulacji zostały opublikowane m.in. w obszarach: planowania budowy hali produkcyjnej, rozmieszczenia zasobów produkcyjnych, szeregowania zadań w systemie produkcyjnym, a także analizie zapasów.

Mourani i in. (2008) używają modelu symulacyjnego w celu optymalizacji długoterminowych kosztów zapasów w prostym systemie produkcyjnym z możliwymi awariami maszyn. Autorzy Monch (2007), Kumar (1994), Li i in. (1996) wykorzystują symulacje złożonych systemów produkcyjnych na przykładzie systemów produkcji płyt półprzewodników. W tychże artykułach pokazano jak dobór odpowiedniej strategii priorytetów pozwala na zwiększenie efektywności produkcji. S. Van Volsem i in. (2005) rozważa wielostanowiskowy i wieloproduktowy system produkcyjny z kontrolą jakości produktów podczas kolejnych etapów ich wytwarzania. Model symulacyjny wykorzystano wraz z algorytmem ewolucyjnym do optymalizacji kosztów kontroli jakości. Także w artykule Eid i in. (1997) pokazano wpływ decyzji kontroli jakości na proces produkcyjny –

jego koszty i potencjalne zyski na podstawie modelu symulacyjnego systemu produkcyjnego.

Inne badania pokazują wykorzystanie symulacji do znalezienia optymalnych wielkości partii produkcyjnych w celu zmniejszenia czasu cyklu produkcyjnego oraz lepszego wykorzystania zasobów (Habchi i Labrune, 1995, Bozer i Kim, 1996). Wieloproduktowy system produkcyjny został zamodelowany symulacyjnie w Li i in. (1996). W artykule wykorzystano także metodykę planowania eksperymentów w celu określenia wpływu czynników takich jak błędy w prognozach planistycznych, zmienność procesu na kluczowe parametry wydajnościowe systemu. Frantzen i in. (2011) zaprezentował praktyczne zastosowanie symulacji oraz metody szeregowania zadań w złożonym systemie produkcyjnym na przykładzie produkcji części samochodowych w jednym z przedsiębiorstw w Szwecji. Problem szeregowania podjęty został także w artykule Gue i in. (2011), gdzie model symulacyjny dekomponuje problem szeregowania na podproblemy, które są rozwiązywane dla mniejszych części całego systemu. Mishra i Pandev (1989) oraz Kosturiak i Gregor (1995) wykorzystują symulacje oraz metodykę planowania eksperymentów do analizy elastycznych systemów produkcyjnych. W artykule Li i in. (2009) wykorzystano symulację komputerową oraz algorytmy genetyczne do optymalizacji procesu napraw zwróconych produktów przez klientów. Proces wytwarzania wraz z operacjami montażu został przedstawiony w Ramaswamy i Yan (1997) jako interaktywne środowisko wirtualne. Symulacja pomogła usprawnić proces montażu, kierunku przepływu półproduktów oraz zmiany w poszczególnych operacjach technologicznych. Ten krótki przegląd literatury z zastosowań symulacji pokazuje jak szeroko jest ona wykorzystywana w modelowaniu i analizie systemów produkcyjnych. Przeprowadzono badania, które pokazują wysoki poziom satysfakcji tych, którzy korzystają z symulacji komputerowej. Jednakże, to samo badanie pokazuje obawy związane z szybkością budowy modeli oraz analizą danych (Ball, 1998). Zatem do zalet modelowania symulacyjnego można zaliczyć:

- możliwość analizy zachowania systemu w różnych warunkach
- odseparowanie zakłóceń
- mniejszy koszt niż badania rzeczywistych systemów
- powtarzalność eksperymentów
- analiza nieistniejących systemów

Natomiast najczęściej wymieniane wady modelowania symulacyjnego to:

- potrzebne duże doświadczenie w budowie modeli
- uproszczenie rzeczywistości
- czasami czasochłonna realizacja badań symulacyjnych
- problemy oszacowania wiarygodności rezultatów

Symulacja jest także bardzo pomocna i szeroko wykorzystywana do analizowania złożonych systemów stochastycznych. Jest ona wykorzystywana wszędzie tam gdzie skonstruowanie modeli matematycznych lub fizycznych jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe w dokładnej analizie złożonych systemów (Mansharamani 1997, AL-Ahmari i Ridway 1999, O’Kane i in. 2000). Natomiast obserwacje rzeczywistych obiektów zaliczanych do systemów złożonych dowodzą, że funkcjonują one w warunkach działania dużej liczby czynników przypadkowych. Najczęstsze źródła losowości w systemach produkcyjnych to:

- rozkłady czasu przybycia zlecenia na dany produkt,
- czasy operacji lub montażu danego zlecenia na stanowisku produkcyjnym (ze względu na złożoność samego zamówienia oraz liczbę możliwych typów zamówień),
- awarie maszyn lub zawodność ich operatorów
- czasy przebrojeń na maszynach

Dlatego też przewidywanie zachowania się systemu złożonego może mieć sens tylko w zakresie prawdopodobieństwa. Inaczej mówiąc zdarzenia oczekiwane mogą być określone tylko prawdopodobieństwem ich wystąpienia, a odnośnie do wartości pewnych wielkości musimy zadowolić się regułami ich rozkładu lub innymi charakterystykami probabilistycznymi (wartości średnie, wariancje itp.). Taki system nie nadaje się do zamodelowania go przy użyciu sieci kolejkowych lub innych metod analitycznych, a tym samym jest zazwyczaj analizowany za pomocą symulacji (Sooyoung i in, 2006). Najważniejsze ograniczenia w modelowaniu analitycznym złożonych systemów według Wang i Chatwin (2005) to:

- W modelach analitycznych złożonych systemów, w których wiele elementów występuje w sposób nieliniowy oraz często losowo nie może być dokładnie odzwierciedlonych.
- Dynamiczne systemy produkcyjne obejmują losowości, które zmieniają się wraz z upływem czasu, np. linia montażowa, na której półprodukty są montowane zmiennie w czasie. Modelowanie takich złożonych systemów za pomocą modeli matematycznych wymaga zbyt wielu uproszczeń, co może powodować niepraktyczność uzyskanych wyników.
- Metody analityczne są często niewystarczające dla optymalizacji złożonych systemów ponieważ model matematyczny może być zbudowany w oparciu o zbyt wiele uproszczeń. Prowadzi to do tego, iż dokładność wyników często staje głównym problemem dla optymalizacji systemu.

Do badania procesu funkcjonowania każdego systemu złożonego z uwzględnieniem czynników przypadkowych niezbędna jest dostatecznie dokładna informacja dotycząca źródeł oddziaływań przypadkowych oraz dysponowanie pewnymi danymi o ich charakterystykach ilościowych (Buslenko i in., 1979). Dlatego dowolne obliczenia lub analiza teoretyczna związana z badaniem systemów złożonych muszą być poprzedzone eksperymentalnym gromadzeniem materiału statystycznego, charakteryzującego zachowanie się w realnych warunkach zarówno poszczególnych elementów, jak i całości systemu. Przetworzenie tego materiału pozwala na otrzymanie danych wejściowych do obliczeń lub analizy.

W niniejszej pracy wykorzystywana jest dyskretna symulacja komputerowa, za pomocą której zbudowany został model złożonego, wieloproduktowego systemu produkcyjnego na przykładzie przedsiębiorstwa poligraficznego. Dzięki wynikom eksperymentów symulacyjnych otrzymano materiał statystyczny, który może zostać wykorzystany do optymalizacji badanego systemu lub przeanalizowany pod kątem wspomaganie decyzji zarządzania tym systemem.

Rozdział 2

Wykorzystanie dynamicznych reguł priorytetowych w systemach wieloproduktowych

2.1 Charakterystyka problemu szeregowania zadań

Problem szeregowania zadań/zleceń jest jednym z najbardziej krytycznych w planowaniu i zarządzaniu wszelkimi procesami. Efektywne szeregowanie jest jednym z kluczowych czynników w kierunku poprawy skuteczności systemów, szczególnie w przypadku wielu produktów. Problem zazwyczaj opisywany jest w następujący sposób: istnieje określona ilość zadań do wykonania w pewnym okresie czasu, każde zadanie składa się z jednego lub większej liczby operacji do wykonania, które muszą być wykonane w określonej kolejności oraz na określonych maszynach. Celem jest ustalenie harmonogramu pracy, który minimalizuje miary wydajności systemu (opóźnienia wykonania zadań, ilość półproduktów w systemie, średni czas wykonania zadania itp.) (Rajendran i in. 1999).

Harmonogramowanie produkcji (ang. *Production scheduling*) jest ściśle związane z planowaniem produkcji. Polega na:

- rozłożeniu w czasie przydziału zasobów do zleceń produkcyjnych,
- podziale zleceń na partie produkcyjne,
- określeniu terminów rozpoczęcia i zakończenia realizacji partii produkcyjnych na poszczególnych maszynach.

Harmonogramowanie produkcji w warunkach niepewności sprowadza się do uwzględnienia możliwych zakłóceń produkcyjnych. Zasadniczo wyróżnia się dwa podejścia do tego problemu:

- harmonogramowanie dynamiczne (ang. *Dynamic scheduling*)
- harmonogramowanie predyktywno-reaktywne (ang. *Predictive-reactive scheduling*)

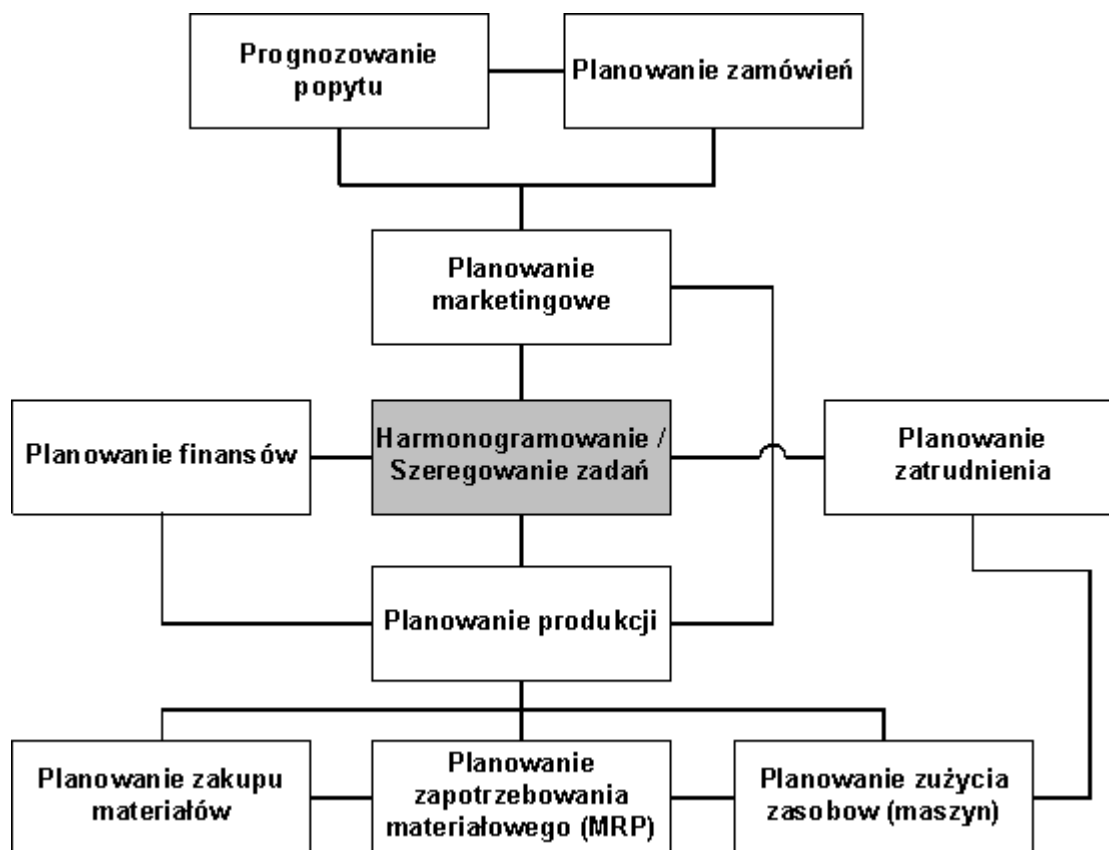
W środowiskach o bardzo dużej zmienności pomijana jest faza planowania i stosowane jest podejście określane jako tzw. dynamiczne harmonogramowanie. Problem harmonogramowania w warunkach niepewności analizowany jest wtedy jako zagadnienie minimalizacji wpływu możliwych zmian w czasach realizacji zadań.

Klasyczną metodą harmonogramowania produkcji jest szeregowanie zadań. Część autorów terminów harmonogramowanie i szeregowanie używa zamiennie. Termin harmonogramowanie używane jest częściej kiedy mówi się o przydzielaniu zasobów w czasie, gdzie najważniejszą rolę gra czas. Terminu szeregowanie natomiast używa się gdy w przydzielaniu zasobów nacisk kładziony jest na dobór odpowiednich maszyn i ustalenie kolejności.

Szeregowanie (ang. *scheduling*) to wyznaczenie takiego rozdziału w czasie i przestrzeni dostępnych zasobów produkcyjnych, by spełniając założenia projektowe, uzyskać najlepsze możliwe rozwiązanie zaspokajające zapotrzebowanie na produkowane wyroby. Należy tak pokierować przepływem zadań poprzez zbiór maszyn, aby uzyskać rozwiązanie najkorzystniejsze. Wyróżnia się przepływowe zagadnienie kolejnościowe (ang. *flow-shop*), np. linia montażowa oraz ogólne zagadnienie kolejnościowe (ang. *job-shop*), w tym szeregowanie zadań na maszynach równoległych.

Na rysunku 2.1 przedstawiono jak ważną rolę w planowaniu działań całego przedsiębiorstwa odgrywa szeregowanie zadań/zleceń. Szeregowanie pozwala zarówno dostosowywać średnio i długookresowe plany produkcyjne do potrzeb rynkowych, a także umożliwia lepiej wykorzystać zasoby produkcyjne (ludzkie, maszynowe, materiałowe) w planowaniu krótkoterminowym.

Rozwiązaniem problemu szeregowania zadań jest uszeregowanie, czyli ustalona kolejność wykonywania operacji na poszczególnych maszynach. Natomiast zbudowanie harmonogramu to wyznaczenie momentów, w których rozpoczyna się realizacja tych operacji. Szeregowanie operacji w systemie produkcyjnym pozwala zwiększyć wydajność oraz zmniejszyć koszty pracy systemu.



Rys. 2.1 Rola szeregowania w planowaniu

Wydajność zwiększa się poprzez lepsze wykorzystanie zasobów (maszyn i urządzeń), obniżenie kosztów produkcji, można uzyskać poprzez zmniejszenie ilości operacji, transportowych i zmniejszenie czasu przebywania zadań (materiałów, wyrobów) w systemie. Wykorzystywane są tu często algorytmy konstrukcyjne oparte na regułach priorytetowych (wolnej w danej chwili maszynie przydzielana jest gotowa do wykonania operacja z najwyższym priorytetem). Wyróżnia się dwa typy szeregowania:

- Szeregowanie statyczne (ang. *Static/pre-run-time/offline scheduling*) – plan przydziału zadań do zasobów sporządzany jest z góry. Warunkiem stosowalności metody jest aprioryczna znajomość zadań wraz z ich charakterystykami czasowymi
- Szeregowanie dynamiczne (ang. *Dynamic/run-time/online scheduling*) – plan przydziału zadań do zasobów sporządzany jest na bieżąco. Podstawą działania szeregowania dynamicznego są priorytety. Metoda może być stosowana, gdy charakterystyki czasowe zadań nie są z góry znane.

Klasyfikacja metod szeregowania zadań:

- Szeregowanie zadań na pojedynczej maszynie: reguła Smitha, reguła Jacksona, reguły priorytetowe
- Szeregowanie zadań na maszynach równoległych: metoda ścieżki krytycznej.
- Szeregowanie zadań w systemie przepływowym: algorytm Johnsona, metoda podziału i oszacowań, modele programowania całkowitoliczbowego.
- Szeregowanie zadań w systemie gniazdowym: algorytm grafu dysjunktywnego, modele programowania całkowitoliczbowego.

Istnieje wiele algorytmów stosowanych do rozwiązywania problemów szeregowania zadań, które można podzielić na dwie główne grupy: optymalizacyjne (dokładne) oraz aproksymacyjne (przybliżone). Pierwsza grupa to algorytmy gwarantujące znalezienie rozwiązania optymalnego. Z praktycznego punktu widzenia, podczas rozwiązywania problemów większej skali stosuje się wyłącznie techniki aproksymacyjne, które nie gwarantują znalezienia optimum, ale wymagają mniej zasobów i są szybsze. Do drugiej grupy można zaliczyć algorytmy ewolucyjne, poszukiwania z zakazami, symulowane wyżarzanie.

2.1.1 Metody szeregowania zadań

W dynamicznym szeregowaniu zadań nie tworzy się harmonogramów. Przydzielanie zadań do odpowiednich zasobów (maszyn) odbywa się w chwili, w której zasób (maszyna) jest gotowy do przetwarzania nowego zadania, może być to realizowane przy zastosowaniu reguł dynamicznego priorytetowania zadań. Najczęstsze metody to:

- *Szeregowanie stochastyczne* (ang. *stochastic scheduling*) jest często stosowane w harmonogramowaniu w warunkach niepewności. Sprowadza się do probabilistycznego określania (za pomocą rozkładów prawdopodobieństw) części parametrów produkcyjnych tj. czasy trwania zadań, czas naprawy maszyny itp. Szeregowanie stochastyczne może być zastosowane jedynie dla zdarzeń powtarzalnych, rutynowych – wymaga posiadania wiarygodnych danych

historycznych. Najczęściej jako dane stochastyczne występują czasy trwania czynności, które generowane są jako liczby losowe z pewnych rozkładów

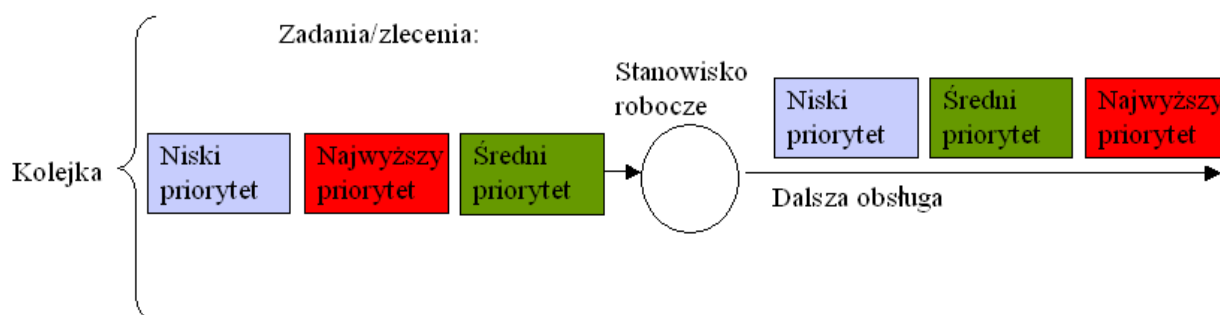
- *Szeregowanie rozmyte* (ang. *fuzzy scheduling*) - parametry produkcyjne opisuje się przy użyciu liczb rozmytych. Stosowanie liczb rozmytych ma sens zwłaszcza wtedy, gdy realizowane są nowe zlecenia produkcyjne i brak jest wiedzy historycznej dotyczącej np. czasów trwania poszczególnych czynności lub wtedy, gdy źródłem niepewności jest obecność człowieka w procesie podejmowania decyzji. Funkcja celu wyznaczona z obliczeń na rozmytych czasach trwania czynności jest też liczbą rozmytą (konieczne jest stosowanie operatorów właściwych dla liczb rozmytych). Kryterium dochowania terminowości wykonania projektu można określić jako np. prawdopodobieństwo, że dotrzymany zostanie termin realizacji projektu na dopuszczalnie niskim poziomie.
- *Metoda Palmera* - algorytm porządkujący zadania wg spadku czasów obróbki, opierając się na spostrzeżeniu, że zadania umieszczone na początku sekwencji optymalnej powinny mieć czasy obróbki zwiększające się w miarę przechodzenia zadania przez kolejne stanowiska, zadania umieszczone na końcu – czasy zmniejszające się.
- *Metoda Gupty* - algorytm porządkujący zadania wg odpowiedniego wzoru analitycznego wiążącego czasy operacji na danym i kolejnym stanowisku.
- *Reguły priorytetowe* (ang. *priority/dispatching rules*) – stosuje się, gdy kolejność wykonania zadań na stanowiskach nie została określona w ramach harmonogramowania (szeregowania) z ograniczonymi zdolnościami produkcyjnymi.

Procedura szeregowania poprzez reguły priorytetowe odbywa się na stanowiskach obsługi zawsze kiedy na tym stanowisku kończy się obsługa danego zadania, a w kolejce przed stanowiskiem czekają zadania do wykonania. Dla każdego z tych zadań obliczana jest wartość stosowanej na tym stanowisku reguły priorytetowej, która zależy od parametrów danego zadania. Po obliczeniu wartości priorytetów wszystkich zadań z

kolejki zadanie o największej/najmniejszej (w zależności od stosowanej reguły) wartości priorytetu jest obsługiwane jako pierwsze.

Istota priorytetowania polega na tym, że zawsze zlecenia z wyższym priorytetem znajdująca się w kolejce przed stanowiskiem są obsługiwane przed zleceniami o niższym priorytecie. Dzięki właściwej strategii priorytetów przydzielana jest odpowiednia kolejność wykonywania zadań w kolejkach przed stanowiskami produkcyjnymi.

Na rysunku 2.2 widać, że najwyższy priorytet wśród 3 zadań/zleceń ma zadanie 2 (kolor czerwony), zatem zadanie 2 będzie obsługane jako pierwsze.



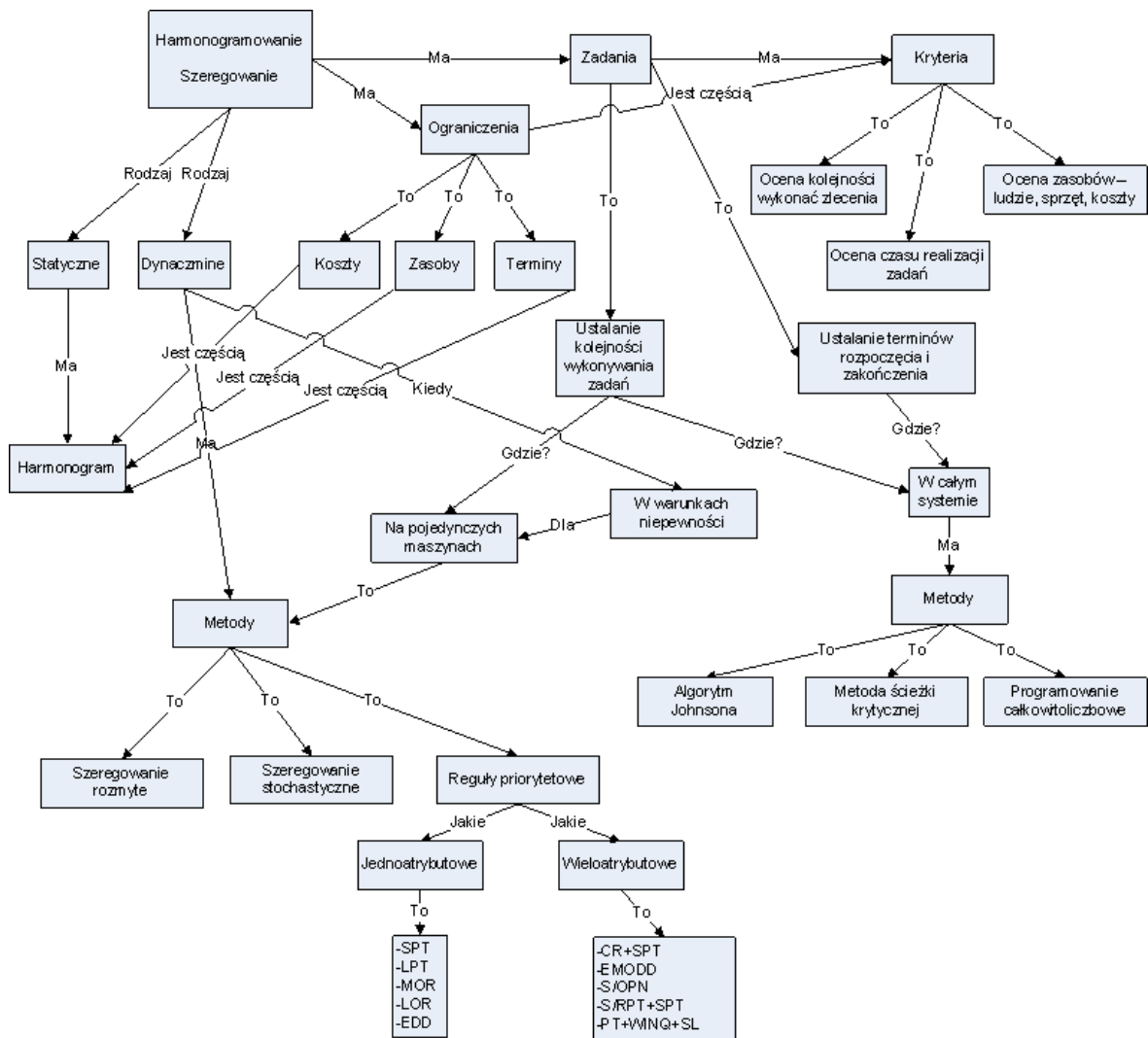
Rys. 2.2 Istota priorytetowania zleceń

Zastosowanie reguł priorytetowych ma uzasadnienie w trudności wyboru zadania z kolejki oczekujących zadań przed stanowiskiem produkcyjnym oraz w tym, iż warunki w całym systemie mogą wpływać na optymalne ustawienie w kolejce przed pojedynczym stanowiskiem. Istnieje $n!$ sposobów na ustawienie n zadań oczekujących przed danym stanowiskiem. Czyli jeśli w kolejce znajduje się 10 zadań oczekujących na wykonanie na danym stanowisku można je wykonać na $3'628'800$ sposobów.

Metoda priorytetowania zleceń ma w rzeczywistości dwa zadania

- Podjęcie decyzji, które z oczekujących zadań powinno być obsługane jako pierwsze
- Zarządzanie zadaniami oczekującymi na obsługę

Na rysunku 2.3 przedstawiono graf semantyczny zawierający istotę podziału metod w szeregowaniu zadań w złożonych systemach. Reguły priorytetowe znajdują się w rodzinie metod dynamicznych, które wykorzystywane są w warunkach niepewności oraz niepełnej informacji. Uszeregowanie jest wykonywane na bieżąco w zależności o przydzielonej reguły priorytetowej dla pojedynczych maszyn (stanowisk obsługi) w systemie.



Rys. 2.3 Graf semantyczny metod w szeregowaniu zadań

2.2 Klasyfikacja reguł priorytetowych

Systemy z priorytetami są rozpatrywane przez wielu autorów dla różnorodnych zastosowań w informatyce, telekomunikacji, a także produkcji. Priorytety, nadawane poszczególnym zadaniom/zleceniom, pozwalają na podniesienie przychodów przez skuteczniejsze wykorzystanie zasobów lub zmniejszenie czasu cyklu produkcyjnego.

Klasyfikacje systemów z priorytetami można przeprowadzić ze względu na sposób decyzji, która jednostka spośród czekających w kolejce wejdzie jako pierwsza:

- jeżeli decyzja w tej kwestii zależy tylko od tego, do której klasy jednostka ta należy, to takie systemy noszą nazwę systemów z priorytetem zewnętrznym (statyczne priorytety - ang. *static dispatching rule*). Priorytety statyczne nadawane są z góry, raz przed wejściem do systemu,
- jeżeli decyzja zależy od aktualnego stanu systemu mówi się o priorytetach wewnętrznych (priorytetach dynamicznych – ang. *dynamic dispatching rule*). Priorytety dynamiczne nadawane są przed każdym stanowiskiem.

Drugie zagadnienie klasyfikujące systemy z priorytetami odnosi się do problemu co zrobić gdy do podczas obsługi jednostki z niższym priorytetem zgłosi się jednostka z wyższym priorytetem, można wówczas:

- przerwać obsługę jednostki o niższej klasie (priorytety rugujące/ z wyłączeniem - ang. *preemptive scheduling*)
- kontynuować dalej obsługę (priorytety nierugujące/ bez wyłączeń ang. *non-preemptive scheduling*)

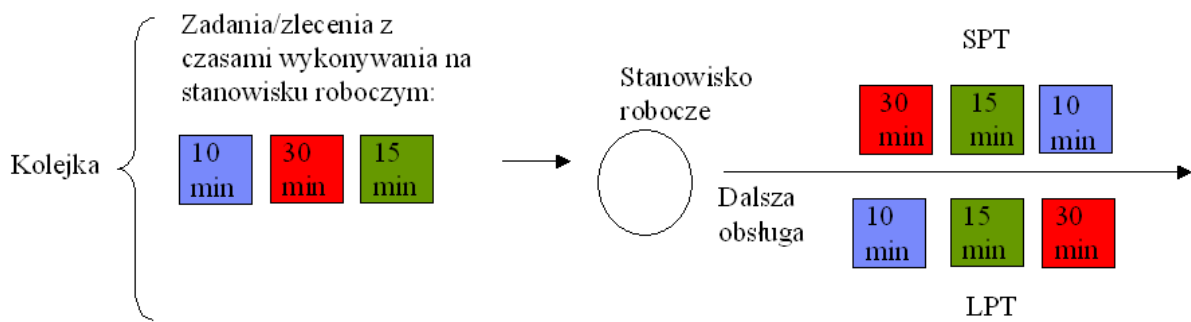
Kolejna klasyfikacja reguł priorytetowych dotyczy ich złożoności:

- jeżeli reguła priorytetowa obliczana jest na podstawie tylko jednego parametru zadania/zlecenia jest to priorytet jednoatrybutowy (ang. *single attribute dispatching rule*)
- jeżeli do obliczania reguły priorytetowej branych jest kilka parametrów zadania/zlecenia jest to priorytet wieloatrybutowy (ang. *multi attribute dispatching rule*)

Wśród najczęściej wymienianych w literaturze dynamicznych jednoatrybutowych reguł priorytetowych są:

- SPT (ang. *shortest processing time*) jest to reguła priorytetowa, która jako pierwsze do obsługi wypuszcza zadania z najkrótszym czasem wykonywania,
- LPT (ang. *longest processing time*) analogicznie, jak wyżej, z najdłuższym czasem wykonywania,

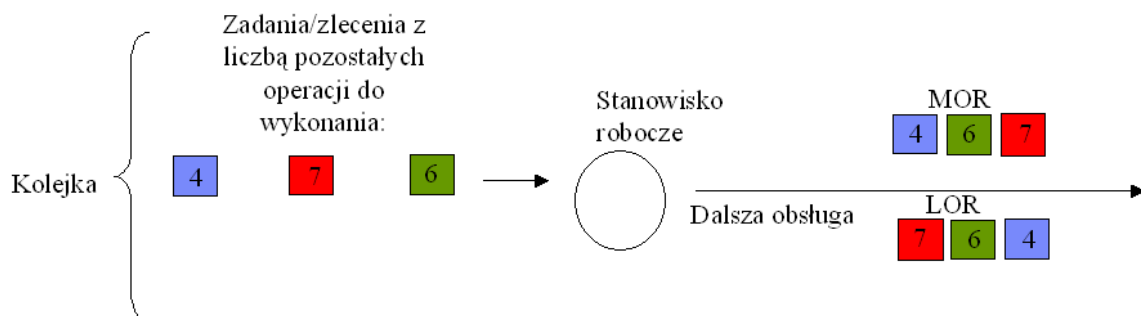
Schemat działania reguł zobrazowano na rysunku 2.4.



Rys. 2.4 Schemat obsługi reguł SPT i LPT

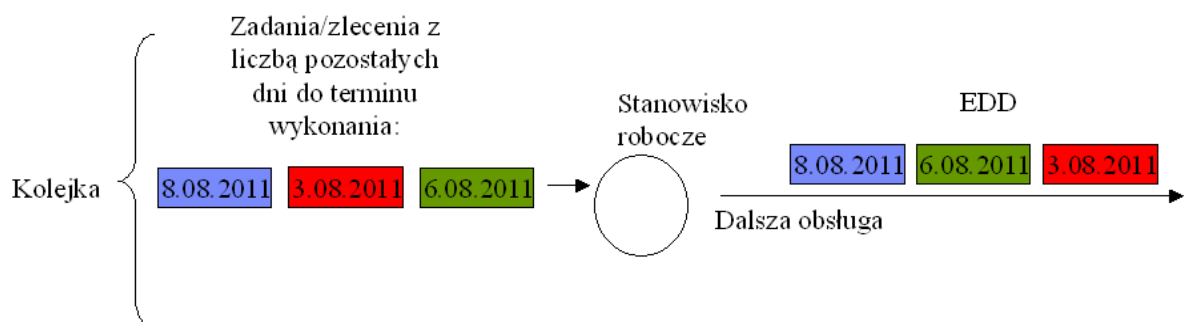
- MOR (ang. *most operations remaining*) reguła, która jako pierwsze w kolejce ustawia zadanie o największej liczbie pozostałych operacji,
- LOR (ang. *least operations remaining*) analogicznie, jak wyżej, o najmniejszej liczbie pozostałych operacji do wykonania,

Zasadę działania reguł schematycznie przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.5 Schemat obsługi reguł MOR i LOR

- EDD (ang. *earliest due date*) reguła która jako pierwsze do obsługi wypuszcza zadanie z najwcześniejszym terminem realizacji.



Rys. 2.6 Schemat obsługi reguły EDD

Do wieloatrybutowych reguł należą natomiast:

- CR+SPT (ang. *critical ratio + the shortest process time*) jest to wieloatrybutowa reguła priorytetowa, która przy obliczaniu jakie zadanie jako pierwsze powinno być obsłużone, bierze pod uwagę krytyczny czas pozostały do wykonania zadania/zlecenia razem z najkrótszym czasem wykonywania na danym stanowisku,
- S/RPT + SPT - (ang. *slack per remaining process time + the shortest process time*) reguła ta łączy najkrótszy czas wykonania zadania z opóźnieniem jego wykonywania,
- PT+WINQ - (ang. *process time + work in the next queue*) reguła priorytetowa, która bierze pod uwagę czas wykonania operacji na danym stanowisku oraz ilość pracy potrzebną do wykonania na stanowisku kolejnym,
- PT+PW - (ang. *process time + wait time*) reguła łącząca czas wykonania zadania z czasem jego oczekiwania,

Dynamiczność wyżej wymienionych reguł priorytetowych wynika z ich definicji – nadawanych przed każdym stanowiskiem w systemie. Np. w systemie produkcyjnym w którym występuje kilka stanowisk produkcyjnych, a przed każdym z nich może tworzyć się kolejka, jeśli stanowisko jest zajęte. Jeżeli w takim systemie jest ustalona dynamiczna reguła priorytetowa (np. SPT) to dane zlecenie przed jednym stanowiskiem może mieć wyższy priorytet – wchodzić z kolejki jako pierwsze (jeśli czas obsługi tego zlecenia na tym stanowisku jest najkrótszy), a na innym stanowisku to samo zlecenie może mieć niższy priorytet – wchodzić do obsługi z kolejki w dalszej kolejności (ponieważ na tym stanowisku czas obsługi tego konkretnego zlecenia jest dłuższy). Zatem priorytet wyjścia z kolejki do obsługi dla danego zlecenia jest liczony przed każdym stanowiskiem produkcyjnym osobno, nie jest nadawany raz z góry przed wejściem do systemu, jak to jest w przypadku statycznych priorytetów nadawanych raz, przed wejściem do systemu.

2.3 Przegląd literatury oraz podłoże problemu przydziału priorytetów

2.3.1 Priorytety statyczne i dynamiczne

Problem przydziału odpowiednich strategii priorytetów do zadań/zleceń w różnych systemach informatycznych, telekomunikacyjnych i produkcyjnych jest wciąż aktualny i badany przez wielu autorów w ośrodkach badawczych na całym świecie. Literatura światowa od wielu lat szeroko opisuje systemy z kolejkami obsługiwanymi za pomocą różnych strategii priorytetów w m. in. książkach Gross i Harris (1988), Takagi (1991) Błażewicz i in. (1994) oraz artykułach Rajendran i Holthaus (1999), Langaris (1993), Iravani i Balcioglu (2008) .

Wymienione wyżej pozycje traktują o systemach z priorytetami statycznymi głównie jednoklasowymi. Kolejne prace o klasie systemów z priorytetami statycznymi, ale wieloklasowymi, zostały przedstawione m. in. w Sleptchenko i in. (2005), Harchol-Balter i in. (2005), Boon i in. (2010), Wieloklasowy system z priorytetami statycznymi polega na tym, iż każdemu zadaniu nadaje się priorytet z możliwych kilku klas, im wyższa klasa, tym prędzej będzie obsłużone. W artykułach rozpatrywane są takie parametry systemu produkcyjnego jak cykl produkcyjny, czas oczekiwania w kolejkach oraz długość kolejki. W artykule Walraevens i in. (2006) rozważane są systemy z dwoma klasami priorytetów, rozkłady czasów dla obu grup są normalne. Zaprezentowany został wpływ strategii priorytetów na typowe parametry wyjściowe systemu. Wiele klas priorytetów było też przedmiotem badań w Katayama (2007). Autor analizuje przede wszystkim długość kolejek oraz czas w nich spędzony. W Brandt i in. (2004) oraz Choi i in. (2001) autorzy badają system M/M/1 tylko z dwoma klasami priorytetów przydzielanych zewnętrznie. Kim i Chae (2010) analizują system z dwoma klasami priorytetów oraz normalnym rozkładem czasu obsługi zadań.

Jedną z głównych klasyfikacji opisywanych w literaturze to podział na priorytety rugujące i nierugujące (opis klasyfikacji w podrozdziale 2.2). Systemy z priorytetami rugującymi zostały opisane m. in. w Sleptchenko i in. (2005), Walraevens i in. (2006), Katayama (2007), Bedford i in. (2005), Van Houdt i in. (2006), natomiast systemy z priorytetami nierugującymi w artykułach m in. Johri (1993), Kim i in. (1998), Uzsoy i in.

(1992). W artykule Krishnamoorthy i in. (2009) zaprezentowano analizę systemu wieloproduktowego z nierugującymi priorytetami. Autor prezentuje jak dane strategie priorytetów wpływają na czas cyklu. Teoria zbiorów rozmytych została użyta w Pardo i in. (2007), aby opisać system zarówno z rugującymi jak i nierugującymi priorytetami. W Bedford i in. (2005) użyto natomiast macierzowo-analitycznej metody do budowy modelu systemu z rugującymi priorytetami. Większość prac modeluje system z zewnętrznymi priorytetami za pomocą łańcuchów Markowa.

W wielu zastosowaniach jednak priorytety przydzielane zewnętrznie (statycznie) nie oddają dobrze modelowanej rzeczywistości (Krishnamoorthy i in. 2009). Alternatywą są priorytety wewnętrzne (dynamiczne). O kolejności wykonywania zadań w systemach z takimi priorytetami decyduje aktualny jego stan. Wartość priorytetu dla danego zadania liczona jest za każdym razem gdy zwalnia się stanowisko obsługi. Zatem zadanie z dotychczasowym najkrótszym czasem obsługi przed stanowiskiem A może mieć inny priorytet niż kilka stanowisk dalej, na stanowisku B, w stosunku do tych samych zadań, które były z nim kolejce przed stanowiskiem A (ze względu na np. dłuższą marszrutę technologiczną).

2.3.2 Priorytety jednoatrybutowe oraz wieloatrybutowe

Literatura opisuje zarówno jednoatrybutowe oraz wieloatrybutowe priorytety dynamiczne. W Dai i in. (1997) rozpatrywane zostały dwie strategie jednoatrybutowych priorytetów (FIFO i LIFO). Mierzone parametry to obciążenie zasobów oraz średni czas przebywania w systemie. System wspomagania decyzji zbudowany w oparciu o sieci neuronowe został zastosowany w Cakar i Yildirim (2005) do znalezienia optymalnej ilości zasobów w systemie. Porównane zostały następujące rodzaje algorytmów priorytetowych: EDD, SPT, FIFO. Ci sami autorzy w Yildirim i in. (1997) użyli także sieci neuronowych wraz z eksperymentem symulacyjnym do wybrania najlepszej strategii priorytetów w systemie. Brane pod uwagę były następujące algorytmy jednoatrybutowe: SPT, LPT, FIFO.

W ostatnich latach pojawiło się dużo prac związanych z wieloatrybutowymi regułami priorytetowymi, które poprawiają większość najważniejszych parametrów wydajnościowych systemów. W artykule Rajendran i Holthaus (1999) przedstawiono 13 reguł priorytetowych (w tym 9 wieloatrybutowych). Przedstawiony został wpływ reguł priorytetowych na parametry wydajnościowe systemu, takie jak: czas cyklu (średnia,

maksymalny czas, wariancja), opóźnienie w wykonaniu zlecenia (średnia, maksymalne opóźnienie, wariancja). Autorzy analizują oddziaływanie reguł dla przepływowego zagadnienia kolejnościowego (ang. *flow-shop*) oraz dla ogólnego zagadnienia kolejnościowego (ang. *job-shop*) w dynamicznych systemach produkcyjnych. W pracy Chan i in. (2003) przedstawiono algorytm, używający kilkunastu dynamicznych wieloatrybutowych reguł priorytetowych do szeregowania zadań w elastycznym systemie produkcyjnym (ang. *flexible manufacturing system*). Zostało pokazane, iż używając wieloatrybutowych reguł większość parametrów wydajnościowych systemu uległo poprawie. Artykuł Dominic i in. (2004) przedstawia nowe wieloatrybutowe reguły priorytetowe dla problemu szeregowania ogólnego zagadnienia kolejnościowego. Reguły te łączą czas wykonywania operacji na danym stanowisku, całkowitą ilość pracy do wykonania zadań zawartych w kolejce następnej po danym stanowisku oraz czas przybycia zadania do kolejki. Autorzy przedstawiają eksperymenty symulacyjne aby ocenić wpływ danych reguł na parametry wydajnościowe systemu. Symulacja komputerowa została również wykorzystana w Vinod i Sridharan (2011) w badaniach nad związkiem między terminem wykonania zadania/zlecenia a regułą priorytetową. Autorzy przedstawiają kilka metod obliczania terminu zadania oraz kilka wieloatrybutowych reguł priorytetowych w typowym systemie produkcyjnym w celu minimalizacji czasu przejścia oraz opóźnienia zadania.

Niektóre strategie priorytetów mogą powodować, że system staje się niestabilny. W pracach Bramson (1994) oraz Lu i Kumar (1991) zostały pokazane przykłady, że system przy kombinacji odpowiednich warunków oraz złego doboru strategii priorytetów jest niestabilny nawet gdy obciążenie poszczególnych zasobów jest mniejsze niż 100%.

2.3.3 Złożoność problemu przydziału priorytetów

Problem odpowiedniego uszeregowania zadań w złożonym systemie jest problemem bardzo złożonym. Autorzy w wyżej wymienionych pracach używają w swoich badaniach zazwyczaj jednej reguły priorytetowej dla całego, przeważnie liniowego, systemu, sprawdzając jak zmieniają się jego główne parametry wydajnościowe. Rzadko badany jest wpływ zmian reguł *priorytetowych* na poszczególnych stanowiskach, tzn. na każdym stanowisku może być inna reguła. Wówczas im więcej stanowisk obsługi (stanowisk roboczych w systemie produkcyjnym) tym jest większa przestrzeń poszukiwania odpowiedniego ustawienia reguł priorytetowych. W przypadku m operacji i k reguł

priorytetowych, otrzymujemy k^m możliwości wszystkich ustawień. Jeśli dodatkowo w kolejkach przed stanowiskami występuje dużo zadań/zleceń do wykonania to problem staje się dużo bardziej złożony (Jia i in., 2003) . Problem jest już NP-trudny dla więcej niż 3 stanowisk obsługi (Ahmadizar i Farahani, 2011).

Dokładne algorytmy w rozsądnym czasie mogą rozwiązać tylko małe problemy (dla małych liniowych systemów). Istnieją nieliczne przykłady wykorzystania metod dokładnych jak na przykład relatywnie szybki algorytm podziału i ograniczeń, algorytm grafu dysjunktywnego albo modele programowania całkowitoliczbowego (Brucker i in. 1997, Dorndorf i in. 2001). Zatem algorytmy heurystyczne, w szczególności algorytmy ewolucyjne, są szeroko stosowane w przypadku złożonych systemów produkcyjnych, które są z natury stochastyczne. Algorytmy ewolucyjne dobrze radzą sobie w problemach szeregowania zadań ze względu na jakościowy charakter zmiennych (np. reguły priorytetowe) oraz skalę zagadnienia. Algorytm symulowanego wyżarzania (ang. *Simulated Annealing*) został użyty do minimalizacji opóźnień dla systemu z operacjami równoległymi (Kim i in., 2002). Także algorytm przeszukiwania z zakazami (ang. *Tabu Search*) był wykorzystywany w problemie szeregowania zadań między innymi w artykułach: Nowicki i Smutnicki (1996), Brucker i Neyer (1997). Pezella i Merelli (2000) wykorzystali algorytm przeszukiwania z zakazami wraz z przesuwaniem wąskich gardeł w ogólnym zagadnieniu kolejnościowym. Algorytmy heurystyczne inspirowane naturą są często wykorzystywane w problemach szeregowania zadań. Jednym z nich jest algorytm mrówkowy wykorzystywany zarówno w systemach prostych (Liao i in., 2011), jak i bardziej złożonych (Lu i Romanowski, 2012). W Pracy Arnaout i in. (2008) użyto algorytmu mrówkowego w problemie szeregowania na równoległych stanowiskach. Rezultaty porównano do metody przeszukiwania z zakazami oraz innych istniejących metod heurystycznych. Szeroko stosowaną rodziną algorytmów ewolucyjnych są algorytmy genetyczne, które, jak wykazano, są efektywne w przeszukiwaniu dużych, złożonych przestrzeni rozwiązań, pomimo obecności takich trudności jak wysoka wymiarowość, multimodalność oraz nieciągłość (Goldberg, 1989).

Problem szeregowania zadań w systemie z wykorzystaniem algorytmów genetycznych może być zaprezentowany przy pomocy dwóch rodzajów podejść: bezpośredniego i pośredniego (Cheng i in., 1999). W bezpośrednim podejściu harmonogram jest zakodowany w materiale genetycznym danego osobnika, a algorytm genetyczny jest używany do znajdowania najlepszego uszeregowania zadań – jest to sposób optymalizacji statycznej wykonywanej w całym systemie. Takie podejście jest reprezentowane m.in.

przez autorów: Chen i in. (1999), Zhang i Gen (2005), Gao i in. (2008). Natomiast w podejściu pośrednim sekwencja reguł priorytetowych, działających na kolejnych stanowiskach w systemie, jest zakodowana w materiale genetycznym osobnika, a algorytm genetyczny szuka najlepszego ustawienia (najlepszej sekwencji) reguł priorytetowych, a nie najlepszego uszeregowania zadań. Podejście to jest dużo mniej opisywane w literaturze. W artykułach Mattfeld i Bierwirth (2004) oraz Dorndorf i in. (2001) można znaleźć zastosowanie reguł priorytetowych wraz z algorytmem genetycznym w takim pośrednim ujęciu, ale dla niewielkich systemów.

2.3.4 Zastosowanie priorytetów

Reguły priorytetowe, jako metoda w szeregowaniu zadań, są często stosowane do rozwiązywania problemów w złożonych systemach ze względu na ich łatwą implementację oraz średni poziom skomplikowania (Cheng i in., 1999). Odpowiedni dobór strategii priorytetów może poprawić większość parametrów wydajnościowych systemu produkcyjnego. Najczęściej reguły priorytetowe minimalizują ilość produkcji w toku, czas oczekiwania w kolejkach oraz koszty opóźnień. W literaturze wielu autorów zwraca uwagę na fakt, iż nie ma jednej, najlepszej, reguły priorytetowej, która by optymalizowała wszystkie najważniejsze parametry wydajnościowe systemu związane z czasami oczekiwania, przepływu, opóźnieniami oraz produkcją w toku (Blackstone i in. 1982, Haupt 1989, Dominic i in. 2004), w szczególności jeśli chodzi o dynamiczne, stochastyczne środowisko jakim są systemy informatyczne, telekomunikacyjne oraz produkcyjne. Reguły priorytetowe z uwagi na ich dobre wyniki w poprawie wydajności parametrów, niskie koszty obliczeniowe i wdrożeniowe, dużą elastyczność w dostosowaniu do rodzaju systemu bez konieczności wglębiania się w wiedzę dziedzinową, są szeroko stosowane w wyżej wspomnianych branżach (Chiang i Fu, 2007).

Haghighi i Mishev (2006) analizują model wieloproduktowego oraz wielostanowiskowego systemu produkcyjnego z priorytetami, który reprezentuje model produkcji taśmowej. Krishnamoorthy i in. (2009) rozważa dynamiczne reguły priorytetowe bez wyłączenia w zastosowaniu do obsługi kolejek w systemach opieki medycznej. Yang i Tseng (2002) wskazują na efektywne szeregowanie zadań jako jeden z kluczowych czynników usprawniających operacje w produkcji układów scalonych. Istnieje także dużo prac związanych z szeregowaniem w produkcji płyt półprzewodnikowych: Johri (1993), Kim i in. (1998), Uzsoy i in. (1992), Zhang i in. (2009), a także Sarin i in. (2011).

Zastosowanie reguł priorytetowych ma bardzo duży wpływ na szereg, różnych czasami sprzecznych, celów związanych ze średnim wykorzystaniem zasobów (maszyn, ludzi), minimalizacją czasu przejścia, opóźnień oraz produkcji w toku (ang. *WIP- work in progress*) (Sabuncuoglu, 1998). Celem nowoczesnego planowania produkcji jest znalezienie równowagi między zyskiem z tych sprzecznych celów. Ogólne wyniki poprawy wydajności systemów zależą nie tylko od odpowiedniego uszeregowania zadań, lecz również od konfiguracji danego systemu np. produkcyjnego. Dynamiczne reguły priorytetowe są często używaną metodą w szeregowaniu zadań w przypadku szeregowania w czasie rzeczywistym związanego z terminem wykonania poszczególnych zadań (Lengyel i in., 2003).

W przypadku pojedynczego stanowiska obsługi (pojedynczej maszyny w systemie produkcyjnym), reguła EDD jest dokładnym algorytmem minimalizującym opóźnienia wykonywanych zadań. Typową regułą opartą o czas wykonywania zadania na poszczególnym stanowisku jest reguła SPT. Jest ona często wykorzystywana jako benchmark dla innych tego typu reguł od czasu gdy odkryto jej dużą efektywność w minimalizacji czasu przepływu oraz minimalizacji średniego opóźnienia. Znana i często używana reguła FIFO (ang. *First in First out* – pierwszy wchodzi, pierwszy wychodzi) jest relatywnie efektywna w minimalizacji średniego czasu przepływu oraz wariancji czasu przepływu w niektórych przypadkach (Rajendran i Holthaus, 1999). W literaturze można także odnaleźć przeznaczenie reguł bardziej złożonych, wieloatrybutowych, które łączą informacje dotyczące terminu wykonania zadania oraz jego inne parametry, na przykład: reguła S/RPT + SPT minimalizuje średnią wartość opóźnienia zadania; S/OPN jest używana do oceny innych reguł związanych z opóźnieniami zadań; SPT X TOT (ang. *shortest processing time multiplied by total processing time* – najkrótszy czas wykonania zadania mnożony przez całkowity czas wykonania zadania) minimalizuje średnią liczbę zadań wykonanych za wcześnie (Anderson i Nyirenda (1990), Chan i in. (2003), Chiang (2007), Baykasoglu i Ozbakir (2010), Jayamohan i Rajendran (2000), Vinod i Sridharan (2011)). Są także reguły, których obliczenia opierają się na warunkach w całym systemie a nie tylko na jednym stanowisku, na przykład reguły WINQ albo PT + WINQ + SL, które minimalizują średnią oraz wariancję opóźnienia wykonania zleceń.

2.4 Modelowanie systemu wieloproduktowego z wykorzystaniem dynamicznych reguł priorytetowych

W trakcie produkcji pojawiają się nieprzewidywalne zakłócenia np. awarie maszyn, opóźnienia w dostawach materiałów, niekorzystne warunki atmosferyczne, błędy oszacowania czasów wykonania zadań itp., które powodują, że planowane harmonogramy stają się niewydajne lub niemożliwe do zrealizowania. Zakłócenia produkcyjne są źródłem niepewności w harmonogramowaniu zadań. Są one kluczem do uzyskania modelu dobrze odwzorowującego rzeczywistość, w której bardzo często spotkać się można z informacją nieprecyzyjną lub niepełną. Taki stan rzeczy jest zwykle spowodowany czynnikiem ludzkim (udział człowieka w łańcuchu czynności technologicznych) oraz sposobem opisu parametrów (wydajności) poszczególnych urządzeń. Obecność zakłóceń i niepewności w rzeczywistych systemach produkcyjnych przyczynia się do konieczności wprowadzania zmian w planowanym uszeregowaniu. Nie jest zatem możliwe szeregowanie zadań w całym systemie za pomocą z góry określonego harmonogramu. Dodatkowo metody szeregowania w całym systemie skupiają się raczej na przydzieleniu zasobów produkcyjnych w czasie a nie na ustaleniu optymalnej kolejności wykonywania zadań w rozumieniu minimalizacji parametrów wyjściowych systemu takich jak najkrótsze czasy cyklu produkcyjnego, najmniejsze kolejki itp. Bardziej elastycznym podejściem do szeregowania zadań, jest wykorzystanie mechanizmu dynamicznych priorytetów (lub szeregowania rozmytego, stochastycznego), w którym nie występuje sprecyzowane uszeregowanie kolejności wykonywanych zadań. Podczas pracy systemu zadania są wykonywane w kolejności zależnej od przypisanego im wcześniej priorytetu. Rozwiązania bazujące na wykorzystaniu mechanizmu priorytetu są bardziej elastyczne i lepiej przystosowują się do potrzeb danego przedsiębiorstwa.

W złożonych, wieloproduktowych systemach produkcyjnych, takich jak systemy produkcyjne w poligrafii, zasadność zastosowania dynamicznych reguł priorytetowych wynika z dwóch głównych przyczyn. Po pierwsze klasyczne podejście do szeregowania zadań w systemie zawiera złożone problemy kombinatoryczne, które nie są łatwe (a czasami wręcz niemożliwe) do rozwiązania za pomocą metod analitycznych w akceptowalnym czasie. Drugim powodem dla którego dynamiczne reguły priorytetowe są dobrym rozwiązaniem problemu uszeregowania zadań w złożonych systemach jest to, iż

systemy te charakteryzują się zmiennymi, dynamicznymi warunkami. Występują w nich również często nieprzewidziane zdarzenia. To wszystko sprawia, że odgórne harmonogramy stworzone przez statyczne uszeregowanie zadań stają się nieużyteczne.

Podczas przeprowadzonych badań przeanalizowanych zostało szereg dynamicznych reguł priorytetowych, zarówno jednoatrybutowych jak i wieloatrybutowych. Wybór konkretnych reguł podyktowany był ich występowaniem i skutecznością działania, potwierdzoną w literaturze światowej.

Notacja użyta dla zamodelowania reguł priorytetowych jest następująca

i – indeks zadania dla którego wartość priorytetu jest obliczana

j – indeks operacji i -tego zadania

m – indeks stanowiska obsługi (stanowiska roboczego w systemie produkcyjnym)

q – liczba typów produktów, które są wytwarzane w systemie produkcyjnym

N – liczba wykonanych zadań podczas okresu optymalizacji

E_i – czas zakończenia realizacji i -tego zadania

F_i – czas cyklu i -tego zadania

T_i^m – czas wejścia i -tego zadania do kolejki przed stanowiskiem m

Z_i – wartość priorytetu i -tego zadania

P_i^m – czas wykonywania i -tego zadania na stanowisku m

D_i – termin wykonania i -tego zadania

O_i – termin przybycia zamówienia i -tego zadania

n_i – liczba potrzebnych operacji (liczba stanowisk roboczych przez jakie musi przejść) i -tego zadania

w_i – oczekiwany czas oczekiwania w kolejkach i -tego zadania

s_i – opóźnienie i -tego zadania

t – czas w którym wartość priorytetu jest liczona (aktualny czas w systemie)

K – stały czynnik związany z terminem wykonania zadania (w zależności od systemu)

W_i – całkowita ilość pracy zawartej w kolejce na kolejnym stanowisku dla i -tego zadania.

Jeśli operacja j jest ostatnią operacją i -tego zadania to W_i wynosi zero.

2.4.1 Termin wykonania zadania

Do obliczania niektórych wartości reguł priorytetowych potrzebne jest najpierw przeliczenie szacowanego terminu wykonania zadania (ang. *Due-date*). W tym celu szacuje się czas operacji oraz czas oczekiwania przed każdym stanowiskiem na ścieżce technologicznej każdego zadania w systemie. Wybraną w pracy metodą obliczania terminu wykonania zadania jest metoda DPPW (ang. *dynamic processing plus waiting time*), która została zaproponowana przez Enns (1995). Metoda oblicza termin wykonania zadania według następującej formuły:

Termin wykonania zadania = czas wejścia do systemu + całkowity czas operacji + liczba potrzebnych operacji (stanowisk) do wykonania x szacowany czas oczekiwania w kolejce przed danym stanowiskiem. Zależność przedstawiona wzorem:

$$D_i = O_i + \sum_{m=1}^{n_i} P_i^m + n_i \cdot w_i \quad (1)$$

2.4.2 Analizowane reguły priorytetowe

1) FIFO (ang. *first in first out*) – pierwszy wchodzi, pierwszy wychodzi. Reguła wyznacza jako pierwsze do obsługi zadanie, które weszło do kolejki jako pierwsze, przed danym stanowiskiem. Reguła jest efektywna w minimalizowaniu maksymalnego czasu przejścia oraz wariancji czasu przejścia. Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i z minimalną wartością:

$$Z_i = T_i^m \quad (2)$$

2) SPT (ang. *shortest processing time*) – Jest to reguła, która jako pierwsze z kolejki wybiera zadanie z najkrótszym czasem wykonania na danym stanowisku. Reguła ta jest uznawana za efektywną w problemach minimalizacji średniego czasu przejścia. Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i z minimalną wartością:

$$Z_i = P_i^m \quad (3)$$

3) LPT (ang. *longest processing time*) – Jest to reguła, która jako pierwsze z kolejki wybiera zadanie z najdłuższym czasem wykonania na danym stanowisku. Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i z maksymalną wartością:

$$Z_i = P_i^m \quad (4)$$

4) LOR (ang. *least operations remaining*) – Reguła wybiera z kolejki jako pierwsze zadanie, które ma najmniejszą liczbę pozostałych operacji do wykonania na swojej ścieżce technologicznej. Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i na stanowisku j z minimalną wartością:

$$Z_i = n_i - j \quad (5)$$

5) MOR (ang. *most operations remaining*) – Reguła wybiera z kolejki jako pierwsze zadanie, które ma największą liczbę pozostałych operacji do wykonania na swojej ścieżce technologicznej. Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i na stanowisku j z maksymalną wartością:

$$Z_i = n_i - j \quad (6)$$

6) EDD (ang. *earliest due date*) – Reguła priorytetowa, która jako pierwsze do obsługi wybiera zadanie z najkrótszym terminem wykonania. Uznawana jest za regułę, która radzi sobie z minimalizacją opóźnień w wykonywaniu zadań. Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i z minimalną wartością:

$$Z_i = D_i \quad (7)$$

7) EMODD (ang. *earliest modified operational due date*). Zmodyfikowany odpowiednik reguły EDD. Reguła EMODD wybiera zadanie do wykonania jako pierwsze, które ma najniższą wartość operacyjnego terminu do wykonania ODD (ang. *operational due date*). ODD dla zadania i przed operacją (stanowiskiem) j jest określony zgodnie z regułą, która liczona jest rekurencyjnie (Vinod i Sridharan, 2011):

$$ODD_{i,j} = ODD_{i,j} + K \cdot P_i^m \quad (8)$$

gdzie:

$$ODD_{i,0} = O_i \quad (9)$$

Reguła EMODD, która łączy operacyjny termin wykonania zadania (ODD) oraz najkrótszy czas operacji na danym stanowisku (SPT), została określona jako efektywna w

minimalizowaniu średniego oraz maksymalnego opóźnienia w wykonywaniu zadań (Kim i in. 2003). Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i z minimalną wartością:

$$Z_i = \text{Max}\{ODD_{i,j}, t + P_i^m\} \quad (10)$$

8) CR+SPT - Reguła priorytetowa, która łączy CR (ang. *critical ratio*) oraz najkrótszy czas wykonania zadania na danym stanowisku (SPT). Podczas obliczania tej reguły zadania oczekujące w kolejce na danym stanowisku dzielone się na dwie kolejki. Kolejka zadań już opóźnionych ma priorytet nad innymi zadaniami. Dla tej kolejki reguła SPT jest wykorzystywana. Natomiast jeżeli nie ma zadań w tej kolejce to dla drugiej kolejki użyta jest reguła CR+SPT. Wartość CR jest obliczana według schematu:

CR = (Termin wykonania zadania – aktualny czas)/ łączny czas wykonania zadania na kolejnych stanowiskach

$$CR = \frac{D_i - t}{\sum_{m=j}^{n_i} P_i^m} \quad (11)$$

Reguła CR jest efektywną regułą przy optymalizacji parametrów wydajnościowych systemu opartych na kosztach produkcji w toku oraz opóźnień (Chiang i Fu, 2007).

Tymczasem wykazano, iż reguła CR+SPT minimalizuje średnie opóźnienie (Raghu i Rajendran, 1993). Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i z minimalną wartością:

$$Z_i = \text{Max}\{CR \cdot P_i^m, P_i^m\} \quad (12)$$

9) S/OPN (ang. *Minimum Slack time per remaining Operation*) – Jest to reguła łącząca ewentualne opóźnienie w wykonaniu zadania oraz liczbę pozostałych operacji do wykonania. Zasada obliczania opóźnienia przedstawiona jest wzorem 13.

opóźnienie = termin wykonania zadania – aktualny czas - łączny czas wykonania zadania na kolejnych stanowiskach

$$s_i = D_i - t - \sum_{m=j}^{n_i} P_i^m \quad (13)$$

Reguła S/OPN dobrze sprawdza się w minimalizacji średniego oraz maksymalnego opóźnienia (Rajendran i Holthaus, 1999).

Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i z minimalną wartością:

$$Z_i = \begin{cases} \frac{s_i}{n_i - j + 1} & \text{if } s_i \geq 0 \\ s_i \cdot (n_i - j + 1) & \text{if } s_i < 0 \end{cases} \quad (14)$$

10) S/RPT + SPT - (ang. *slack per remaining process time and shortest process time*). Reguła biorąca pod uwagę kilka atrybutów pojedynczego zadania związanych z: czasem wykonania zadania na danym stanowisku, opóźnieniem oraz czasem pozostałych operacji do wykonania. Reguła S/RPT została określona przez Anderson i Nyirenda (1990) zgodnie z następującym schematem:

S/RPT= (termin wykonania zadania – aktualny czas - łączny czas wykonania zadania na kolejnych stanowiskach)/ łączny czas wykonania zadania na kolejnych stanowiskach

$$S / RPT = \frac{D_i - t - \sum_{m=j}^{n_i} P_i^m}{\sum_{m=j}^{n_i} P_i^m} \quad (15)$$

Reguła S/RPT+SPT dobrze sprawdza się w zmniejszaniu parametrów wydajnościowych systemu związanych z opóźnieniem zadań (Raghu i Rajendran, 1993).

Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i z minimalną wartością:

$$Z_i = \text{Max}\{S / RPT \cdot P_i^m, P_i^m\} \quad (16)$$

11) PT+WING+SL (ang. *process time, slack and work in the next queue*). Wieloatrybutowa reguła stworzona przez Rajendran i Holthaus (1999) łączy ze sobą czas wykonania zadania z opóźnieniem oraz liczbą zadań w kolejnej kolejce. WING jest regułą wybierającą jako pierwsze do obsługi zadanie, którego kolejka przed następnym stanowiskiem (operacją) ma najmniejszą kolejkę.

$$WING = \text{Min}\{W_i\} \quad (17)$$

Reguła PT+WING+SL wykazuje dobre właściwości w minimalizowaniu maksymalnego opóźnienia oraz minimalizowaniu średniego czasu przejścia (Jayamohan i Rajendran, 2000)

Najwyższy priorytet jest przypisywany zadaniu i z minimalną wartością:

$$Z_i = P_i^m + W_i + \text{Min}\{s_i, 0\} \quad (18)$$

2.4.3 Funkcje kryterialne modelu oceny systemu produkcyjnego

Jako funkcje kryterialne modelu oceny wieloproduktowego, złożonego systemu produkcyjnego zostały przyjęte często używane w literaturze szeregowania zadań miary efektywności, do których należą:

- Średni czas cyklu produkcyjnego – średni czas, jaki zlecenie/zadanie spędza w systemie produkcyjnym w danym okresie planistycznym.

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (19)$$

- Maksymalny czas cyklu produkcyjnego – maksymalny czas, jaki zlecenie/zadanie spędza w systemie produkcyjnym w danym okresie planistycznym.

$$F_{\max} = \text{Max}\{F_i\} \quad (20)$$

- Średnie opóźnienie - średnie opóźnienie w wykonywaniu zleceń/zadań w danym okresie planistycznym.

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i \quad (21)$$

- Maksymalne opóźnienie - maksymalne opóźnienie w wykonywaniu zleceń/zadań w danym okresie planistycznym.

$$T_{\max} = \text{Max}\{T_i\} \quad (22)$$

Rozdział 3

Optymalizacja systemów z wykorzystaniem dynamicznych reguł priorytetowych

3.1 Analiza problemu optymalizacji systemów

Analizując złożone systemy, nie tylko produkcyjne, dochodzi się do problemu ich optymalizacji, czyli określenia najlepszego (optymalnego) rozwiązania z punktu widzenia określonego kryterium. Optymalizację systemów złożonych można klasyfikować ze względu na różne kryteria. Pierwsze z nich odnosi się do tego, czego optymalizacja ma dotyczyć. Można tu wyróżnić:

- optymalizację wskaźnika efektywności – znalezienie parametrów sterujących przy których osiąga się najlepsze wskaźniki efektywności, np. najmniejsza ilość zapasów, najkrótszy czas przejścia przez system, największa produktywność.
- optymalizacja parametrów sterujących – optymalny dobór parametrów sterujących, przy danym z góry wskaźniku efektywności, np. dla danego poziomu produktywności w systemie znalezienie minimalnej ilości potrzebnych zasobów produkcyjnych.

Inaczej klasyfikować problemy optymalizacyjne można ze względu na liczbę kryteriów. W zależności od złożoności problemu stosuje się optymalizację jednokryterialną lub wielokryterialną.

W optymalizacji jednokryterialnej decyzja o wybraniu najlepszego rozwiązania jest podejmowana na podstawie jednego kryterium (jednej funkcji celu). Przy problemie

minimalizacji funkcji celu $f(x): D \rightarrow R^+$ problem można zdefiniować następująco: znalezienie takiej wartości $x' \in D$, że dla każdego $x \in D \setminus \{x'\}$ zachodzi:

$$f(x') < f(x) \quad (23)$$

gdzie:

x - wektor p parametrów sterujących (zmiennych decyzyjnych) $x = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$,
zmiennie mogą być zarówno ciągłe, jak i dyskretne
 D – zbiór rozwiązań dopuszczalnych

W przeciwieństwie do optymalizacji jednokryterialnej w przypadku wielokryterialnym najlepsze rozwiązanie musi być akceptowalne z punktu widzenia każdego z kryteriów. Dla problemu minimalizacji wektora funkcyjnego $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]: D^n \rightarrow R^+$ problem można zdefiniować następująco: znalezienie takiej wartości $x' \in D$, że dla każdego $x \in D \setminus \{x'\}$ zachodzi:

$$f(x') < f(x) \quad (24)$$

gdzie:

x - wektor p parametrów sterujących (zmiennych decyzyjnych) $x = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$,
zmiennie mogą być zarówno ciągłe, jak i dyskretne
 $f_i(x)$ – i -ta funkcja celu $i \in \{1, \dots, n\}$
 D – zbiór rozwiązań dopuszczalnych

W wielu zastosowaniach ekonomicznych, produkcyjnych, informatycznych i innych decyzje są podejmowane na podstawie wielu kryteriów. Dlatego optymalizacja wielokryterialna jest szeroko stosowana od wielu lat. Oczywistym staje się fakt, iż w praktyce nie ma rozwiązania idealnie optymalizującego wszystkie kryteria. Jest to spowodowane między innymi tym, iż nie da się uwzględnić wszystkich znaczących czynników optymalizacji lub też optymalizacja jednego z kryteriów narusza ograniczenia innego. Najczęściej kryteria są wzajemnie wykluczające, tzn. minimalizacja jednego z nich powoduje wzrost innych. W takim wypadku mówi się, że jedno kryterium dominuje nad innymi. Możliwe rozwiązania problemu optymalizacji dzieli się wówczas na zdominowane oraz niezdominowane – paretooptymalne (Zitzler i in., 2004). Rozwiązanie x jest zdominowane, jeśli istnieje dopuszczalne rozwiązanie y nie gorsze od x , tzn. dla każdej funkcji celu $f_i(x)$:

$$f_i(y) \leq f_i(x) \quad \text{dla } i \in \{1, \dots, n\} \quad (25)$$

Jeżeli powyższa równość nie jest spełniona to mamy do czynienia z rozwiązaniem niezdominowanym, tzn. gdy nie jest możliwe znalezienie rozwiązania lepszego z uwagi na co najmniej jedno kryterium bez pogorszenia pozostałych.

Wśród metod optymalizacji wielokryterialnej wyróżnia się (Deb, 2008):

- metody ważonych kryteriów
- metody optymalizacji hierarchicznej
- metody ograniczonych kryteriów
- metody kryterium globalnego
- metody funkcji odległości
- metody programowania celów
- heurystyczne metody optymalizacji
- ewolucyjne metody optymalizacji

Wyżej wymienione metody, oprócz dwóch ostatnich pozycji, należą do tradycyjnych metod optymalizacji wielokryterialnej, dla których coraz częściej alternatywą w wielu problemach praktycznych, takich jak optymalizacja złożonych systemów produkcyjnych, stają się algorytmy heurystyczne oraz ewolucyjne. Jest to spowodowane tym iż lepiej one radzą sobie w przypadku gdy mamy do czynienia z dużą przestrzenią poszukiwań, nieznanymi zależnościami pomiędzy poszczególnymi funkcjami celu oraz dużą liczbą rozwiązań w sensie Pareto. Wielokryterialne podejmowanie decyzji (ang. *MCDA – multiple criteria decision aiding*), które stanowi niejako część optymalizacji wielokryterialnej, jest ustrukturyzowaną techniką radzenia sobie z wieloma złożonymi kryteriami, które wpływają na podejmowanie decyzji (Saaty, 2001), ponieważ umożliwia wizualizację racjonalno-logicznej struktury problemu przez reprezentowanie i ilościowe znaczenie jej elementów, odnosząc je do ogólnego celu. Obserwacja i ocena licznych kryteriów oceny efektywności złożonych systemów produkcyjnych, prowadzona poprzez różne, często wykluczające się cele materialne i niematerialne, odbywa się przeważnie w długim horyzoncie czasowym.

W złożonych wieloproduktowych systemach produkcyjnych występują elementy (składniki systemu), które wzajemnie wpływają na siebie, a przez to na wynik optymalizacji takiego systemu w rozumieniu podnoszenia jego efektywności. Dodatkowym utrudnieniem w optymalizacji takich systemów jest fakt, iż wiele jego elementów cechuje się wysokim stopniem losowości (tak jak to opisano w podrozdziale 1.2 oraz 1.3). Zatem biorąc pod uwagę wyżej wymienione argumenty oraz fakt, iż podjęcie decyzji na którą składa się kilka, lub nawet więcej, kryteriów oceny efektywności systemu złożonego powoduje, że problem jego optymalizacji jest nie tylko wielokryterialny ale też bardzo trudny do rozwiązania.

3.2 Model oceny wieloproduktowego systemu produkcyjnego

Badanym obiektem w pracy jest model wieloproduktowego systemu produkcyjnego z priorytetami dynamicznymi na przykładzie systemu offsetowej produkcji poligraficznej. Zamodelowanie złożonego, wieloproduktowego systemu z priorytetami jest konieczne w analizie przepływów, czasów, liczby zadań w systemie oraz w obliczaniu pożądaných parametrów wyjściowych, które mogą służyć do oceny efektywności systemu. Wyrasta tu problem optymalizacji systemu, który może być przedstawiony w następujący sposób: znalezienie optymalnych parametrów sterujących:

- wielkość bufora przed stanowiskami,
- poziom wykorzystania zasobów na stanowiskach,
- rodzaj użytej strategii priorytetów w buforze przed stanowiskami produkcyjnymi,

oraz analiza i wpływ ich wzajemnych interakcji na parametry wyjściowe:

- produktywność systemu,
- czasy oczekiwania w kolejkach przed stanowiskami produkcyjnymi,
- poziom półproduktów w całym systemie,
- opóźnienia w realizacji zleceń.

Nadrzędnym celem decydentów staje się opracowanie algorytmu optymalizacyjnego, który potrafiłby odpowiedzieć, które zlecenie opłaca się bardziej najpierw wykonać na poszczególnych stanowiskach produkcyjnych oraz jakie powinny być wielkości buforów przed danym stanowiskiem. Algorytm powinien minimalizować czasy oczekiwania w kolejkach, liczbę półproduktów w systemie a przez to maksymalizować zyski całego systemu. Istotną zatem kwestią jest ocena, które ustawienie parametrów sterujących daje lepsze wyniki całego systemu. Okazuje się to trudnym zagadnieniem ponieważ ocena na podstawie wielu parametrów wyjściowych systemu jest trudna w rozumieniu zbudowania funkcji kryterialnej maksymalizującej zyski. Zagadnienie optymalizacji złożonego, wieloproduktowego systemu produkcyjnego może być sformułowane następująco jak poniżej.

3.2.1 Założenia

- System produkcyjny może produkować n różnych produktów w tym samym czasie. Marszruta technologiczna jest dana do każdego typu produktu.
- Zamówienia na produkty przychodzą do systemu zgodnie z rozkładem Poissona (populacja potencjalnych klientów jest nieskończona).
- Składniki wchodzące do systemu udają się do pierwszego stanowiska danego im z ich ścieżki technologicznej.
- Po skończonej obsłudze na danym stanowisku półprodukt opuszcza je udając się do kolejnego stanowiska wynikającego z jego marszruty technologicznej. Jeśli kolejne stanowisko jest zajęte to półprodukt czeka w kolejce na wywołanie do obsługi.
- Produkt opuszcza system wraz z zakończeniem obsługi na ostatnim stanowisku produkcyjnym w systemie.
- Każde zamówienie na produkt charakteryzuje się szeregiem losowych parametrów określających jego typ, liczbę potrzebnych kopii, liczbę stron itp.
- Czas obsługi danego półproduktu na stanowisku jest zgodny z rozkładem normalnym (w zależności od parametrów danego półproduktu) oraz jest niezależny od poprzedzających czasów obsługi.
- Wszystkie stanowiska produkcyjne pracują bez awarii.

- Bufory przed stanowiskami produkcyjnymi, w których gromadzą się półprodukty oczekujące na obsługę, mają skończoną pojemność wynikająca z fizycznych ograniczeń hali produkcyjnej. Przed różnymi stanowiskami może być różna pojemność bufora. Wyjątkiem jest pierwsze stanowisko w systemie, zgodnie z rysunkiem 1.3, jest to stanowisko przygotowania do druku (stanowisko komputerowe), może mieć nieskończony bufor.
- W buforze przed każdym stanowiskiem produkcyjnym, może działać inna reguła priorytetowa.
- Czasy przejść pomiędzy stanowiskami produkcyjnymi są pominięte (czasy przejść są pomijalnie małe w stosunku do czasów oczekiwania oraz obsługi).
- System pracuje w stanie stabilnym, tzn. wykorzystanie zasobów na stanowiskach nie przekracza 100%.

3.2.2 Parametry wejściowe

- Indeksy:
 - Indeks stanowiska roboczego: $i = 1, 2, \dots, k$
 - Indeks typu produktu: $j = 1, 2, \dots, n$
- Strumień zamówień klientów dla n rodzajów produktów dany jest jako wektor $\Gamma^{(n)} = [\gamma_1^{(n)} \quad \gamma_2^{(n)} \quad \dots \quad \gamma_k^{(n)}]^T$
- Zamówienia te dotyczą produkcji j -tego wyrobu gotowego. Całkowity strumień wejściowy jest sumą strumieni wejściowych każdego rodzaju produktu (jest to możliwe dzięki własności superpozycji rozkładu Poissona): $\Gamma = \sum_{j=1}^n \Gamma^{(n)}$.
- $\lambda^{(n)} = [\lambda_1^{(n)} \quad \lambda_2^{(n)} \quad \dots \quad \lambda_k^{(n)}]^T$ intensywność strumienia wejściowego do stanowiska roboczego półproduktu n . Strumień składa się z przepływu z innych stanowisk roboczych oraz z zewnątrz systemu. Całkowity strumień wejściowy obliczany jest ze wzoru: $\lambda_j = \sum_{j=1}^n \lambda_j^{(n)}$ (sztuki/czas).

- Każdy proces produkcyjny $P = [p^{(1)} \quad p^{(2)} \quad \dots \quad p^{(n)}]^T$ zawiera ścieżkę stanowisk roboczych, gdzie $p^{(n)}$ jest macierzą wymiaru $k \times k$. Jeśli stanowisko robocze i należy do marszruty technologicznej produktu j to $p_{ij}^{(n)} = 1$, jeśli nie należy to $p_{ij}^{(n)} = 0$.
- Każde stanowisko robocze może zawierać zbiór maszyn (zasobów) jednego typu $M = [m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_k]^T$ wykonujących tą samą operację technologiczną.
- $\mu_{i,j}$ średni czas obsługi produktu j na stanowisku i ,
- $\sigma_{i,j}^2$ odchylenie standardowe średniego czasu obsługi produktu j na stanowisku i ,
- a_j czynnik zysku dla j -tego produktu,
- $c_{i,j}$ czynnik kosztowy związany z powierzchnią i -tego bufora dla j -tego produktu,
- $d_{i,j}$ czynnik kosztowy związany z zajmowaniem i -tego bufora przez j -ty produkt,
- T długość okresu optymalizacji.

3.2.3 Parametry sterujące

- b_i pojemność bufora przed stanowiskiem i (liczona w sztukach palet),
- pr_i wykorzystywana reguła priorytetowa w kolejce przed stanowiskiem i
 $pr_j \in \{ \text{FIFO, EDD, LOR, , SPT, LPT, EMOODD, CR+SPT, S/OPN, S/RPT + SPT, PT+WING+SL} \}$ (reguły priorytetowe opisane w podrozdziale 2.4.1),
- ρ_i wykorzystanie zasobów na stanowisku i (sterowana za pomocą liczby zasobów obsługujących dane stanowisko).

3.2.4 Parametry wyjściowe

- $Lq_{i,j}$ średnia liczba zadań dla j -tego produktu w i -tym buforze,
- F_j średni czas przepływu dla produktu j ,

- P_j produktywność systemu ze względu na produkt j (średnia liczba wyprodukowanych wyrobów gotowych typu j),
- T_j średnie opóźnienie w wykonaniu zlecenia dla produktu j

Ze względu na fakt, iż modelowany system produkcyjny jest wieloproduktowy, złożony a jego parametry wejściowe są w dużej mierze o charakterze losowym, zdecydowano się na modelowanie symulacyjne jako instrument badawczy. Jako algorytmy optymalizujące parametry sterujące w systemie w celu osiągnięcia najlepszych parametrów wyjściowych (podnoszących miary efektywności systemu) wybrane zostały nietradycyjne algorytmy optymalizacji wielokryterialnej, tzn. algorytmy heurystyczny oraz ewolucyjne. Do optymalizacji wielkości buforów przed stanowiskami produkcyjnymi wykorzystano algorytm symulowanego wyżarzania, natomiast do optymalizacji ustawienia priorytetów dynamicznych w poszczególnych buforach przed stanowiskami zostały wybrane algorytmy ewolucyjne.

3.3 Optymalizacja z wykorzystaniem symulacji

Optymalizacja na polu badań operacyjnych przez długi czas była często rozumiana jedynie w kontekście programowania matematycznego oraz modeli analitycznych. Z czasem rosnącej wydajności komputerów możliwe jest rozwiązywanie problemów optymalizacyjnych z tysiącami zmiennych oraz bardzo dużą przestrzenią możliwych rozwiązań. Ponadto postęp obliczeniowych używanego sprzętu doprowadził do możliwości optymalizacji złożonych, rozbudowanych systemów (np. produkcyjnych). W takich systemach jednakże konieczne jest zastosowanie optymalizacji opartej na symulacji w celu oszacowania jego efektywności. Symulacja pozwala na sprawdzenie jak radzi sobie system przy danym ustawieniu jego parametrów, bez ingerencji w system rzeczywisty. Szczególną uwagę przywiązuje się do wyboru wartości różnych czynników wpływających na koszty i wydajność systemów. Czynniki te mogą odnosić się konfiguracji fizycznych systemu (np. liczba maszyn, wielkość buforów) lub mogą dotyczyć parametrów zarządzania systemem (np. użyte strategie priorytetowe, zasady magazynowania).

Problem do rozwiązania jest określany jako znalezienie wartości n zmiennych wektora $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$, gdzie zmienna (parametr sterujący) X_i w zastosowaniu produkcyjnym może mieć charakter zarówno rzeczywisty (np. prędkość pracującego taśmociągu), całkowity (np. liczba dostępnych miejsc na magazynie lub wielkość buforów przed stanowiskami produkcyjnymi) jak i niemierzalny, jako wartość z pewnego skończonego zbioru (np. konkretna reguła priorytetowa ze zbioru możliwych reguł). Takie podejście do optymalizacji wymaga odpowiednich metod, które uwzględniają różne rodzaje zmiennych, złożoność optymalizowanego systemu oraz fakt iż różne parametry sterujące nie są niezależne. Dlatego w niniejszej pracy zdecydowano się na wybór algorytmów heurystycznych i ewolucyjnych jako metod optymalizacji połączonych z symulacją komputerową.

Chociaż komputerowe modelowanie symulacyjne stało się potężnym narzędziem w analizie złożonych systemów i procesów to nie jest łatwo je zastosować w optymalizacji. Dzieje się tak dlatego, iż funkcje celu (miary efektywności) takie jak liczba wyprodukowanych wyrobów, zużycie maszyn nie są wyraźnie, bezpośrednio zależne tylko od wartości parametrów sterujących ale także od losowości spowodowanej własnościami modelu systemu jak i samym przebiegiem poszczególnych replikacji w symulacji. Dlatego próba znalezienia optymalnego rozwiązania w optymalizacji opartej na symulacji jest trudna oraz musi uwzględniać dodatkową złożoność w postaci losowości samej symulacji (Wang i Chatwin, 2005).

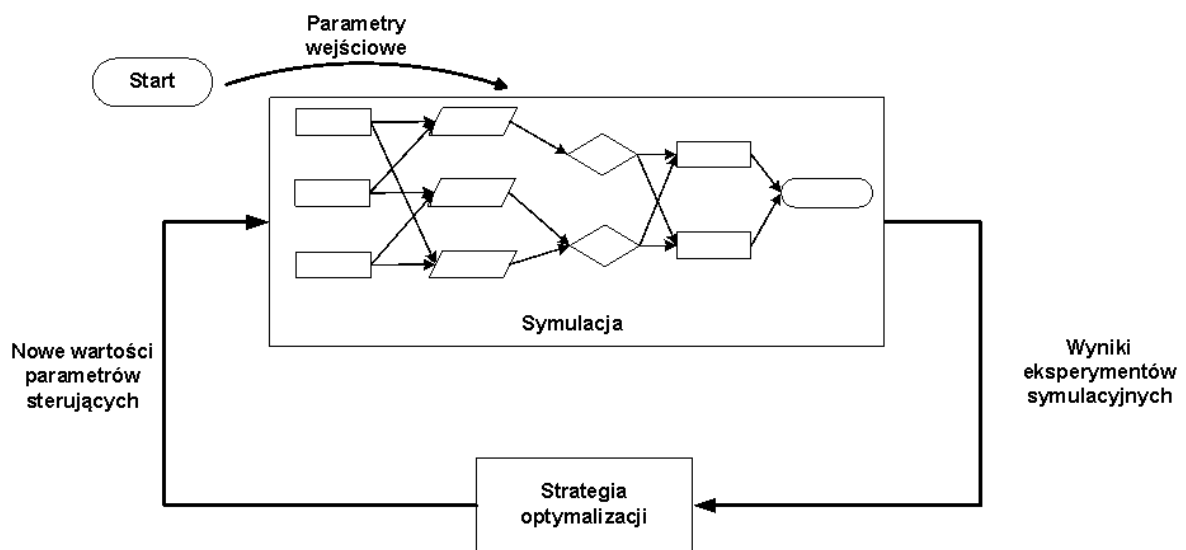
Optymalizacja z wykorzystaniem symulacji jest definiowana jako iteracyjna analiza przebiegów modelu symulacyjnego z różnymi wartościami parametrów sterujących, w próbie określenia systemu o najlepszej funkcji celu (najlepszych parametrach efektywności) (Barton i Meckesheimer, 2006). Schemat optymalizacji opartej na symulacji zaprezentowano na rysunku 3.1, na którym widać trzy główne etapy tej metodyki:

- symulacja - przebieg powtarzalnych eksperymentów symulacyjnych
- obliczanie funkcji celu – analiza rozwiązania pod kątem efektywności systemu
- algorytm optymalizujący – optymalizacja parametrów sterujących przekazywanych jako nowe zmienne do symulacji

Formalizując, problem optymalizacji (tutaj maksymalizacji) opartej na symulacji może być wyrażony jako:

$$\max_{X \in D} f(X)$$

gdzie $f(X) = E[L(X, \omega)]$ to wartość oczekiwana funkcji celu (wskaźnika efektywności) obliczana za pomocą symulacji, $L(X, \omega)$ to pojedyncza funkcja celu, $X = (X_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ to wektor parametrów sterujących oraz każdy parametr X_i jest wartością zmiennej rzeczywistej, całkowitej lub jakościowej przestrzeni dopuszczalnych parametrów sterujących $D = \otimes_{i=1, \dots, n} D_i$, a ω reprezentuje czynnik losowy wpływający na system.



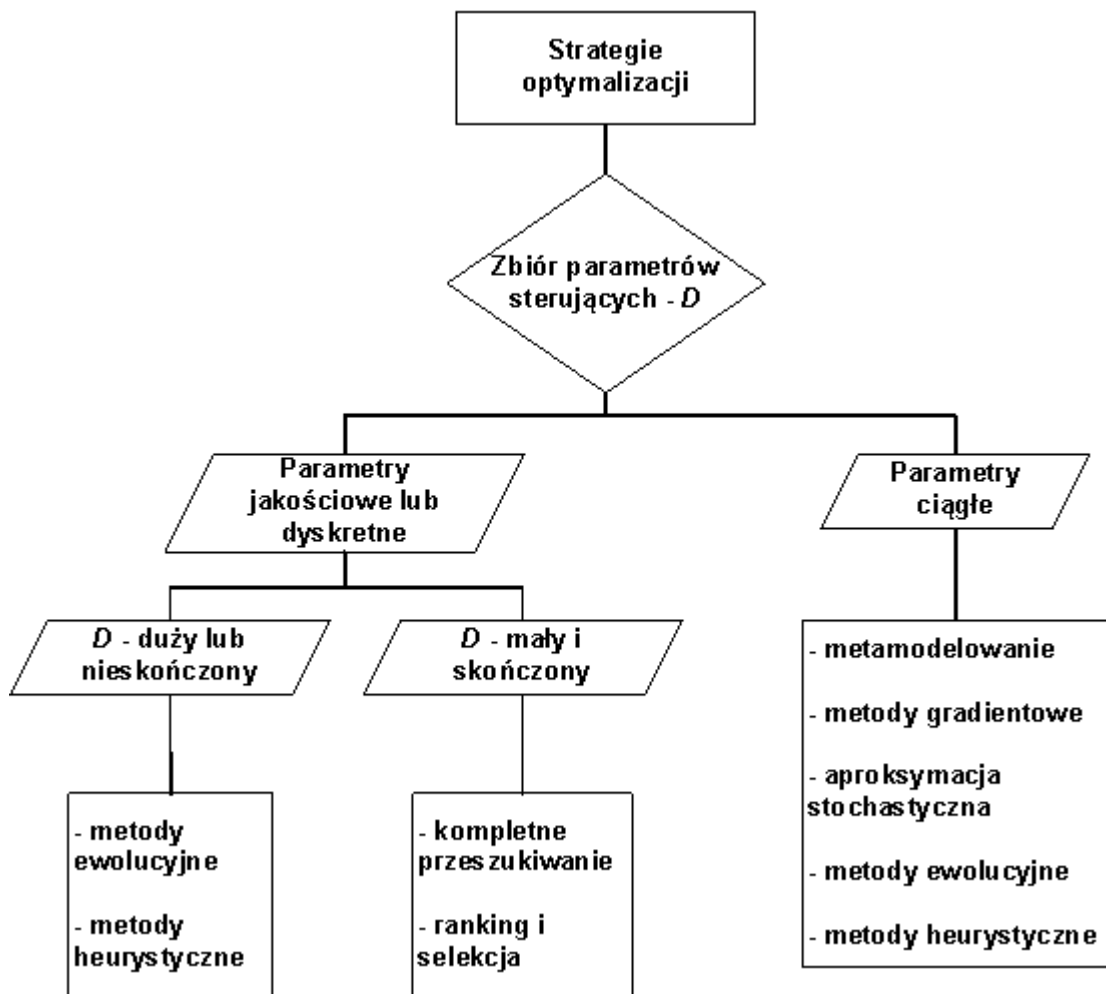
Rys. 3.1 Optymalizacja oparta na symulacji

Przeprowadzono wiele badań problemu optymalizacji z wykorzystaniem symulacji. Można w nich wyróżnić cztery rodzaje strategii optymalizacji (Fu 1994, Pierreval i Tautou 1997):

- metody gradientowe
- metamodelowanie
- metody rankingu i selekcji
- metody heurystyczne oraz ewolucyjne

Wybór odpowiedniej metody zależy od natury funkcji celu f oraz przestrzeni dopuszczalnych parametrów sterujących D . Jeżeli przestrzeń dopuszczalnych parametrów

sterujących D jest dyskretna lub parametry mają charakter jakościowy to wybierane są metody rankingu i selekcji oraz metody heurystyczne lub ewolucyjne. Jeśli natomiast D ma charakter ciągły oraz funkcja f jest ciągła to wybierane są metody gradientowe lub metamodelowanie oparte na metodzie płaszczyzny odpowiedzi. Wymienione strategie optymalizacji opartej na symulacji pokazano na rysunku 3.2.



Rys. 3.2 Strategie optymalizacja opartej na symulacji w zależności natury funkcji celu f oraz przestrzeni dopuszczalnych parametrów sterujących D

Wszystkie z wymienionych strategii mają szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach, a w szczególności w systemach produkcyjnych, informatycznych i ekonomicznych. Zasadniczo celem każdego z tych podejść jest znalezienie strategii, która w najszybszym możliwym czasie przeszuka jak najwięcej rozwiązań z przestrzeni dopuszczalnych ustawień parametrów sterujących D z możliwie najmniejszą liczbą eksperymentów

symulacyjnych. Większość istniejących klasycznych metod jest skonstruowana dla przypadków gdzie przestrzeń D ma charakter ciągły – metody gradientowe, metamodelowanie. Jednakże te strategie optymalizacji nie mogą być wykorzystane kiedy parametry mają charakter jakościowy. Przykładem takiego parametru są reguły priorytetowe, które wybiera się z konkretnego, skończonego zbioru reguł dla każdego stanowiska produkcyjnego jak w problemie opracowywanym w niniejszej pracy. Ponadto, w wielu przypadkach, część z wyżej wymienionych strategii jest wrażliwa na lokalne ekstrema oraz jest dość trudna do zaimplementowania w modelowaniu symulacyjnym.

Zatem w problemach znalezienia optymalnej wielkości buforów oraz dobrania odpowiednich strategii priorytetów dynamicznych przed stanowiskami produkcyjnymi w tej pracy zdecydowano się na wybór metod heurystycznych oraz ewolucyjnych, jako strategii optymalizacji złożonego systemu produkcyjnego.

Podsumowując można uznać, że dyskretna symulacja zdarzeniowa jest podstawowym narzędziem w analizie oraz projektowaniu złożonych systemów. Dla modelu symulacyjnego i każdego zestawu możliwych parametrów wejściowych eksperymentu symulacyjnego, wyjście, które jest losowe, nie jest zoptymalizowane. Dlatego aby poprawiać efektywność badanych systemów symulacja musi być powiązana z odpowiednią metodą optymalizacji, aby jej użycie było zasadne. Zatem metody optymalizacji, takie jak: algorytmy ewolucyjne, algorytmy heurystyczne muszą być zastosowane w optymalizacji funkcji celu (Wang i Chatwin, 2005).

3.4 Optymalizacja buforów przed stanowiskami przy użyciu algorytmu symulowanego wyżarzania

W problemie znalezienie optymalnych wielkości buforów przed każdym stanowiskiem w złożonym systemie produkcyjnym istnieje bardzo duża przestrzeń poszukiwań. Przestrzeń ta jest dodatkowo wielowymiarowa. W systemie, w którym istnieje 12 stanowisk produkcyjnych, a przed każdym z nich znajduje się bufor, w którym gromadzą się półprodukty oczekujące na wykonanie, istnieje znaczna liczba ustawień wielkości buforów zakładając, że każdy z nich może osiągać dowolne wartości dyskretne całkowite

ograniczone jedynie fizyczną dostępnością miejsc w konkretnym systemie produkcyjnym. Znalazienie optymalnej wielkości buforów jest istotne w kontekście późniejszego ustawienia najlepszej kolejności zadań do wykonania w każdym z nich. Każdy bufor przed stanowiskiem produkcyjnym będzie mógł mieć przydzieloną inną regułę priorytetową. Ograniczona pojemność danego bufora oznacza, iż jeśli będzie on zapełniony to system produkcyjny pracujący w systemie ssącym nie pobierze elementu ze stanowiska poprzedniego, co spowoduje zastój w produkcji na wcześniejszych stanowiskach.

Jako algorytm optymalizacyjny przedstawionego problemu użyto algorytmu symulowanego wyżarzania, który jest heurystyczną procedurą przeszukiwania dyskretnych przestrzeni rozwiązań, który jako pierwszy został użyty przez Kirkpatrick i in. (1983). Sposób działania symulowanego wyżarzania nieprzypadkowo przypomina zjawisko wyżarzania w metalurgii, w którym to pewne ciała, np. metal, są rozgrzewane a następnie stopniowo schładzane aż do osiągnięcia krystalizacji. Celem tego procesu jest osiągnięcie jak najniższego stanu energetycznego obrabianego ciała. Podstawowa idea algorytmu to zezwolenie na przeszukiwanie w kierunku, pod pewnymi warunkami, nawet, gdy funkcja celu się pogarsza. Algorytm dzięki swojej naturze ma szansę wyjść z lokalnych optimum i zastygnąć na optimum globalnym (Miettinen 2006, Bianchi i Dorigo 2009).

Początkowo, prawdopodobieństwo przyjęcia gorszych rozwiązań jest dość wysokie, a nowe rozwiązania są wybierane ze stosunkowo dużego możliwego zbioru. Podczas trwania algorytmu, prawdopodobieństwo zmniejsza się wraz ze zbiorem możliwych rozwiązań. W ten sposób algorytm najpierw szuka rozwiązań bardziej globalnie, a wraz z upływem kolejnych iteracji, lokalnie. Algorytm symulowanego wyżarzania oparty jest na zasadzie lokalnych heurystyk poszukiwań i wykorzystuje predefiniowaną strukturę sąsiedztwa dla przestrzeni możliwych rozwiązań. Parametr sterujący, który nazywa się temperaturą w sposób analogiczny do procesu wyżarzania metali, reguluje proces wyszukiwania. W każdej iteracji obliczane jest rozwiązanie sąsiadujące y w stosunku do bieżącego rozwiązania x . Punkt y jest akceptowany, jako punkt wyjściowy dla kolejnej iteracji, jeśli jest lepszy od obecnego punktu iteracji, tzn. funkcja celu: $f(y) < f(x)$ (problemem minimalizacji) lub nawet, jeśli jest gorszy od punktu obecnej iteracji, ale tak zwane spełnia tzw. kryterium Metropolis:

$$e^{-\frac{f(x)-f(y)}{T}} > p \quad (26)$$

gdzie p liczbą losową z jednostajnego rozkładu z przedziału $[0,1]$. Parametru $T > 0$ jest tzw. temperaturą i zmniejsza się wraz z kolejnymi iteracjami algorytmu. Zasady

zmniejszenia się temperatury nazywane są planem chłodzenia. W celu określenia owego planu chłodzenia należy podać:

- Temperaturę początkową T_{min} ,
- Temperaturę końcową T_{max} ,
- Zasadę zmniejszania się temperatury.

Typowy pseudokod algorytmu symulowanego wyżarzania wygląda następująco (dla problemu minimalizacji):

1. Ustawienie rozwiązania początkowego $x_0 \in S$ (S to przestrzeń dopuszczalnych rozwiązań)

2. Ustawienie temperatury początkowej $T_{min} > 0$ oraz końcowej $T_{max} > 0$

3. Ustawienie $x = x_0$ jako początkowego rozwiązania oraz $T = T_{min}$ jako początkowej temperatury

4. Powtarzanie kroków od 4.1 do 4.5 dopóki $K = K_{max}$

4.1. Losowe wygenerowanie rozwiązania y w sąsiedztwie x

4.2. Obliczanie $f(y)$

4.3. Jeśli $f(y) < f(x)$ wtedy

- $f(y) = f(x)$

- $x = y$

4.3.1. Obliczanie $e^{-\frac{f(x)-f(y)}{T}}$

oraz wygenerowanie losowej wartości p , $0 < p < 1$

4.3.2. Jeśli $e^{-\frac{f(x)-f(y)}{T}} > p$ wówczas ustawienie

- $f(y) = f(x)$

- $x = y$

4.4 Jeśli nie, zmiana x oraz $f(x)$

4.5
$$T = T_{max} \cdot \left(\frac{T_{min}}{T_{max}} \right)^{\frac{K}{K_{max}}}$$

$K = K + 1$

gdzie K jest bieżącą iteracją a K_{max} odgórnie ustaloną liczbą wszystkich iteracji algorytmu

W literaturze algorytm symulowanego wyżarzania jest często wykorzystywany razem z dyskretną symulacją komputerową. Haddock i Mittenthal (1996) zastosowali algorytm symulowanego wyżarzania w połączeniu z modelem symulacji do określenia kombinacji wartości parametrów wejściowych, które maksymalizują zysk hipotetycznego systemu produkcyjnego. W artykule Bulgak i Sanders (1988) zaproponowano użycie algorytmu symulowanego wyżarzania do optymalizacji buforów w systemie montażowym. Część autorów wprowadza zmiany do algorytmu polegające na zapamiętaniu najczęściej wybieranych rozwiązań, jako oszacowania najlepszego rozwiązania lub połączenia algorytmu symulowanego wyżarzania do poszukiwania z zakazami, które polega na odrzucaniu kierunków dających najgorsze wyniki funkcji celu (Alrefaei i Andradóttir 1999, Andradóttir 1996).

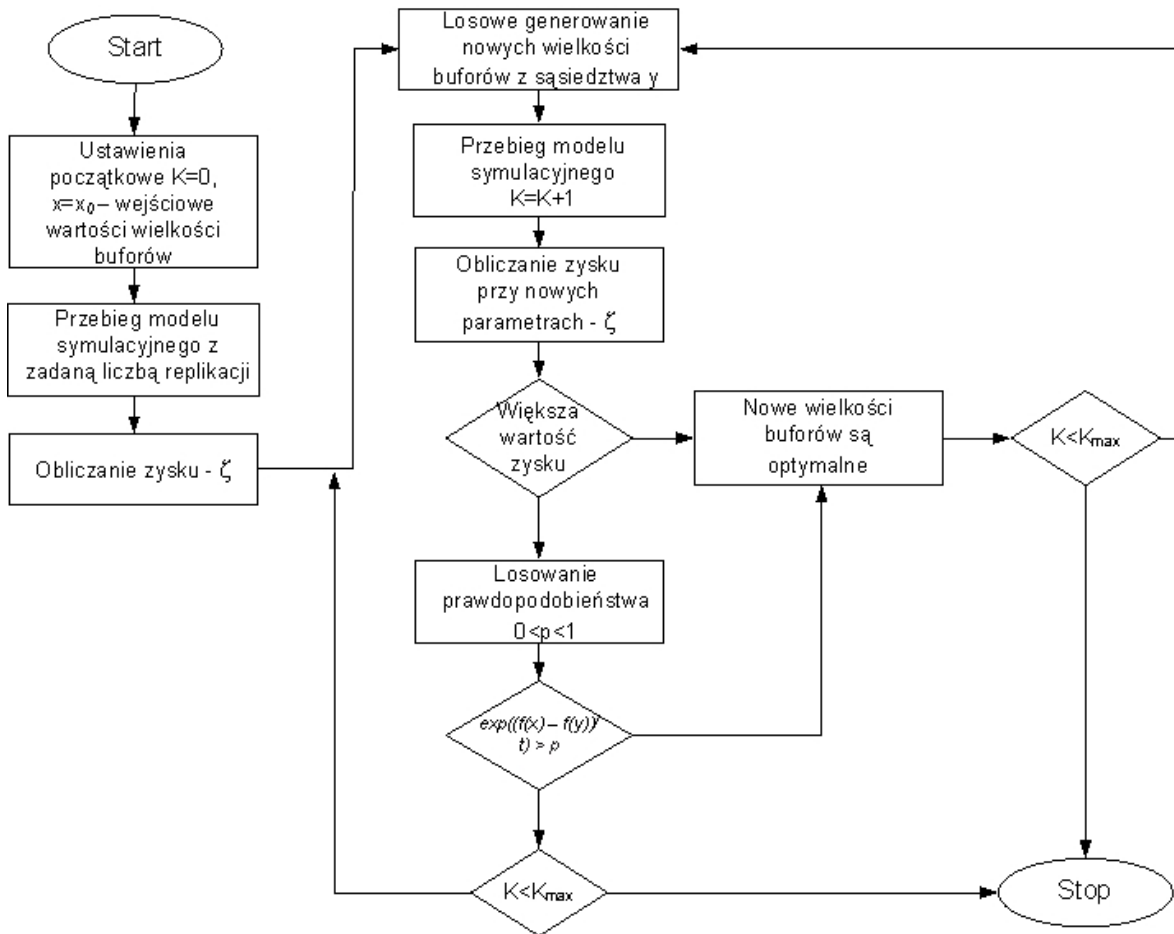
Uproszczony schemat optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu symulowanego wyżarzania oraz symulacji, który jest wykorzystywany w badaniach w tej pracy, został przedstawiony na rysunku 3.3. Procedura startuje nadając wartości początkowe parametrów do modelu symulacyjnego (rozmiary buforów, czasy operacji itp.). Zostaje przeprowadzonych kilka niezależnych replikacji przebiegu procesu w modelu symulacyjnym. Wartości obliczone na podstawie symulacji służą do obliczenia funkcji celu, której używa algorytm symulowanego wyżarzania. Wówczas wyszukuje on nowych wartości parametrów, które znów podawane są do symulacji. Algorytm kończy działanie dla ustalonej wcześniej liczby iteracji.

Funkcja celu w badaniach poszukiwania optymalnej wielkości buforów określona będzie, jako całkowite zyski produkcji dla optymalizowanego okresu planistycznego T :

$$\zeta = \sum_{j=1}^t a_j \cdot P_j - \sum_{j=1}^t \sum_{i=1}^k b_i c_{i,j} - \sum_{j=1}^t \sum_{i=1}^k Lq_{i,j} d_{i,j} \rightarrow \max \quad (27)$$

Przedstawiona funkcja celu, maksymalizująca zysk, została opracowana i rozszerzona na podstawie funkcji celu opracowanej w artykule Shi i Gershwin (2009). Wartość P_j jako miara produktywności systemu zależy zarówno od pojemności buforów jak i użytej strategii priorytetów w buforze. Pierwszy składnik funkcji może być rozumiany, jako

przychody w związku z liczbą wyprodukowanych wyrobów a kolejne dwa, jako koszty związane z magazynowaniem oraz przestojami.



Rys. 3.3 Wykorzystanie algorytmu symulowanego wyżarzania w odnajdywaniu optymalnego rozmieszczenia buforów dla systemu produkcyjnego

3.5 Optymalizacja alokacji reguł priorytetowych przed każdym stanowiskiem przy użyciu algorytmów ewolucyjnych

Charakterystyka problemu przydziału odpowiednich reguł priorytetowych do poszczególnych stanowisk produkcyjnych, która wpisuje się w ogólny problem szeregowania zadań została szczegółowo opisana w rozdziale 2 niniejszej pracy (w szczególności problem złożoności w podrozdziale 2.3.3). Głównym założeniem wyróżniającym przeprowadzone w tej pracy badania nad innymi jest fakt, iż w złożonym

systemie produkcyjnym, w którym istnieje wiele stanowisk roboczych, każde stanowisko może być obsługiwane za pomocą innej reguły priorytetowej, a nie jedna strategia priorytetowa jest przypisana dla całego systemu. W przypadku m stanowisk roboczych i k reguł priorytetowych, mamy do czynienia z m -wymiarową przestrzenią rozwiązań, a w każdym wymiarze istnieje k możliwych wartości. Zatem dostajemy k^m wszystkich możliwości wyboru odpowiedniej reguły priorytetowej przed poszczególnymi stanowiskami produkcyjnymi. W przypadku złożonych systemów produkcyjnych, w których liczba stanowisk jest większa niż 8 oraz liczbie reguł priorytetowych większej niż 11 (tyle reguł zostało opisanych w podrozdziale 2.4.1 i użytych w badaniach w niniejszej pracy) dostajemy ponad 8 miliardów wszystkich możliwych ustawień. Algorytmy dokładne oraz wszelkie klasyczne metody optymalizacji nie są w stanie w akceptowalnym czasie przeszukać takiej dużej przestrzeni rozwiązań. Zatem jako strategię optymalizacji wybrano rodzinę metod ewolucyjnych ze względu na charakter jakościowy parametru sterującego – reguła priorytetowa, a także ze względu na szybkość działania oraz łatwą implementację w modelu symulacyjnym.

3.5.1 Algorytm genetyczny

Algorytm genetyczny należy do grupy algorytmów ewolucyjnych, które inspirowane są procesami biologicznej ewolucji. Algorytmy ewolucyjne są to procedury losowego przeszukiwania wzorowane na mechanice genetycznej oraz procesach naturalnej selekcji. Najczęściej stosowane są do zadań optymalizacyjnych i modelowania. Główne rodzaje algorytmów ewolucyjnych to (Michalewicz, 2003):

- Algorytmy genetyczne
- Programowanie genetyczne
- Strategie ewolucyjne
- Programowanie ewolucyjne

Wszystkie algorytmy ewolucyjne dzielą te same podstawowe koncepty, ale różnią się w sposobie kodowania rozwiązań i rodzajami operatorów używanych do tworzenia kolejnych populacji. W tej pracy użyty został algorytm genetyczny z modyfikacjami operatorów genetycznych, ze względu na jakościowy charakter zmiennej, którą trzeba zakodować, tzn. rodzaj użytej reguły priorytetowej. Strategie ewolucyjne oraz

programowanie ewolucyjne używają zakodowanej zmiennej w postaci liczby rzeczywistej, więc ich użycie nie jest możliwe.

Zaproponowane przez Hollanda (1975) algorytmy genetyczne stanowią najpopularniejszą rodzinę algorytmów ewolucyjnych. Algorytmy genetyczne używając iteracyjnie operacji genetycznych: selekcji, krzyżowania oraz mutacji operują na tak zwanych populacjach osobników. Osobnik reprezentuje zakodowane rozwiązanie zadanego problemu, informacje te stanowią jego genotyp, na podstawie, którego można utworzyć fenotyp będący zestawem cech określanych przez genotyp, podlegających ocenie. Wartość liczbowa tej oceny nazywa się przystosowaniem osobnika (wartość funkcji celu). Osobniki są oceniane w każdej populacji. Rozmiar populacji jest stały. Genotyp osobnika składa się z elementarnych jednostek nazywanych genami, które mogą być liczbami całkowitymi lub dowolną wartością zmiennej jakościowej z ograniczonego zbioru. Parametrami, które muszą być określone przed rozpoczęciem działania algorytmu są: wielkość populacji, prawdopodobieństwo mutacji, warunek zakończenia działania algorytmu oraz funkcja przystosowania (funkcja celu). Podstawowe cechy algorytmów genetycznych odróżniające je od innych metod są następujące (Goldberg, 1995):

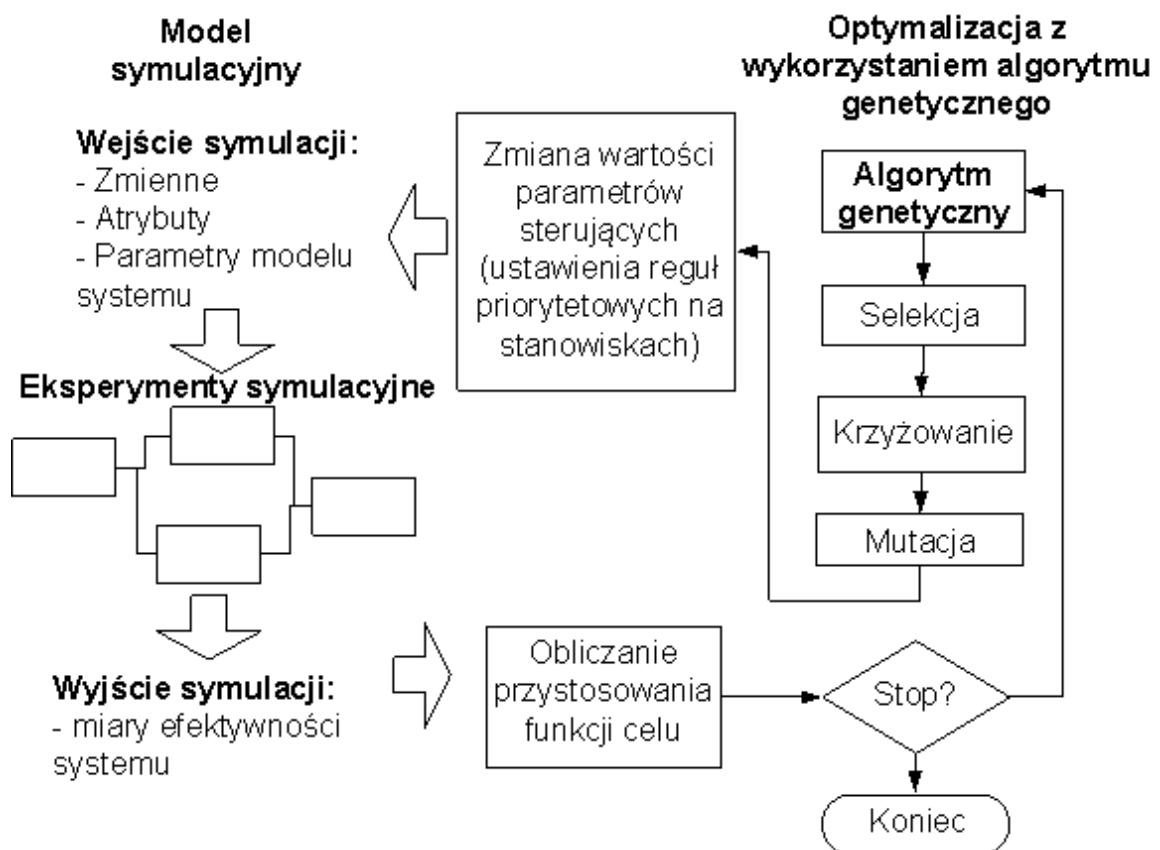
- Nie przetwarzają one bezpośrednio parametrów zadania, lecz ich zakodowaną postać.
- Prowadzą poszukiwania, wychodząc nie z pojedynczego punktu, lecz z pewnej ich populacji.
- Korzystają tylko z funkcji celu, nie zaś z jej pochodnych lub innych pomocniczych informacji.
- Stosują probabilistyczne a nie deterministyczne reguły wyboru.
- Zachowuje równowagę w przeszukiwaniu pomiędzy wykorzystaniem nowych osobników z dużej przestrzeni rozwiązań, a wykorzystaniem dobrych rozwiązań z poprzednich populacji. Dzięki temu algorytm nie jest podatny na utkwienie w optimum lokalnym.

Algorytmy genetyczne są wykorzystywane w szerokiej gamie problemów związanych z informatyką, produkcją, ekonomią lub eksploracją danych (Paul i Chaney, 1998). W szczególności są stosowane w problemach szeregowania w systemach produkcyjnych (Chen i in. 1999, Cheng i in. 1999, Hnaien i in. 2009). W niniejszej pracy wykorzystano algorytm genetyczny ze zmodyfikowanymi operatorami genetycznymi (selekcją oraz

krzyżowaniem) w celu znalezienia suboptymalnego ustawienia parametru sterującego, którym jest rodzaj użytej strategii priorytetów w buforze przed stanowiskiem produkcyjnym, dla wieloproduktowego, złożonego systemu produkcyjnego. Za funkcją celu (funkcją przystosowania w algorytmie genetycznym) wybrano jeden z parametrów efektywności. W zależności od zadania będzie to:

- Średni cykl produkcyjny
- Maksymalny cykl produkcyjny
- Średnie opóźnienie w wykonaniu produktu
- Maksymalne opóźnienie w wykonaniu produktu

Algorytm genetyczny został zaimplementowany w środowisku symulacyjnym za pośrednictwem języka Visual Basic. Dla danych ustawień parametrów sterujących (ustawienia reguł priorytetowych przed każdym stanowiskiem) model symulacyjny przekazuje wynik funkcji przystosowania do algorytmu genetycznego, który ocenia na tej podstawie dane ustawienie. Schemat optymalizacji z wykorzystaniem algorytmu genetycznego został przedstawiony na rysunku 3.4.



Rys. 3.4 Optymalizacja ustawienia reguł priorytetowych z wykorzystaniem algorytmu genetycznego

Pseudokod użytego algorytmu genetycznego został przedstawiony poniżej. W opisie użyto następującej notacji:

k – liczba osobników każdej populacji

n – liczba przebiegów algorytmu

P_c – licznik populacji bez zmiany najlepszego rozwiązania

P_l – limit populacji bez zmiany najlepszego rozwiązania

$P_c \leq P_l \quad \forall n$

m – liczba genów pojedynczego osobnika (liczba stanowisk roboczych w problemie szeregowania zadań)

r – liczba rozważanych reguł priorytetowych

X_i^j – wartość genu i -tego stanowiska ($i=1, \dots, m$) dla j -tego osobnika ($j=1, \dots, k$)

Pr_j – prawdopodobieństwo wylosowania j -tego osobnika ($j=1, \dots, k$)

F_j – wartość funkcji przystosowania dla j -tego osobnika ($j=1, \dots, k$)

N – najlepsze rozwiązanie (osobnik o największej wartości funkcji przystosowania)

Algorytm genetyczny

1. Inicjalizacja populacji początkowej

Populacja początkowa = N

2. Iteracyjne powtarzanie kroków od 2.1 do 2.6 aż do n -tego przebiegu algorytmu

2.1 Wykonanie eksperymentu symulacyjnego z ustawieniami j -tego osobnika danej populacji

2.2 Obliczanie F_j dla j -tego osobnika danej populacji

2.3 Weryfikacja warunku stopu:

Jeśli $N < F_j$

$N = F_j$

$P_c = 0$

Jeśli $N > F_j$ dla $j=1, \dots, k$

$P_c ++$

Jeśli $P_c = P_l$ to Stop

2.4 Selekcja:

Ruletka

Turniej

2.5 Krzyżowanie 2-punktowe

2.6 Mutacja 2-punktowa

Kodowanie osobników

Kodowanie osobników w algorytmach genetycznych jest zależne od rozwiązywanego problemu. Najczęściej osobnik jest zakodowany poprzez ciąg liczb rzeczywistych lub całkowitych. Kodowanie powinno być kompletne, to znaczy powinna istnieć możliwość zakodowania każdego możliwego ustawienia z przestrzeni dopuszczalnych rozwiązań. W przypadku rozważanego problemu w tej pracy parametrem sterującym, który trzeba zakodować są reguły priorytetowe, które działają na danym stanowisku. Wartość genów, jako liczba całkowita będzie odpowiadała danej regule priorytetowej (tabela 3.1).

Tabela 3.1 Zakodowane wartości reguł priorytetowych

Wartość genu	Reguła priorytetowa
1	FIFO
2	SPT
3	LPT
4	LOR
5	MOR
6	EDD
7	EMODD
8	CR+SPT
9	S/OPN
10	S/RPT+SPT
11	PT+WING+SL

Zatem każdy osobnik będzie składał się z ciągu m liczb (m – liczba stanowisk roboczych w systemie). Jest to długość chromosomu danego osobnika. Tabela 3.2

przedstawia przykładowy chromosom osobnika dla problemu optymalizacji ustawienia reguł priorytetowych w systemie produkcji poligraficznej dla 12 stanowisk roboczych.

Tabela 3.2 Przykładowe wartości chromosomu pojedynczego osobnika

Stanowisko robocze	Wartość genu	Reguła priorytetowa
RIP	7	EMODD
CTP	9	SOP/N
Maszyna offsetowa 1	9	SOP/N
Maszyna offsetowa 2	2	SPT
Schnięcie	8	CR+SPT
Odwracanie	9	SOP/N
Falcerka	9	SOP/N
Trójnóż	9	SOP/N
Gilotyna	10	S/RPT+SPT
Zbieranie składek	1	FIFO
Oprawa szyta	11	PT+WING+SL
Oprawa klejona	2	SPT

Populacja początkowa

Pierwszym krokiem w działaniu algorytmu genetycznego jest wygenerowanie początkowej losowej populacji osobników. Generowanie początkowej populacji następuje tylko raz podczas startu modelu symulacyjnego. Jest ona złożona ze zróżnicowanych osobników. Każda następna populacja jest tworzona na podstawie poprzedniej za pomocą operacji genetycznych. Na podstawie wstępnych eksperymentów przyjęte zostało, że populacja początkowa zawiera 60 osobników. Każdy gen dla j -tego osobnika populacji początkowej został wygenerowany poprzez losowanie:

X_j^i =liczba losowa z przedziału liczba całkowitych $\langle 1,11 \rangle$

Obliczanie funkcji przystosowania

Funkcja przystosowania służy do oceny danego osobnika. Wartość funkcji przystosowania otrzymywana jest z modelu symulacyjnego, jako średnia wartość ze zbioru replikacji dla danego ustawienia (dla danych wartości genów w chromosomie). W rozważanym problemie optymalizacji ustawień reguł priorytetowych przed każdym stanowisku dla systemu produkcji poligraficznej funkcją przystosowania jest jeden ze wskaźników efektywności złożonego systemu produkcyjnego (szerzej opisanych w podrozdziale 2.4.3 i 3.4):

- średni cykl produkcyjny
- maksymalny cykl produkcyjny
- średnie opóźnienie w wykonywaniu zadań
- maksymalne opóźnienie w wykonywaniu zadań
- zysk w planowanym okresie planistycznym

Operacje genetyczne

▪ *Selekcja*

Mechanizm selekcji wybiera spośród osobników danej populacji te osobniki, które będą brane pod uwagę w następnej populacji. W pracy wykorzystane zostały dwa połączone ze sobą typy selekcji: proporcjonalna (tzw. ruletka) oraz turniejowa. Jako pierwszy rodzaj użyto selekcji proporcjonalnej, która polega na przypisywaniu prawdopodobieństwa wylosowania każdemu osobnikowi z populacji zgodnie z jego wartością funkcji przystosowania. Dla problemów minimum większe prawdopodobieństwo przypisywane jest osobnikom o mniejszej wartości funkcji przystosowania, przy maksymalizacji – odwrotnie. Selekcja ma swoją interpretację w genetyce, gdzie osobniki o lepszych genach mają większe szanse na przekazanie ich kolejnym pokoleniom. Inaczej mówiąc zadaniem selekcji jest eliminowanie słabszych osobników a pozostawianie tych lepiej przystosowanych. Prawdopodobieństwo wylosowania j -tego osobnika oblicza się według następującego schematu:

$$Pr_j = \frac{Max\{F_1, F_2, \dots, F_j\} - F_j}{\sum_{j=1}^k F_j} \quad (28)$$

Za pomocą powyższego wzoru na tym etapie selekcji generowanych jest 60 zespołów osobników po 3 osobników w każdym. W każdym zespole przeprowadzona zostaje selekcja turniejowa, która wybierze najlepszego osobnika z danej trójki. Liczba 60 zespołów jest konieczna, aby do następnej populacji przeszło 60 osobników. Selekcja turniejowa polega na porównywaniu osobników danej trójki, ze względu na wartości funkcji przystosowania. Osobnik, który w zespole ma największą wartość funkcji przystosowania przechodzi do dalszych etapów algorytmu genetycznego. Po selekcji wyłanianych jest 60 osobników pogrupowanych losowo parami, gotowych do etapu krzyżowania. Dodatkowo podczas selekcji zastosowano mechanizm elitarności, to znaczy osobnik, który ma najlepszą wartość ze wszystkich osobników całej populacji automatycznie przechodzi do kolejnej populacji bez odbywania krzyżowania oraz mutacji.

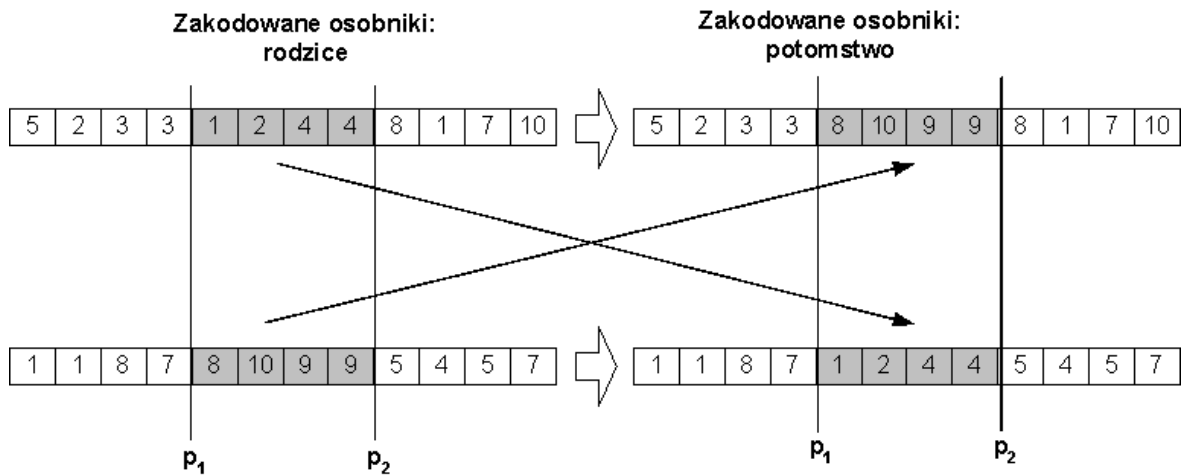
- ***Krzyżowanie***

Operacja krzyżowania odbywa się po wcześniejszej selekcji osobników i polega na wymianie materiału genetycznego pomiędzy osobnikami. Idea jest zaczerpnięta z rozmnażania płciowego, w którym potomek odziedzicza cechy obu rodziców. Z pojedynczej pary osobników tworzy się w sposób losowy nowa para poprzez krzyżowanie dwupunktowe. Dla każdej pary losowane są dwa punkty krzyżowania p_1 i p_2 (gdzie $1 < p_1 < p_2 < m$) w odległości, co najmniej trzech genów od siebie ($p_2 - p_1 > 2$), co gwarantuje wymianę, co najmniej trzech genów pomiędzy osobnikami. Zgodnie z przedstawionym wcześniej kodowaniem osobnika (tabela 3.2) przykładową operację krzyżowania można zobaczyć na rysunku XX.

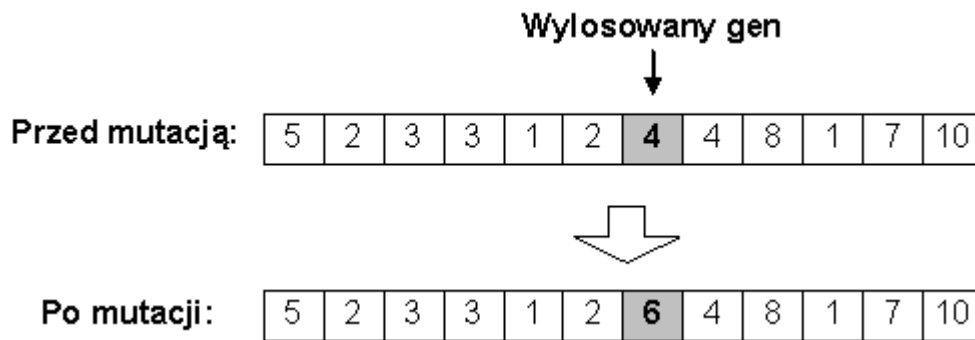
- ***Mutacja***

Po operacji krzyżowania następuje operacja mutacji, która polega na zmianie pojedynczego genu danego osobnika. Zadaniem mutacji jest wprowadzenie dodatkowej zmienności w chromosomach osobników. Pozwala to algorytmowi optymalizującemu na wyjście z minimów lokalnych. Dla każdego genu każdego osobnika z prawdopodobieństwem wynoszącym 0,05 następuje zmiana jego wartości. Zatem pojedynczy osobnik może mieć mutowanych genów więcej niż tylko jeden. Wartość

zmienionego genu jest, zgodnie przedstawionym wcześniej schematem kodowania, liczbą całkowitą od 1 do 11 inną niż wartość zmienianego genu. Wylosowanie każdej liczby z przedziału od 1 do 11 jest jednakowo prawdopodobne. Schemat mutacji przykładowego osobnika został przedstawiony na rysunku 3.6.



Rys. 3.5 Przykładowe krzyżowanie dwupunktowe



Rys. 3.6 Przykładowa mutacja

Po etapach selekcji, krzyżowania, mutacji tworzona jest nowa populacja. Następuje obliczanie wartości funkcji przystosowania dla nowo powstałych osobników. Algorytm genetyczny iteracyjnie wykonuje tą procedurę aż do momentu osiągnięcia warunku stopu lub osiągnięcia zadanej z góry liczby iteracji.

Warunek stopu

Algorytm może zatrzymać się z dwóch względów: osiągnąć zakładaną liczbę iteracji (tzn. kolejnych populacji) lub podczas działania algorytmu nie będzie zauważalnej poprawy wyników. Drugi warunek jest spełniony, gdy najlepsze rozwiązanie (osobnik z

najlepszą wartością funkcji przystosowania) pozostaje niezmienione przez ustaloną liczbę iteracji (P_I) – w tej pracy ustawione, jako 10.

3.6 Analiza wrażliwości rozwiązania optymalnego

Analiza wrażliwości jest definiowana, jako badanie, jak niepewność na wyjściu modelu jest zależne od różnych źródeł niepewności w danych wejściowych modelu danego systemu. (Saltelli i in., 2004).

Analiza ta jest kolejnym z etapów podejmowania decyzji. Pozwala ocenić, jaki wpływ na miary efektywności, przy wybranej optymalnej decyzji, miałyby zmiany podstawowych warunków zewnętrznych lub wewnętrznych działania danego systemu. Analiza wrażliwości, która często stosowana jest w naukach ekonomicznych, jest wykorzystywana dla rozważenia potencjalnego wpływu różnych struktur cen i kosztów, które mogą być związane z różnymi systemami produkcji lub operacji. Jej podstawą jest opracowanie optymistycznego i pesymistycznego wariantu zmian warunków działania przedsiębiorstwa. W tej pracy analiza wrażliwości jest używana do przewidywania podstawowych miar efektywności systemu produkcji poligraficznej, przy zastosowaniu zmiennych układów mających wpływ na wyniki. Dotyczy ona ustalania wrażliwości optymalnego ustawienia reguł priorytetowych w buforach przed stanowiskami produkcyjnymi na zmiany parametrów wejściowych modelu symulacyjnego. Zmienianymi parametrami wejściowymi w modelu będą:

- odchylenie standardowe liczby kopii danego typu produktu
- intensywność przychodzącego strumienia zamówień na dany typ produktu

Zmiany tych parametrów odzwierciedlają niepewność rynkową, którą trzeba założyć przy urzeczywistnieniu wyników optymalnego ustawienia. W badaniach można uwzględnić zmianę jednego parametru przy innych niezmienionych wartościach lub też równoczesną zmianę kilku parametrów. Analiza wrażliwości jest przydatna, gdyż (Helton i in., 2006):

- Pozwala uwypuklić podstawowe cechy problemu mające wpływ na decyzję.
- Umożliwia ocenę wpływu na podstawowe miary efektywności zmian czynników, które podlegają losowości.

- Pozwala dojść do optymalnych rozwiązań w przypadku decyzji powtarzających się w zmodyfikowanych warunkach.

Analizę wrażliwości można wykonywać zarówno dla modeli matematycznych jak i symulacyjnych złożonych systemów. Istnieje wiele sposobów podejścia do wykonywania analizy wrażliwości, które różnią się poprzez rodzaj i rozmiar wielkości wejściowych, co powoduje większą złożoność obliczeń. Dane wejściowe mogą być zarówno liniowe jak i nieliniowe, mogą być także skorelowane. Na sposób przeprowadzania analizy wrażliwości mają także wpływ interakcje pomiędzy zmiennymi wyjściowymi, to znaczy zmiany wartości dwóch lub więcej zmiennych wejściowych powodują zmiany zmiennej wyjściowej, które są większe niż przy zmianach tych zmiennych z osobna (Saltelli i in. 2008, Kleijnen 2009). W tej pracy została wykorzystana analiza wrażliwości dla modeli symulacyjnych, która ocenia zmiany parametrów wyjściowych z modelu symulacyjnego przy zmianach parametrów wejściowych tego modelu. W modelach z udziałem wielu zmiennych wejściowych, analiza wrażliwości staje się podstawowym składnikiem analizy modelu i zapewnienia jakości wyników (Cacuci i in., 2005). Większość procedur analizy wrażliwości przebiega następująco:

- Określenie niepewności każdego wejścia (zakresy, rozkłady prawdopodobieństwa). Relacje pomiędzy parametrami wejściowymi (ewentualne korelacje).
- Identyfikacja analizowanego wyjścia z modelu (analizowane wyjście powinno mieć bezpośredni związek z problemem badanym poprzez wykorzystanie modelu).
- Przeprowadzenie eksperymentów (w tym wypadku symulacyjnych) na modelu odpowiednią liczbę razy z wykorzystaniem metodyki planowania eksperymentów (DOE), która jest podyktowana metodą analizy wrażliwości oraz niepewnością wejścia.
- Korzystając z wyników wyjściowych modelu określenie wrażliwości poszczególnych wyjść (miar efektywności systemu) na zmiany wartości wejściowych.

W niektórych przypadkach procedura ta jest powtarzana, na przykład w wielowymiarowych problemach, w którym użytkownik ma do odfiltrowania nieistotne

zmienne przed wykonaniem pełnej analizy wrażliwości. Istnieją różne podstawowe grupy metod analizy wrażliwości, które są alternatywnie wykorzystywane:

- Metoda „jeden na raz” (ang. *One-at-a-time* – *OAT*) jak wskazuje nazwa polega na zmianie jednego czynnika (parametru wejściowego) przy niezmiennych pozostałych. Jest to jedna z najprostszych i najpopularniejszych metod analizy wrażliwości, w której po kolei sprawdza się wpływ poszczególnych zmiennych wejściowych na zmienne wyjściowe danego modelu.
- Metody lokalne bazujące na pochodnych cząstkowych zmiennej objaśnianej liczonej dla poszczególnych zmiennych objaśniających. Podobnie jak metody grupy OAT metody lokalne stosowane są dla małych zmian wielkości wejściowych, typowo przy zmianie jednej wielkości wejściowej. Skutkuje to tak samo jak w metodach OAT tym, że nie są określane wzajemne interakcje zmiennych wejściowych na parametry wyjściowe modelu.
- Metody oparte o wykres rozproszenia (diagram rozrzutu, wykres rozrzutu, ang. *scatter plot*) - rodzaj wykresu, który pozwala badać, jaki wpływ mają na siebie dwie zmienne. Jest to proste, ale i użyteczne narzędzie pomagające ustalić poszczególne wielkości parametrów wyjściowych poprzez losowo próbkowane punkty z rozkładów zmiennych wejściowych. Na podstawie otrzymanego diagramu można stwierdzić o kierunku współzależności tych dwu zmiennych.
- Metody związane z analizą regresji (jedno lub wieloczynnikowej) oraz narzędziami opartymi o wariancję. Metody te w przypadku, gdy istnieje więcej niż jeden parametr wejściowy (zmienna objaśniająca) biorą pod uwagę wzajemne interakcje pomiędzy nimi, co pozwala lepiej wyjaśnić zmiany wartości parametrów wyjściowych w modelu.

W tej pracy wykorzystana zostanie metoda regresji wielorakiej, która uwzględnia interakcje parametrów wejściowych. Regresja wieloraka pozwala na włączenie do równania regresji więcej niż jednej zmiennej objaśniającej oraz na poszukiwanie zależności nieliniowych. Model dla klasycznej regresji wielorakiej liniowej przy k zmiennych objaśniających wygląda następująco:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + \varepsilon \quad (29)$$

gdzie:

x_1, \dots, x_k - są zmiennymi objaśniającymi (przyczynowymi); i-ty cząstkowy współczynnik regresji opisuje o ile średni zmieni się wartość zmiennej objaśnianej Y przy wzroście wartości zmiennej x_i o jedną jednostkę przy ustalonych wartościach pozostałych zmiennych niezależnych.

b_0, b_1, \dots, b_k - cząstkowe współczynniki regresji wielorakiej

ε - błąd losowy pomiaru

Podczas stosowania modelu regresji wielorakiej należy uwzględnić następujące założenia (Aczel, 2005):

- Powinna występować zależność liniowa pomiędzy zmiennymi niezależnymi x_i a zmienna zależną Y ,
- Wartości zmiennych niezależnych muszą być ustalone (nie są losowe),
- Błąd losowy pomiaru ε musi być zmienną o średniej równej zero i stałej wariancji,
- Liczba obserwacji (w naszym przypadku liczba eksperymentów symulacyjnych) powinna przekraczać liczbę szacowanych parametrów modelu,
- Nie powinna występować silna zależności pomiędzy zmiennymi objaśniającymi. W szczególności żadna zmienna objaśniająca x_i nie powinna być kombinacją liniową innych zmiennych objaśniających.

Często jednak nie jest możliwe przyjęcie prostej (płaszczyzny lub hiper-płaszczyzny), jako funkcji odwzorowującej dane. Można wtedy zastosować inny typ regresji. Jedną z metod dobrze odzwierciedlających nieliniowy związek pomiędzy zmiennymi jest regresja wielomianowa. Metoda ta oblicza zależność między zmienną zależną a jedną lub więcej zmiennymi niezależnymi, które mogą występować w wyższych potęgach. Statystycy zalecają korzystanie z wielomianów stopnia drugiego, ewentualnie trzeciego. Nie powinno się stosować wielomianów stopnia większego od 6 (O'Hagan, 2006). Występuje wtedy ryzyko nadmiernego dopasowania do danych, stąd też należy kontrolować zarówno liczbę zmiennych objaśniających oraz stopień wielomianu, tak, aby zachować dobre zdolności predykcyjne tworzonego modelu. Model regresji wielomianowej z jedną zmienną

objaśniającą x w ogólnej postaci wygląda następująco:

$$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_nx^n + \varepsilon \quad (30)$$

gdzie:

n - jest stopniem wielomianu

ε - jest błędem losowym

Taki wielomian zmiennej x nadal jest traktowany, jako model regresji liniowej poprzez dokonywanie odpowiednich podstawień:

$$x = x_1$$

$$x^2 = x_2$$

...

$$x^n = x_n$$

Wówczas regresja liniowa dopasuje do danych wielomianu n -tego stopnia zamiast n -wymiarowej płaszczyzny.

Innym sposobem rozszerzenia regresji liniowej jest dodanie do jego modelu interakcji pomiędzy zmiennymi objaśniającymi. Jest to tak zwana regresja czynnikowa (frakcyjna), w której iloczyn dwóch lub więcej zmiennych objaśniających. Pozwala to na określenie wpływu jednej zmiennej przy różnych wartościach innej zmiennej. Przykładowy model z trzema zmiennymi objaśniającymi X_1, X_2, X_3 uwzględniający wszystkie efekty interakcji (interakcję stopnia trzeciego oraz wszystkie interakcje stopnia drugiego) przyjmuje wówczas postać:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1X_2 + b_5X_1X_3 + b_6X_2X_3 + b_7X_1X_2X_3 \quad (31)$$

Analiza wrażliwości oparta na modelach regresyjnych będzie wykorzystywana do badania rozwiązania optymalnego znalezionego przez algorytm genetyczny. Badaniu będą podlegały zmiany wszystkich wartości wyjściowych z modelu symulacyjnego (czyli odpowiednie miary efektywności systemu) użyte, jako funkcje kryterialne w optymalizacji

przy pomocy algorytmu genetycznego przy odpowiednich zmianach wartości wejściowych tego modelu.

Rozdział 4

Zastosowanie optymalizacji wieloproduktowych systemów produkcyjnych w poligrafii

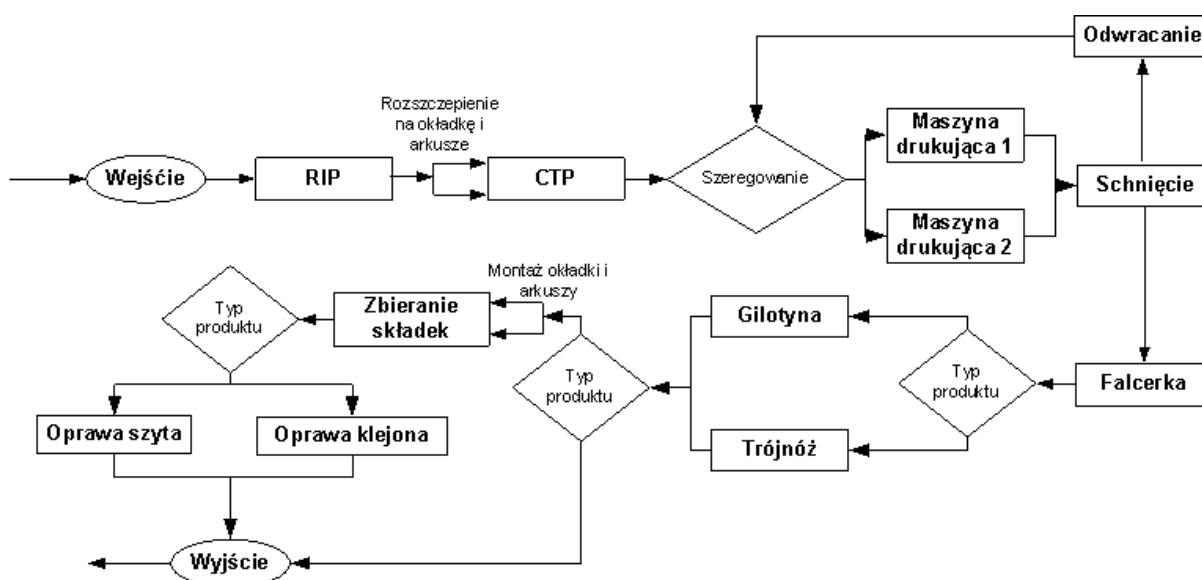
4.1 Charakterystyka badanego systemu poligraficznego

Jako obiekt badań optymalizujących alokację reguł priorytetowych oraz wpływ innych parametrów sterujących na efektywność systemu produkcyjnego wybrano system produkcji poligraficznej. Jak wykazano w analizie w podrozdziale 1.1.2 system ten należy do grupy wieloproduktowych, złożonych systemów produkcyjnych. Realizowane w tej pracy badania nad systemem poligraficznym są kontynuacją analiz przeprowadzonych w artykułach: Wiśniewski i in. 2011, Wiśniewski i in. 2012, Korytkowski i in. 2013a i 2013b.

Parametry rozważanego systemu produkcji poligraficznej zostały zaczerpnięte z rzeczywistego systemu jednej drukarni z województwa zachodniopomorskiego. Parametry te odpowiadają typowym parametrom drukarni offsetowej, dzięki temu metodologię badań można przełożyć na inne systemy produkcji poligraficznej. Analizie został poddany system składający się z 3 etapów produkcji (przygotowanie do druku, druk, prace wykończeniowe) podzielonych na 12 operacji technologicznych, zawierających pojedyncze lub równolegle pracujące maszyny (stanowiska): RIP, CTP, dwie maszyny offsetowe, stanowisko suszenia, stanowisko odwracania arkuszy, falcerka, trójnóż, gilotyna, stanowisko zbierania składek, oprawa zeszytowa, oprawa klejona. Zakładamy, że maszyna offsetowa jest minimum czterokolorowa bez odwracania. Przed każdą operacją technologiczną przewidziany jest bufor na zadania oczekujące na zwolnienie danej maszyny. Zadania z każdego bufora wybierane są do produkcji według zadanej dynamicznej reguły priorytetowej. W analizowanym systemie uwzględniany jest podział zlecenia na arkusze drukarskie w przypadku prac o większej objętości oraz kompletacja

przed ewentualną oprawą. Uproszczony schemat analizowanego systemu produkcyjnego przedstawia rysunek 4.1

Proces druku offsetowego rozpoczyna się od publikacji elektronicznej, w formacie PDF, a kończy się na wersji papierowej, powielonej zwykle w tysiącach egzemplarzy. W analizowanym systemie pierwszym stanowiskiem jest stanowisko RIP (ang. *raster image processor*), które stanowisko komputerowe ze specjalistycznym oprogramowaniem na którym występuje ostatni etap komputerowej części prac związanych z przygotowaniem do druku. Operacji na stanowisku RIP podlegają pliki postscriptowe, aby wysłać na urządzenie wyjściowe gotowy obraz rastra (czyli siatki drukowanych punktów). Etapy wcześniejszego przygotowania do druku nie będą uwzględnione.



Rys. 4.1 Schemat analizowanego offsetowego procesu produkcyjnego

Poligraficzny system produkcyjny jest odpowiednim obiektem w analizie alokacji reguł priorytetowych przed stanowiskami produkcyjnymi ze względu na swoje cechy. W systemie tym wszystkie maszyny (lub stanowiska) pracują niezależnie oraz zlecenia kumulują się w kolejkach przed każdym stanowiskiem roboczym. Wśród tych zleceń operator wybiera jedno, które będzie w danym momencie obsługiwane na danej maszynie. Zatem występuje tu problem optymalnego uszeregowania zadań na poszczególnych maszynach aby cały system działał efektywnie. Przez miary efektywności rozumie się tutaj minimalizację opóźnień w wykonywaniu zleceń, minimalizację czasów przepływu poszczególnych typów produktów oraz ich ilość produkcji w toku, a także maksymalizację zysków. Wdrożenie reguł priorytetowych jest możliwe w przedsiębiorstwie, które

wykorzystuje zintegrowane narzędzia informatyczne do zarządzania procesem produkcyjnym. Takie oprogramowanie musi umożliwiać bieżące śledzenie stanu realizacji zleceń, obciążenie parku maszynowego, przechowywać informacje o samych zleceniach oraz umożliwiać szacowanie czasu wykonywania wszystkich operacji technologicznych. Bardzo dobrze w to środowisko wpisuje się standard JDF, który może doskonale wspierać system informatyczny niezbędnymi danymi do obliczania priorytetów dla każdego zlecenia. Z tego powodu przedstawione w artykule podejście do zarządzania przepływem prac w drukarni może zostać zaimplementowane jako moduł wspierający podsystem planowania produkcji komercyjnego systemu informatycznego wspierającego zarządzanie drukarnią lub też może zostać zrealizowany jako niezależne narzędzie planistyczne.

Ze względu na dużą skalę badanego obiektu oraz złożoność samych badań zdecydowane się na modelowanie symulacyjne analizowanego systemu produkcji poligraficznej. System został zamodelowany w pakiecie symulacyjnym Arena 9.0 firmy Rockwell Software. Arena jest środowiskiem umożliwiającym przeprowadzenie badań symulacyjnych praktycznie dowolnego systemu złożonego, w tym systemów produkcyjnych (Kelton i in., 2004). Uniwersalność tego narzędzia pozwala odwzorować procesy zachodzące w każdego typu drukarni. Wykorzystanie modelu symulacyjnego do analizy wpływu alokacji reguł priorytetowych jest niezbędne, gdyż pozwala na przeprowadzenie badań procesów produkcyjnych zachodzących w firmie bez ingerencji w rzeczywistą produkcję (Law i Kelton, 2000). Oznacza, to że wszelkie analizy przeprowadza się tylko w komputerze, a wykorzystanie odpowiedniej metodyki przygotowania modelu symulacyjnego zapewnia ścisłą korelację pomiędzy wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem modelu symulacyjnego a wynikami jakie można byłoby osiągnąć przeprowadzając analogiczne badania na rzeczywistym systemie produkcyjnym (Banks i in., 2001). Raz przygotowany model symulacyjny pozwala na przeprowadzenie nawet bardzo dużej ilości analiz dla najróżniejszych konfiguracji i wariantów systemu produkcyjnego oraz profili obciążenia zleceniami itp. (Scott i Harmonosky, 2005). W modelu bardzo dokładnie odwzorowane są charakterystyki wydajnościowe wszystkich stanowisk roboczych, uwzględnione się między innymi: czasy operacji przygotowawczych i zakończeniowych, przerwy technologiczne, odpowiednio kalkulowany jest czas właściwej pracy.

4.1.1 Założenia modelu symulacyjnego

W modelu symulacyjnym analizowanego systemu produkcji poligraficznej uwzględniono 4 grupy charakterystycznych dla drukarni offsetowej produktów, które są wykonywane jednocześnie:

- Ulotka
- Plakat
- Broszura
- Książka

W modelowaniu symulacyjnym należy uwzględnić wiele elementów losowych, które wpływają na proces. Ogólnie rzecz biorąc, zakład produkcyjny jest w znacznym stopniu zautomatyzowany, ale nie deterministyczny ze względu na charakter produktu oraz przez fakt udziału ludzkich operatorów. Normalne rozkłady prawdopodobieństwa będą używane do reprezentowania czasów przezbrojeń maszyn oraz czasów operacji, które zależą od losowo generowanych cech produktu, takich jak liczba stron, liczba kopii. Użyte parametry poszczególnych typów produktu pokazano w tabeli 4.1.

Tabela 4.1 Parametry modelowanych produktów

<i>Nazwa parametru</i>		<i>Typ wyrobu</i>			
		ulotka	plakat	broszura	książka
Liczba kopii	średnia [szt.]	35000	5000	5000	1000
	odchyl. stand. [szt.]	10000	1500	1500	300
Format strony		A4, A5, A6	A2, A3	A4, A5, A6	A4, A5
Liczba stron [szt.]		1 – 2	1	śr.- 30 odch. st.-10	śr.- 400 odch. st.-150
Strumień zamówień – Rozkład Poissona z parametrem λ [godz.]:		10	10	10	15

W drukarniach wielkość zamówienia musi być konwertowana na liczbę potrzebnych arkuszy do wydrukowania. Wielkość arkuszy zależy od wielkości największego arkusza, które mogą być umieszczone na offsetowej maszynie drukarskiej, która jest dostępna w firmie. W przypadku tych badań jest to arkusz wielkości B2. Oznacza to, że na jednym arkuszu można wydrukować 4 stron formatu A4, 8 stron formatu A5 oraz 16 stron formatu

A6. Ponadto jeśli ulotka ma jedną stronę to znaczy, że będzie to tylko raz przechodzi przez maszynę offsetową. Jeżeli ulotka ma dwie strony to musi przejść przez nią dwukrotnie, a pomiędzy występuje odwrócenie stosu arkuszy, tak jak w przypadku broszury i książki. Produktem, który ma najbardziej skomplikowany proces produkcji z wyżej wymienionych jest książka. Składa się ona z okładki i wnętrza, które tworzą tak zwane składki. Proces produkcji okładki i składek jest trochę inny. Okładkę drukuje się jednostronnie na znacznie grubszym papierze niż składki wewnętrzne, który są drukowane na cienkim papierze obustronnie. Dodatkowo książka może być w różny sposób wiązana, poprzez szycie lub klejenie. We wszystkich rodzajach zleceń także liczba zamówionych sztuk produktu danego typu może się zmieniać. Dane historyczne wskazują, że zmienna odpowiadająca za liczbę sztuk może być traktowana jako zmienna losowa o rozkładzie normalnym. Liczba arkuszy, które mają być drukowane dla danego zamówienia zależy również od liczby stron, które znowu może być bardzo różna. Wobec tego, wielkość zlecenia, a więc pracochłonność obliczana jest w oparciu o: typ produktu, liczbę kopii, format strony, liczba stron oraz rodzaj okładki. Parametry te służą w modelu do obliczenia liczby potrzebnych arkuszy do wydrukowania danego zlecenia. Zatem pojedyncze zlecenie, które w modelu symulacyjnym składa się z ponad 30 zaimplementowanych atrybutów, zależy od szeregu losowych parametrów, które wpływają na proces. Te losowo generowane właściwości każdego zlecenia są kolejnym źródłem niepewności, które wpływa na proces. Musi być ono jednak uwzględnione w modelu symulacyjnym w celu przedstawienia jak najbardziej wiarygodnych wyników.

Marszruty technologiczne zostały przypisane do każdego typu produktu. Strumień zamówień na poszczególne produkty ma z natury charakter losowy. Zamodelowany on został jako zmienna o rozkładzie Poissona ze względu na niezależne wpływanie zamówień od klientów w wymiarze czasu i typu produktu. Wartości dla strumienia zamówień są także podane w tabeli 4.1. Po tym, jak zamówienia trafia do systemu idzie do pierwszego stanowiska produkcyjnego, a później do stanowisk zgodnie z jego marszrutą technologiczną. Jeżeli dane stanowisko produkcyjne jest w trakcie obsługi innego zlecenia, produkt trafia do kolejki oczekujących, z której następane zadanie do wykonania wybierane jest na podstawie reguły priorytetowej przypisanej do tego stanowiska. Produkt wychodzi z systemu po zakończeniu wykonywania ostatniej, przypisanej mu operacji. Czasy poszczególnych operacji zależą nie tylko od cech danego stanowiska (np. szybkości druku arkuszy maszyny offsetowej), ale także od losowych parametrów danego zlecenia – Tabela 4.2. Część danych przedstawionych w tym podrozdziale została zmieniona ze względu na

poufne informacje zastrzeżone przez drukarnię, na bazie której został zbudowany model symulacyjny.

Tabela 4.2 Czasy trwania operacji technologicznych na poszczególnych stanowiskach roboczych (w minutach)

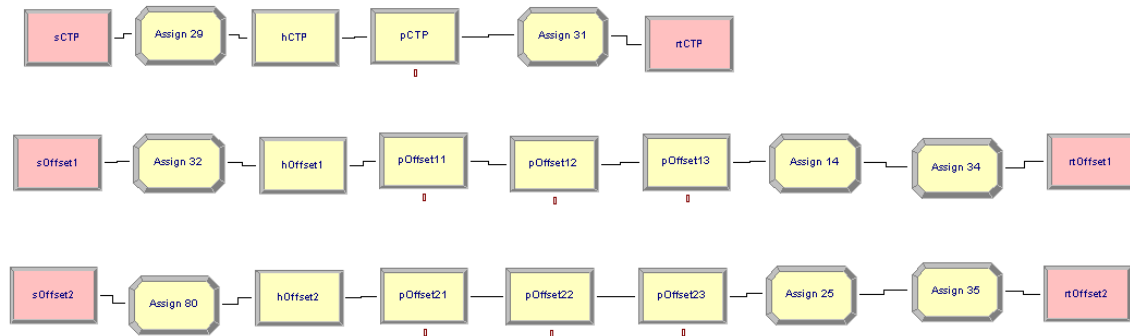
Stanowisko robocze	Wartość oczekiwana czasów przygotowawczych	Odchylenie standardowe czasów przygotowawczych	Wartość oczekiwana czasu operacji technologicznej dla 1 arkusza	Odchylenie standardowe operacji technologicznej dla 1 arkusza
RIP	0	0	$20 \cdot W_i$	0.2
CTP	0	0	$0.5 \cdot W_i$	0
Maszyna offsetowa	40	10	$0.005 \cdot W_i$	0
Stanowisko odwracania	0	0	15	2
Stanowisko schnięcia	0	0	60	15
Falcerka	15	3	$0,0075 \cdot W_i$	0
Tójnóż	20	5	$0,0075 \cdot W_i$	0
Oprawa klejona	30	8	$0,006 \cdot W_i$	0
Gilotyna	8	2	$0,002 \cdot W_i$	$0,0002 \cdot W_i$
Stanowisko zbierania składek	10	1	$0,0034 \cdot W_i$	0
Oprawa szyta	15	3	$0,005 \cdot W_i$	0
Oprawa klejona	20	3	$0,007 \cdot W_i$	0

Gdzie W_i jest wielkością zlecenia i , zależną od parametrów danego produktu przedstawionych w tabeli 4.1

Aby wiernie odwzorować analizowany system produkcji poligraficznej model symulacyjny został zbudowany z ponad 150 bloków, które służą m.in. do: odzwierciedlenia pracy stanowisk roboczych systemu; przechowywania informacji o wejściowych parametrach modelu, atrybutach zleceń; zbierania statystyk. Fragment zamodelowanego systemu produkcji poligraficznej został przedstawiony na rysunku 4.2. Parametry przeprowadzanych eksperymentów symulacyjnych były następujące:

- Okres przedbiegu - 5 dni,
- Okres pojedynczego badania - 1 rok (praca na 2 zmiany, 5 dni w tygodniu)

- Liczba identycznych i niezależnych losowo powtórzeń - 7.
- Liczba wykonanych eksperymentów symulacyjnych – w zależności od problemu, przedstawiona w kolejnych podrozdziałach.



Rys.4.2 Fragment modelu symulacyjnego z oprogramowania Arena 9.0

4.2 Wyniki optymalizacji systemu

4.2.1 Wyniki optymalizacji buforów przed stanowiskami

Optymalizacja alokacji buforów przed stanowiskami produkcyjnymi została wykonana zgodnie z algorytmem symulowanego wyżarzania przedstawionym w rozdziale 3.4. Badania zostały wykonane dla poligraficznego systemu produkcyjnego przedstawionego w podrozdziale 4.1., gdzie istnieje 12 stanowisk roboczych, a przez to 8 buforów o zmiennej wielkości – stanowiska drukowania, schnięcie i odwracania mają wspólny bufor (ze względu na specyfikę rzeczywistą ustawienia tych stanowisk w systemie – bufor składowania zadań oczekujących jest dla nich wspólny) oraz przed stanowiskiem przygotowania do druku (RIP) bufor jest nieskończony. Każdy z tych 8 buforów (wymiarów) może przybierać dowolne wartości dyskretne, całkowite, ograniczone jedynie fizyczną dostępnością miejsc w konkretnym systemie produkcyjnym. Optymalizację wielkości buforów przed stanowiskami produkcyjnymi dla systemu produkcji poligraficznej wykonano dla następujących parametrów algorytmu symulowanego wyżarzania:

- Liczba iteracji algorytmu:
 - 300

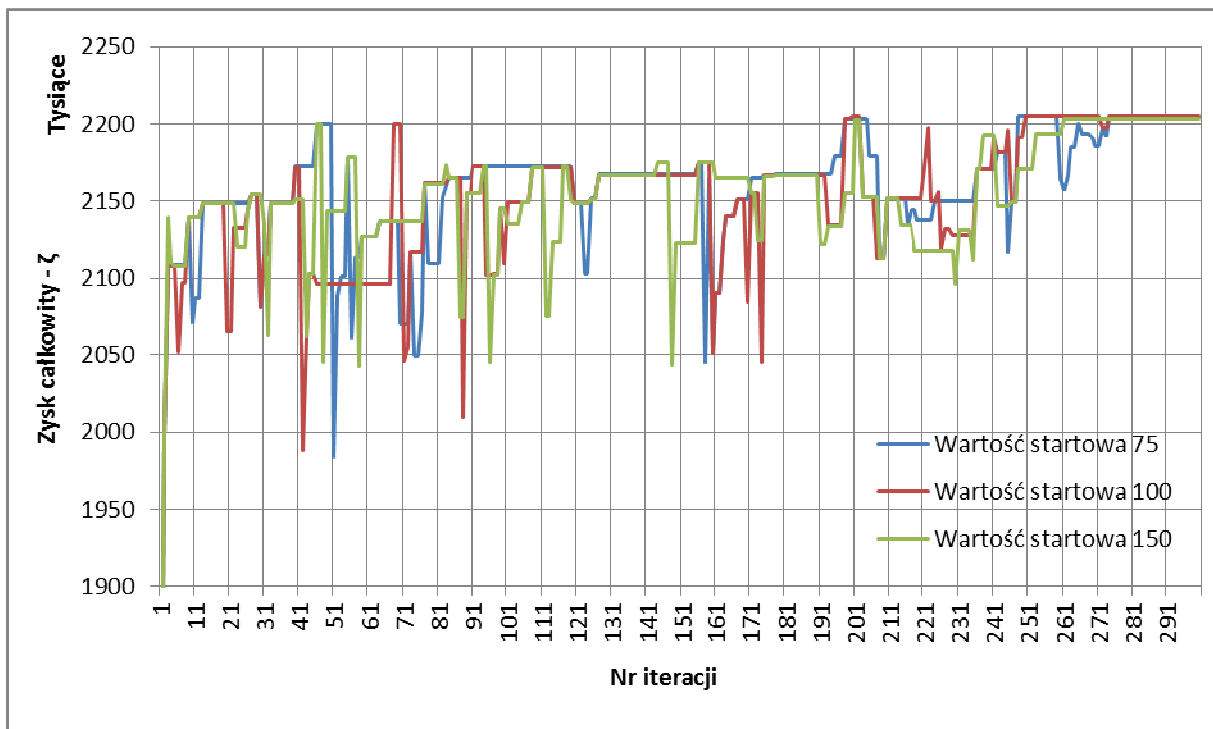
- 600
- Początkowe wartości wszystkich buforów w systemie:
 - 75
 - 100
 - 150

Rezultaty działania algorytmu symulowanego wyżarzania dla przypadku 300 iteracji przedstawione są na rysunku 4.3, gdzie przedstawiono funkcję zysku ζ (oś Y) w stosunku do liczby iteracji (oś X). W trzech badanych przypadkach algorytm startował dla różnych wartości początkowych wielkości buforów przed stanowiskami produkcyjnymi i zbiegł się do prawie tego samego rozwiązania (Tabela 4.3), to znaczy tych samych wartości buforów przed stanowiskami produkcyjnymi.

Tabela 4.3 Wartości buforów znalezionych przez algorytm symulowanego wyżarzania wraz z funkcją celu

Liczba iteracji	Początkowe wartości wszystkich buforów	RIP	CTP	Maszyna offsetowa	Schnięcie	Odwracanie	Falcerka	Trójność	Gilotyna	Zbieranie składek	Oprawa szyla	Oprawa klejona	Oprawa	Funkcja celu - ζ
- 300	- 75	-	70	105*			90	95	85	80	95	95	95	2205391
	- 100	-	70	105*			90	95	85	80	95	95	95	2205391
	- 150	-	80	115*			95	100	90	85	90	90	90	2203350
- 600	- 75	-	65	105*			95	90	70	80	95	95	95	2196047
	- 100	-	70	105*			90	95	85	80	95	95	95	2205391
	- 150	-	85	115*			95	100	90	85	90	90	90	2199563
* wspólny bufor dla maszyny drukującej, stanowiska schnięcia oraz odwracania														

Najszybciej algorytm znalazł rozwiązanie najlepsze w przypadku startu z wartościami początkowymi buforów równymi 100, bo już koło 200 iteracji. Trzeba zaznaczyć, że we wszystkich przypadkach algorytm znalazł rozwiązanie bliskie najlepszemu już po około 150 iteracjach, późniejsza poprawa wyników nie była już tak znaczna. Trzeba zaznaczyć, że w przypadku startu algorytmu z poziomu 150 dla początkowych wartości buforów algorytm znalazł ostatecznie trochę inne wartości buforów oraz inna była wartość funkcji kryterialnej dla tego przypadku.



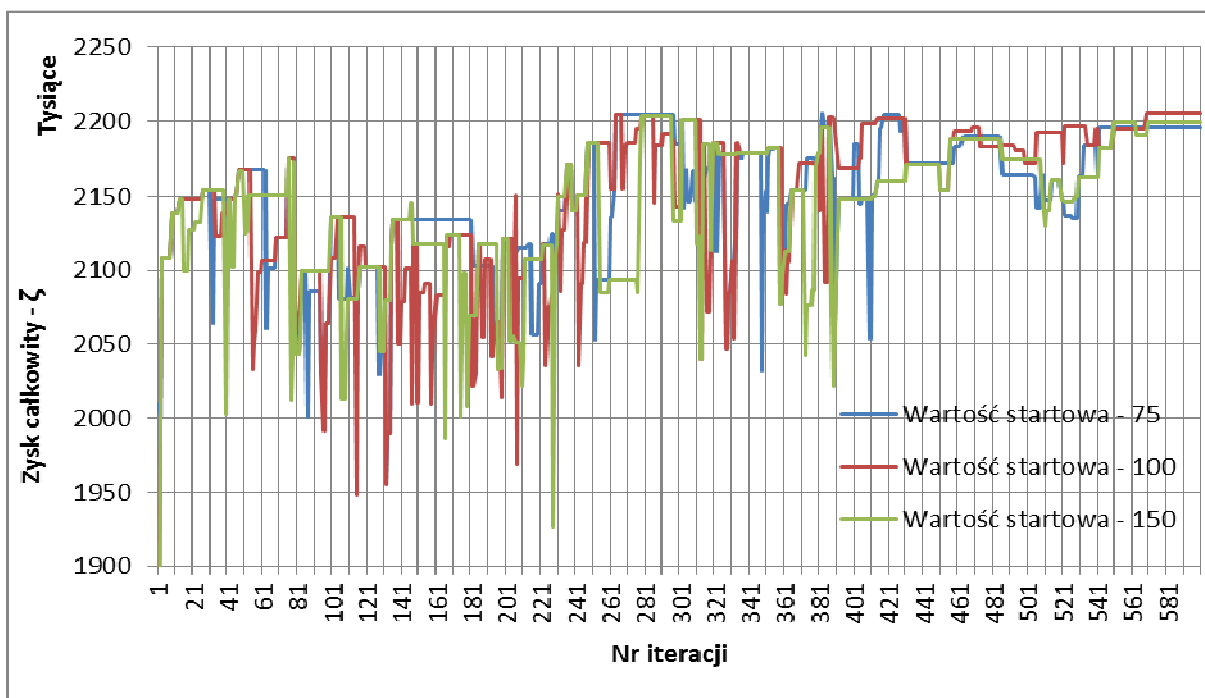
Rys. 4.3 Przebieg algorytmu symulowanego wyżarzania dla przypadku 300 iteracji

Stało się tak dlatego, że w przypadku startu algorytmu z poziomem 75 i 100 wartości buforów były zwiększane w drodze do optimum, a w przypadku startu z poziomem 150 były zmniejszane.

Aby sprawdzić zbieżność algorytmu sprawdzono jego działanie również dla przypadku większej liczby iteracji – 600. Wyniki przedstawiono na rysunku 4.4. Przebieg algorytmu jest podobny jak w przypadku 300 iteracji. Po początkowym większym rozrzucie rozwiązań po 400 iteracji przebieg algorytmu stabilizuje się. Dzieje się tak ze względu na parametr temperatury wyżarzania, która wraz z upływem iteracji algorytmu maleje. Najlepsza wartość funkcji celu – zysk całkowity – została także znaleziona najszybciej dla przypadku startu algorytmu z wartościami początkowymi buforów na poziomie 100, już po około 260 iteracji.

Znalezione optymalne wielkości buforów są istotne w badaniach alokacji dynamicznych reguł priorytetowych. Przy dużym obciążeniu systemu osiągnięta jest maksymalna wielkość buforów a przez to reguły priorytetowe działające w buforach przed stanowiskami produkcyjnymi mają daną ograniczoną liczbę zleceń, które będą brane pod uwagę przy szeregowaniu zadań w danym momencie. Znalezione wielkości buforów będą ustawione w modelu symulacyjnym systemu produkcji poligraficznej, który posłuży do

znalezienia optymalnej alokacji reguł priorytetowych, a także określenia interakcji pomiędzy parametrami decyzyjnymi.



Rys. 4.4 Przebieg algorytmu symulowanego wyżarzania dla przypadku 600 iteracji

4.2.2 Analiza wpływu oraz interakcji parametrów decyzyjnych

Opisywany system produkcji poligraficznej został również zbadany pod kątem wpływu poszczególnych parametrów sterujących na miary jego efektywności – czy w ogóle ten wpływ istnieje i jak mają się interakcje poszczególnych parametrów sterujących do efektywności. Zgodnie z tym co zostało przedstawione w rozdziałach 3 i 4 parametrami decyzyjnymi (zmiennymi sterującymi) w modelu systemu produkcyjnego będą:

- wielkość buforów przed stanowiskami produkcyjnymi
- poziom wykorzystania zasobów na stanowiskach (maszyn, operatorów)
- strategia priorytetów działająca w buforze przed danym stanowiskiem produkcyjnym

Natomiast przyjętymi w modelu miarami efektywności będą:

- całkowity zysk produkcyjny zgodny ze wzorem przedstawionym w podrozdziale 3.4

- ilość produkcji w toku (ang. *WIP - Work-In-Progress*, liczba półproduktów w systemie) dla danego produktu
- liczba półproduktów w kolejkach przed stanowiskiem offsetowym (wybrany jako kluczowe – wąskie gardło - w całym procesie)
- czas oczekiwania w kolejkach przez półprodukty w buforach przed stanowiskami produkcyjnymi
- cykl produkcyjny danego typu produktu
- produktywność systemu (liczba wyprodukowanych sztuk danego typu w przyjętym okresie planistycznym)
- opóźnienie w wykonywaniu zleceń na dany typ produktu

Eksperyment trzyczynnikowy

Aby zbadać ogólny wpływ przedstawionych parametrów decyzyjnych na pierwszą z wymienionych miar efektywności – funkcję całkowitego zysku z produkcji, która zawiera niejako zagregowaną informację z pozostałych miar efektywności przeprowadzono analizę wrażliwości systemu zgodnie z metodologią planowania eksperymentów (ang. *DOE – Design of Experiments*). Metodologia DOE została stworzona przez brytyjskiego matematyka Ronalda Aylmera Fishera w 1935 roku. Zauważył on, że sposób zaplanowania eksperymentów ma wpływ na uzyskiwane wyniki. DOE pozwala na określenie jakie konfiguracje systemu należy przebadać, aby uzyskać niezbędne dane przy minimalnej ilości przebiegów symulacyjnych (Montgomery, 2009). W badaniach tej pracy zdecydowano się na trzyczynnikowy, wielopoziomowy eksperyment. Trzy czynniki wraz z analizowanymi poziomami to:

1. **B** - Wielkość buforów przed stanowiskami produkcyjnymi

Tabela 4.4 Trzy analizowane poziomy wielkości buforów

Oznaczenie poziomu	CTP	Maszyna offsetowa	Schnięcie	Odwracanie	Falcerka	Trójnoż	Glityna	Zbieranie składek	Oprawa szyta	Oprawa klejona
L	63		95		81	86	76,5	72	86	86
M	70		105		90	95	85	80	95	95
H	77		116		99	105	94	88	105	105

Przypadek M z tabeli 4.3 jest optymalną wielkością buforów znalezioną przez algorytm symulowanego wyżarzania (podrozdział 4.2.1). Wartości z przypadku L, M są odpowiednio 10% mniejsze, 10% większe niż w przypadku M.

2. **U** - Wykorzystanie zasobów na stanowiskach (maszyn, operatorów) występuje na 10 poziomach: 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95%, 99%
3. **P** - Strategia priorytetów działająca w buforze przed danym stanowiskiem produkcyjnym. Wykorzystano 11 opisanych wcześniej reguł priorytetowych: FIFO, SPT, LPT, LOR, MOR, EDD, EMODD, CR+SPT, S/OPN, S/RPT+SPT, PT+WINQ+SL

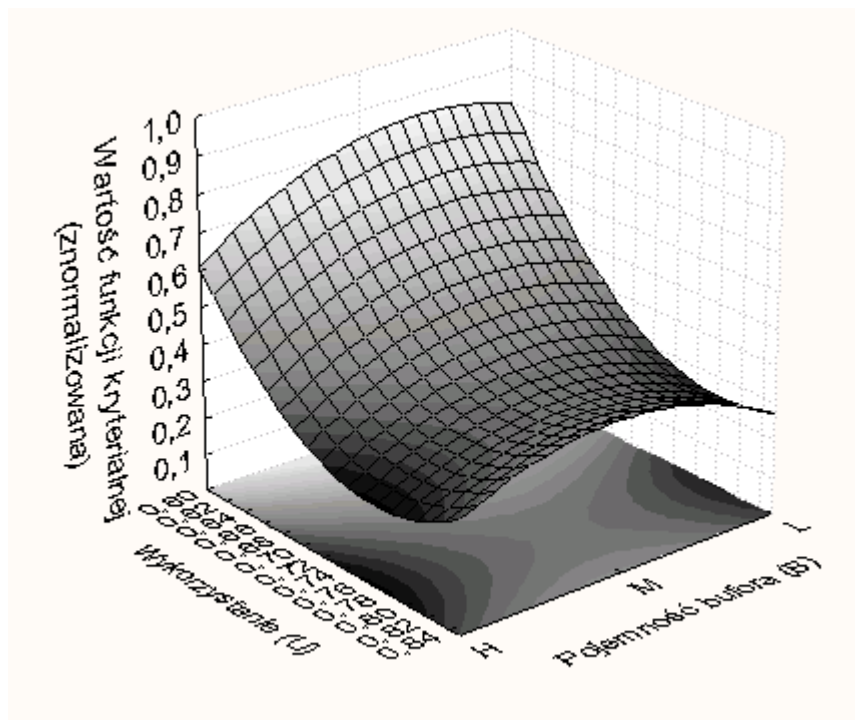
Doprowadziło to łącznie do 2310 eksperymentów symulacyjnych; $2310 = 3$ poziomy wielkości buforów \times 10 poziomów wykorzystania \times 11 reguł priorytetowych \times 7 replikacji symulacji. Aby zbadać właściwości modelu użyto analizy wariancji - ANOVA (ang. *Analysis of Variance*) przy 0,05 poziomie istotności. Wyniki obliczone za pomocą oprogramowania Statistica 10.0 (StatSoft, Inc.) zaprezentowano w tabeli 4.5.

Tabela 4.5 Analiza wariancji (ANOVA) dla eksperymentu trzyczynnikowego

Zródło wariancji	Suma kwadratów	Stopnie swobody	Średnia kwadratów	F_0	p-wartość
B	4,64E+06	2	2,32E+06	0,028	0,762111
U	6,48E+09	9	7,20E+08	8,82	0,01282
P	7,08E+09	10	7,08E+08	8,67	0,02317
BU	5,72E+07	18	3,18E+06	0,039	0,623331
BP	4,92E+07	20	2,46E+06	0,0301	0,644527
UP	8,74E+11	90	9,71E+09	119	<0,0001
BUP	2,38E+10	180	1,32E+09	1,62	0,02493
Error	8,16E+07	2310	3,53E+04		

Jeżeli wartość F_0 otrzymana z analizy wariancji jest znacznie większa od wartości $F_{\alpha,(a-1)(b-1)(c-1),abc(n-1)}$ otrzymanej z rozkładu Snedecora (gdzie α jest poziomem istotności, a, b, c są wartościami stopni swobody dla czynników B, U, P, a n jest liczbą wszystkich eksperymentów symulacyjnych), to dany czynnik jest uznawany jako mający istotny wpływ na badany wskaźnik efektywności, w tym przypadku funkcję całkowitego zysku. Z

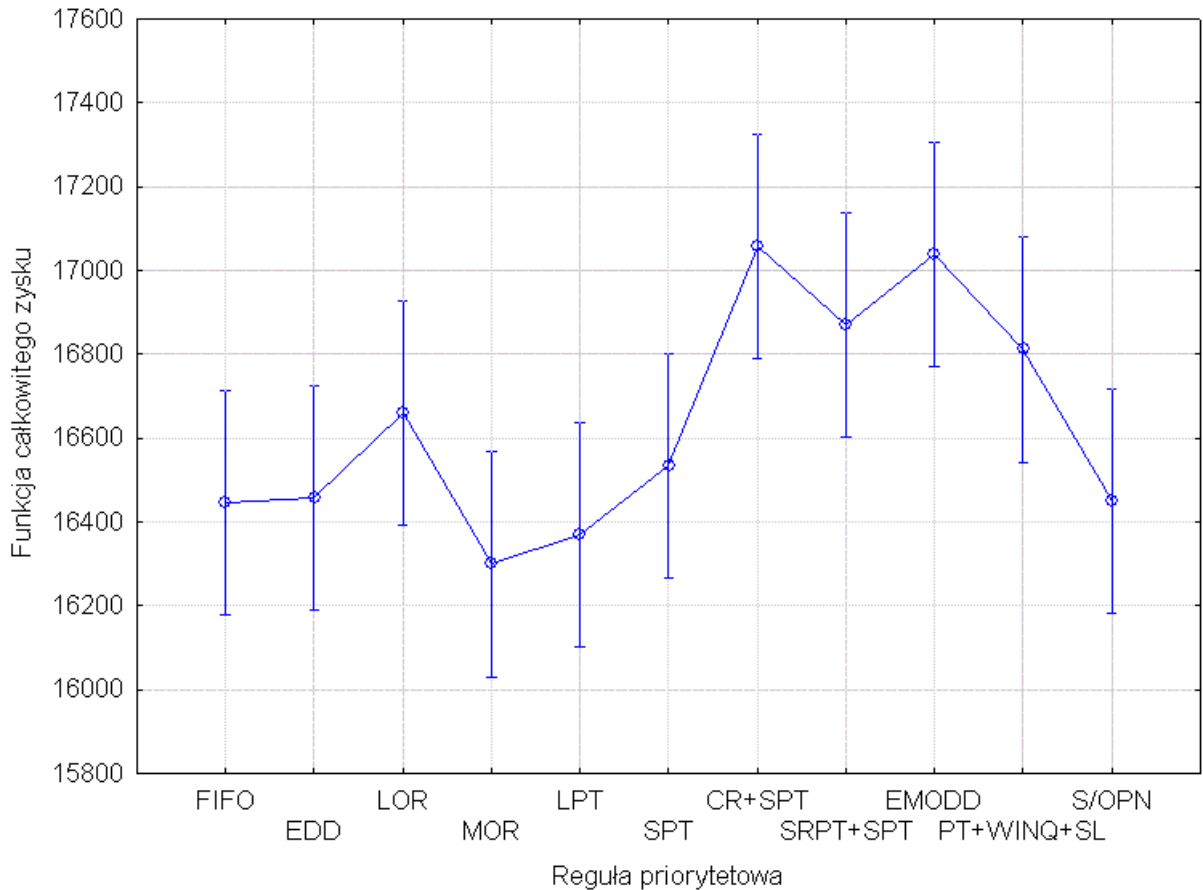
tabeli 4.4 można odczytać, że na poziomie istotności 5% najistotniejszy wpływ ma wybór strategii priorytetów oraz wykorzystanie zasobów a także interakcja drugiego rzędu pomiędzy tymi czynnikami. Mniejszy jest wpływ pojemności buforów, które oscylują w pobliżu optymalnego ich rozmiaru. Jest to widoczne na wykresie powierzchniowym modelu (rysunek 4.5) , razem z obserwowanymi w doświadczeniu wartościami. Powierzchnia ta pokazuje przewidywane wartości wielkości wyjściowej na podstawie ustalonych (pierwotnych) wartości wielkości wejściowych. Można zauważyć, że mimo zmieniających się poziomów wykorzystania wartość optymalna pojemności bufora znaleziona przez algorytm symulowanego wyzarzania jest ciągle najlepsza, w rozumieniu maksymalizacji funkcji całkowitego zysku.



Rys. 4.5 Wykres powierzchniowy zależności pomiędzy wielkością bufora a wykorzystaniem zasobów

Rysunek 4.6 przedstawia zależność pomiędzy funkcją całkowitego zysku a regułą priorytetową, która działa w buforach przed wszystkimi stanowiskami produkcyjnymi (jedna reguła dla całego systemu). Pionowe słupki oznaczają 95% przedziały ufności. Można zauważyć, że dynamiczne wieloatrybutowe reguły priorytetowe dają lepsze wyniki jeśli chodzi o funkcję całkowitego zysku. Najlepszą regułą, która jako jedna działa w całym systemie jest reguła CR+SPT. Założenie, że przed każdym stanowiskiem produkcyjnym działa ta sama reguła nie będzie brane pod uwagę w wynikach przedstawionych w podrozdziale 4.2.3. Wówczas algorytm optymalizujący będzie szukał najlepszej alokacji reguł priorytetowych przed poszczególnym stanowiskami. Jak widać z

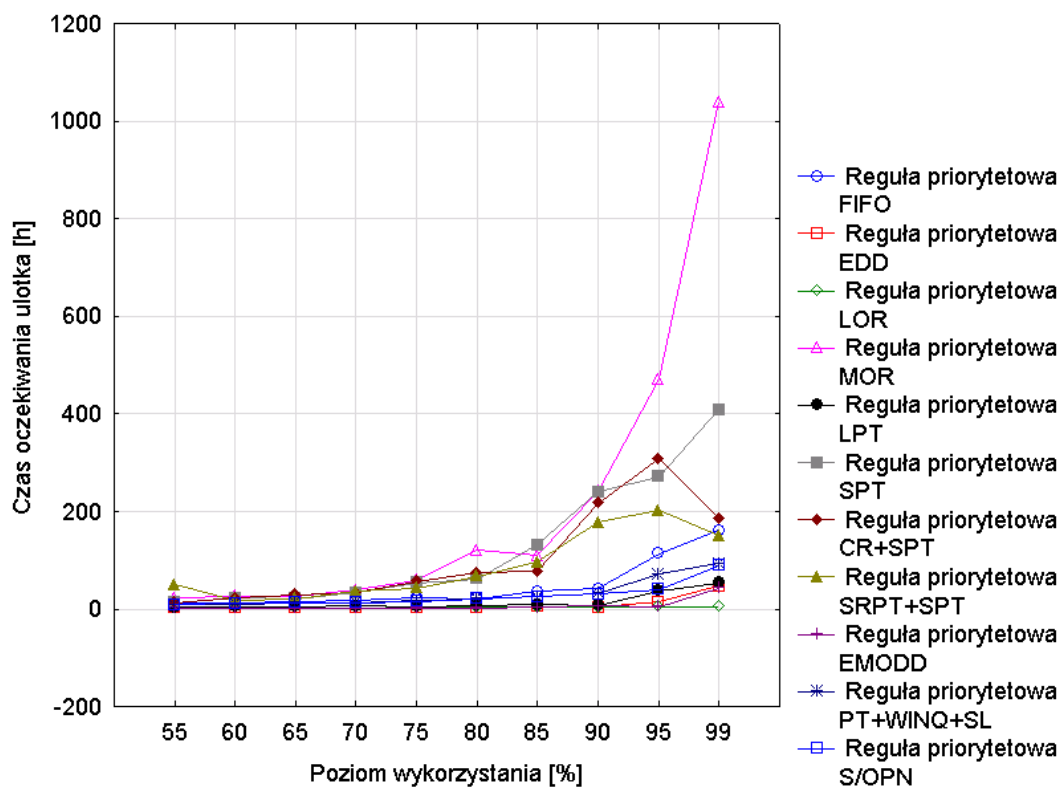
rysunku 4.6 przedziały ufności są dosyć szerokie (wynika to z dużej liczby analizowanych poziomów wykorzystania) zatem lepiej jest porównywać reguły priorytetowe na poszczególnych poziomach wykorzystania.



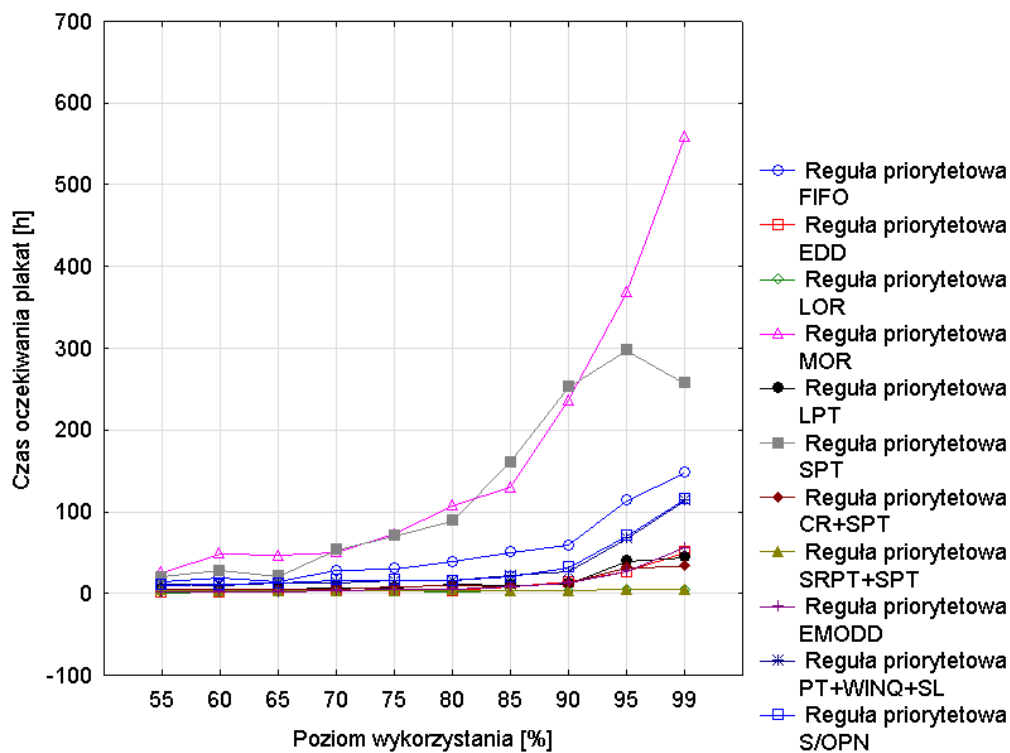
Rys. 4.6 Funkcja całkowitego zysku dla poszczególnych reguł priorytetowych

Kolejne wykresy przedstawiają interakcje drugiego rzędu wskazane przez DOE jako istotne, czyli pomiędzy regułami priorytetowymi a różnym poziomem wykorzystania zasobów.

Na rysunkach 4.7 oraz 4.8 pokazano wykresy czasu oczekiwania produktów klasy ulotka oraz plakat względem poziomu wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych. Można zauważyć, że dla niskich poziomów wykorzystania, kiedy kolejki są niewielkie, różnice pomiędzy regułami priorytetowymi nie są duże gdyż same czasy oczekiwania w kolejkach są krótkie). Dla produktu klasy ulotka i wysokich wartościach wykorzystania najbardziej korzystną regułą jest LOR oraz EMODD a najmniej korzystne to reguła MOR oraz SPT, dla produktu typu plakat najlepsza w minimalizacji czasu oczekiwania jest reguła LOR oraz SRPT+SPT.

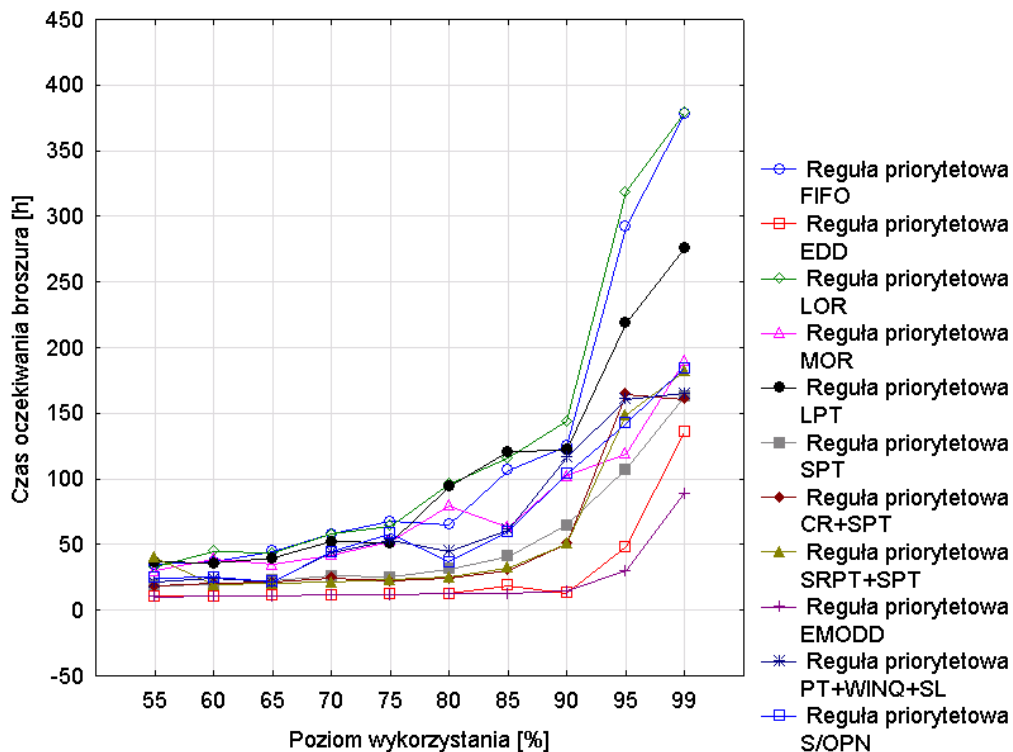


Rys. 4.7 Czas oczekiwania produktu klasy ulotka względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych



Rys. 4.8 Czas oczekiwania produktu klasy plakat względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych

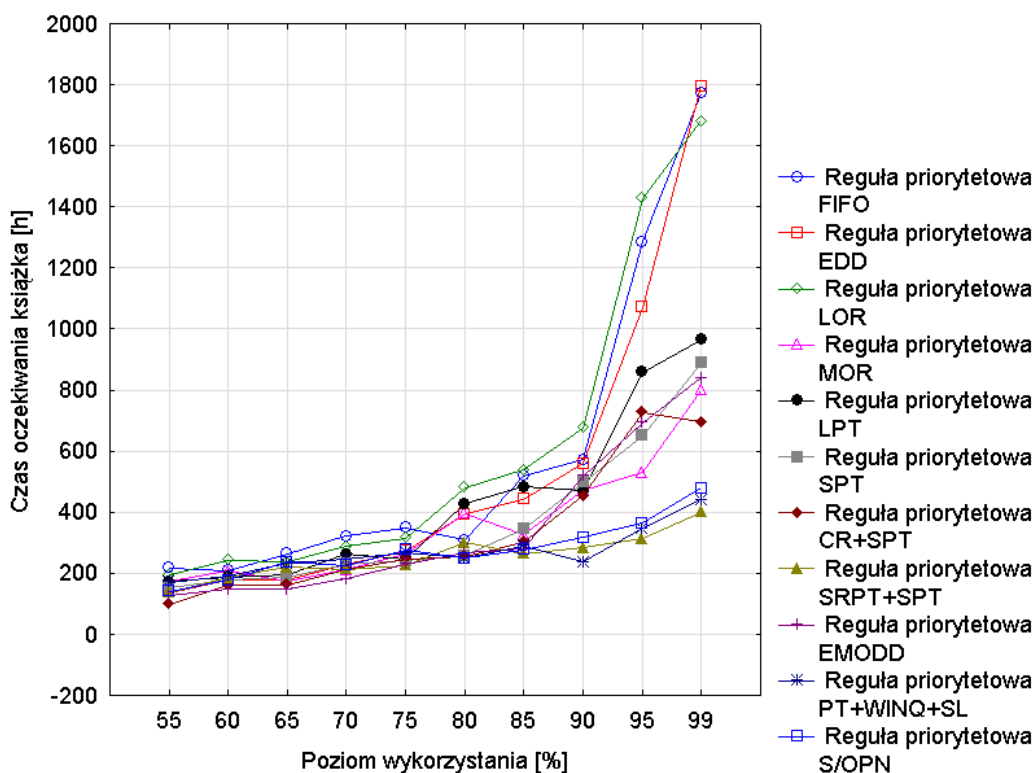
Przewaga dynamicznej jednoatrybutowej reguły LOR jest tutaj dość oczywista gdyż przy produkcji ulotek oraz plakatów występuje mniej stanowisk przez które muszą te produkty przejść. Zatem na wcześniejszych etapach druku te typy produktów mają przewagę nad innymi produktami, ze względu na mniejszą liczbę pozostałych operacji do wykonania i dzięki temu są obsługiwane jako w pierwszej kolejności (w regule LOR) więc szybciej przechodzą przez cały proces produkcyjny. Wśród reguł wieloatrybutowych w obu przypadkach dobrze radzą sobie reguła EMODD oraz CR+SPT.



Rys. 4.9 Czas oczekiwania produktu klasy broszura względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych

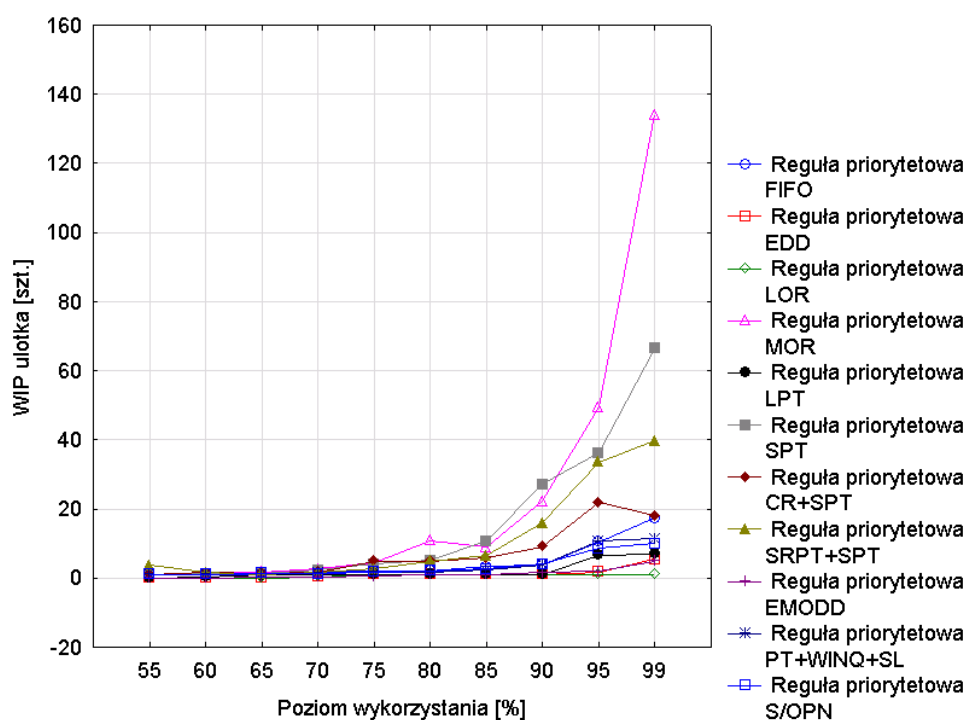
Rysunki 4.9 oraz 4.10 ukazują również wykresy czasu oczekiwania tym razem dla produktów klasy broszura oraz książka względem poziomu wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych. W tym wypadku widać różnice w zastosowaniu poszczególnych reguł priorytetowych już nawet przy niższych wartościach wykorzystania. Dla produktu klasy broszura najlepszą regułą na wszystkich poziomach wykorzystania jest reguła EMODD oraz EDD, które mają podobne działanie. Najgorszymi, czyli powodującymi największe czasy oczekiwania, jest natomiast LOR i FIFO, podobnie są to (wraz z regułą EDD) najmniej korzystne reguły jeśli chodzi o czas oczekiwania dla

produktu klasy książka. Najlepszymi regułami, które minimalizują czas oczekiwania na wysokich poziomach wykorzystania, dla produktu klasy książka są natomiast reguły wieloatrybutowe SRPT+SPT, PT+WING+SL oraz S/OPN.

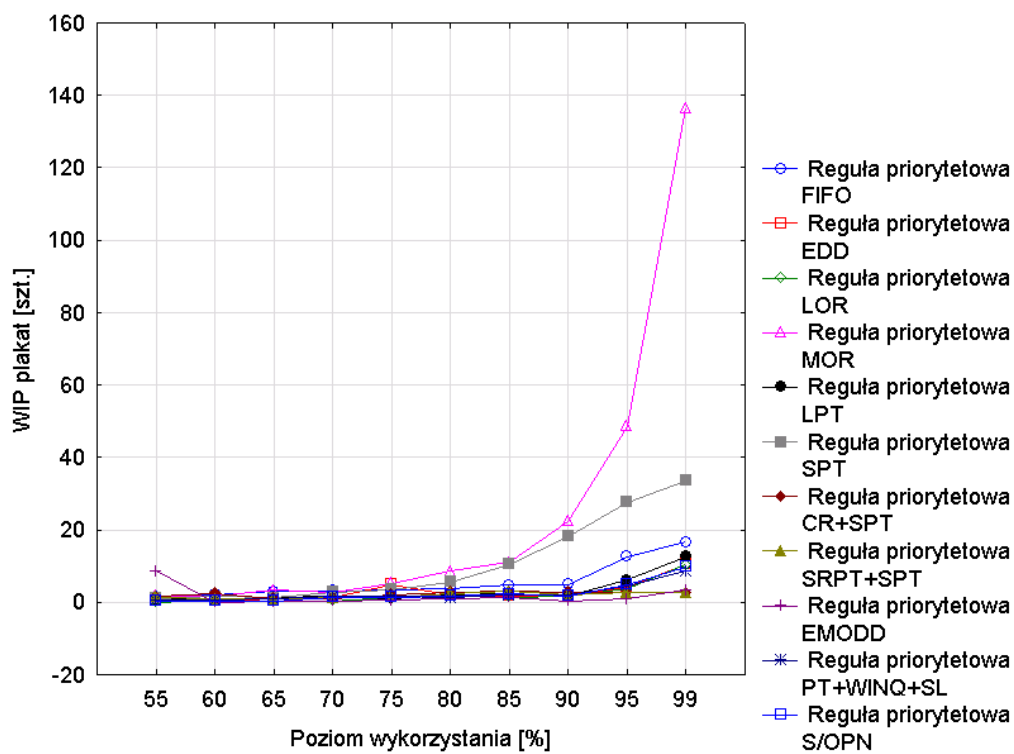


Rys. 4.10 Czas oczekiwania produktu klasy książka względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych

Wykresy na rysunkach 4.11 i 4.12 pokazują ilość produkcji w toku (WIP) dla produktu klasy ulotka oraz plakat względem wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych. Podobnie jak w przypadku czasu oczekiwania dla tych klas produktów reguły priorytetowe przy niskich poziomach wykorzystania mają niewielki wpływ. Różnice w wykorzystaniu poszczególnych reguł zaczynają się na poziomie 80%. Regułą priorytetową, która dobrze radzi sobie w minimalizacji parametru WIP dla ulotki jest LOR oraz EMODD, a dla plakatu SRPT+SPT oraz EMODD. Dwie reguły, które przy wysokim poziomie wykorzystania zasobów wykazują niekorzystne rezultaty w minimalizacji ilości produkcji w toku to MOR i SPT. Dzieje się tak dlatego, iż reguła jednoatrybutowa reguła MOR jako pierwsze do obsługi wypuszcza zadanie o największej pozostałej liczbie zadań do wykonania. Produkty klasy ulotka oraz plakat tych operacji mają niewiele w stosunku do książki oraz broszury dlatego jeśli znajdują się z nimi w kolejce to muszą odczekać dłuższy czas.

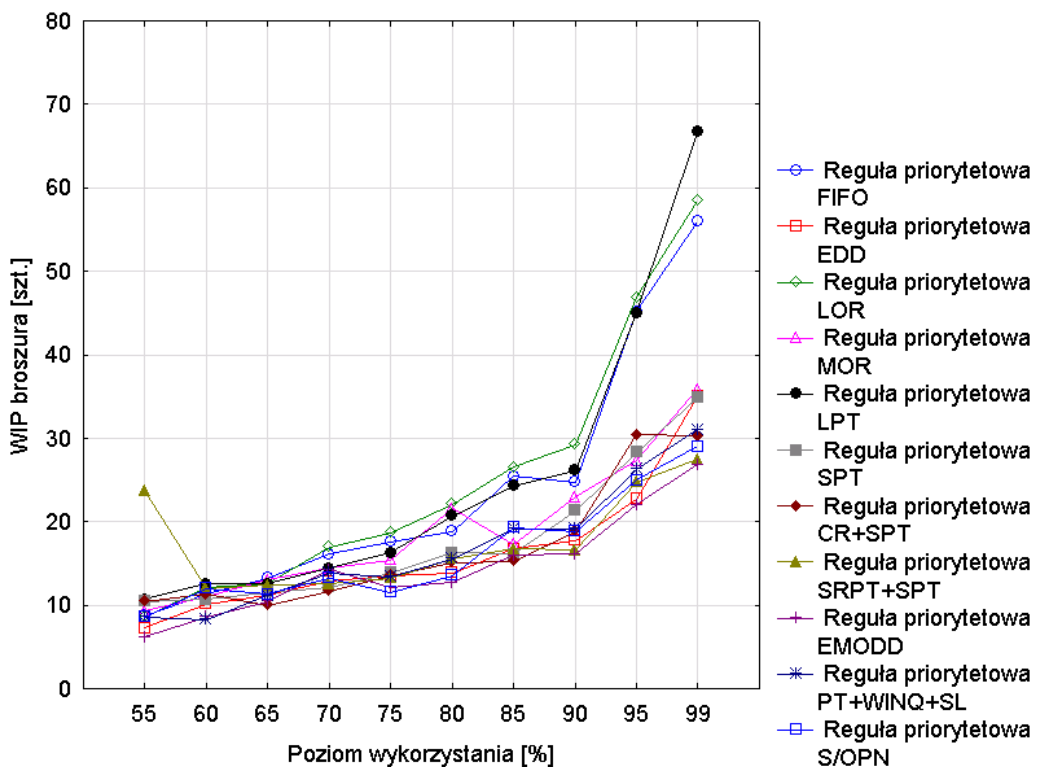


Rys. 4.11 Ilość produkcji w toku (WIP) produktu klasy ulotka względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych



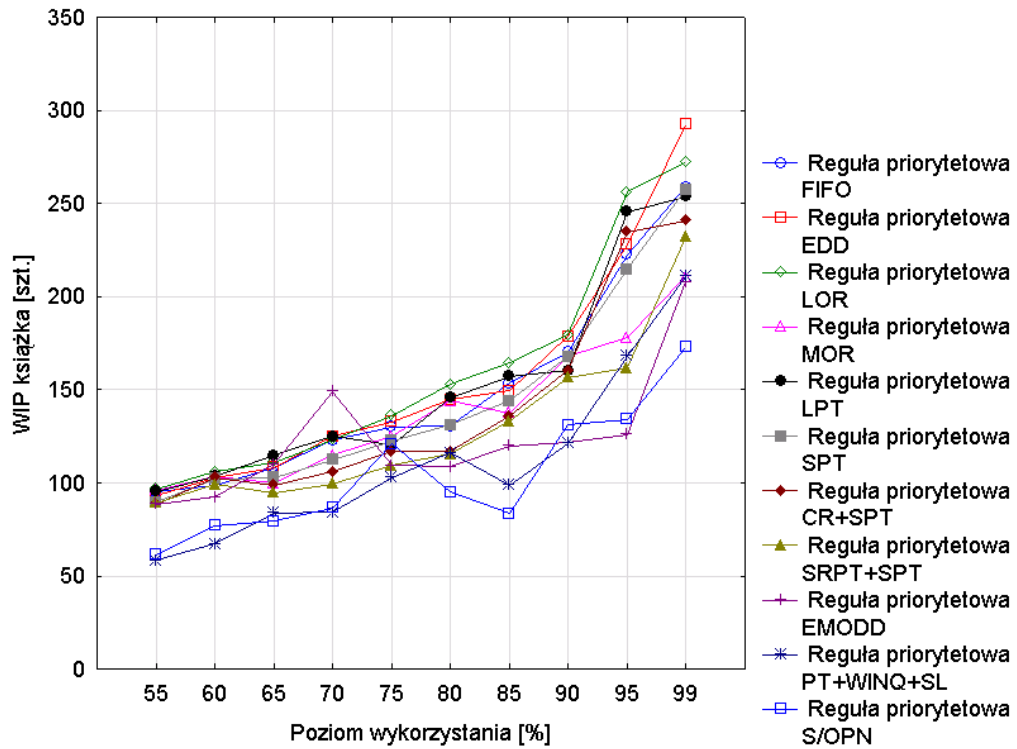
Rys. 4.12 Ilość produkcji w toku (WIP) produktu klasy plakat względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych

Kolejne wykresy 4.13 oraz 4.14 na których widać ilość produkcji w toku (WIP) tym razem dla produktu klasy broszura i książka ukazują, że nawet przy niskich poziomach wykorzystania istnieją dość wyraźne różnice w rodzaju użytej strategii priorytetów. W obu przypadkach wieloatrybutowa reguła S/OPN okazała się skuteczna w minimalizacji WIP'u, a także reguła EMODD oraz PT+WINQ+SL w przypadku książki. Niekorzystne okazały się reguły LPT, LOR oraz FIFO przy dużych poziomach wykorzystania w przypadku broszury oraz EDD i LOR w przypadku książki.

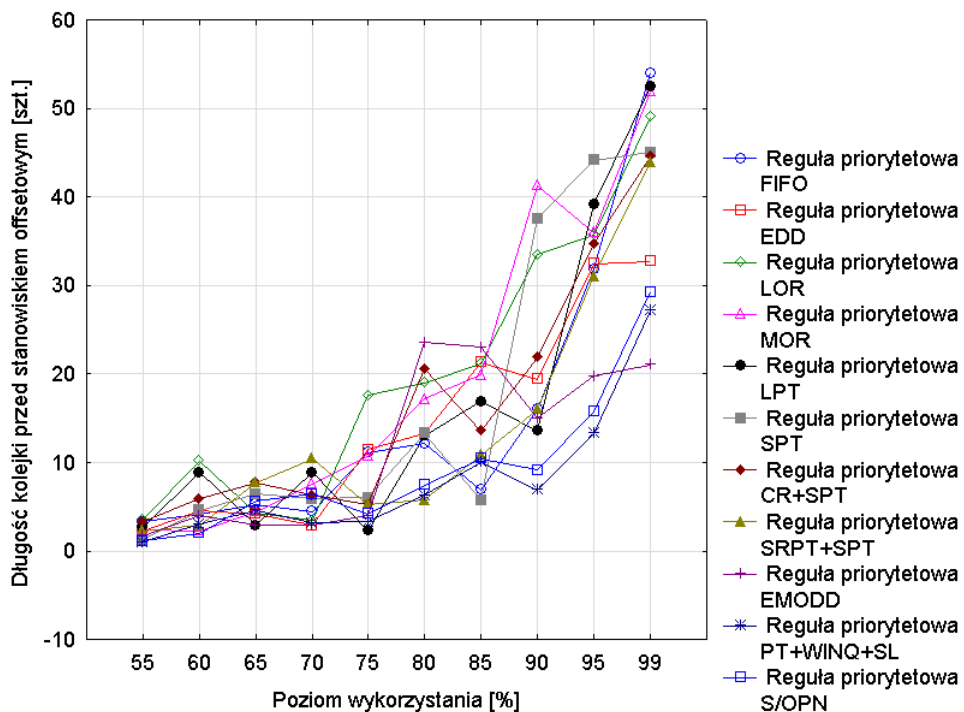


Rys. 4.13 Ilość produkcji w toku (WIP) produktu klasy broszura względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych

Rysunek 4.15 przedstawia długość kolejki przed maszyną offsetową (stanowiskiem drukującym), dla wszystkich typów produktów, względem wykorzystania w procentach dla różnych reguł priorytetowych. Łatwo zaobserwować, iż nie ma tutaj zdecydowanie jednej reguły, która by działała dobrze (obniżała ilość zadań w kolejce) dla wszystkich poziomów wykorzystania. Stosunkowo dobrą regułą dla większości poziomów wykorzystania jest reguła PT+WINQ+SL.



Rys. 4.14 Ilość produkcji w toku (WIP) produktu klasy książka względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych



Rys. 4.15 Długość kolejki przed maszyną offsetową względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych

W przedstawionych wynikach widać wyraźnie, że nie ma jednej, najlepszej reguły, która by optymalizowała wszystkie miary efektywności systemu, szczególnie jeśli jest to system wieloproduktowy. Można zauważyć, że dynamiczne reguły wieloatrybutowe radzą sobie lepiej niż jednoatrybutowe. Kolejne analizy przedstawione w rozdziale 4.2.3 będą prowadzone już przy założeniu, że przed każdym stanowiskiem może działać inna reguła priorytetowa.

Testy wpływu istotności reguł priorytetowych na poszczególne miary efektywności

Wykonane zostały dodatkowe analizy, które mają ocenić czy istnieje zależność między użytą regułą priorytetową a poszczególnymi miarami efektywności systemu (Tabela 4.6) Sprawdzenie zostało wykonane testem niezależności χ^2 oraz została zmierzona skala tej zależności za pomocą współczynnika V-Cramera. Wszystkie kalkulacje zostały wykonane w oprogramowaniu Statistica 10.0.

Tabela 4.6 Współczynniki Chi-kwadrat oraz V-Cramera dla oceny wpływu reguł priorytetowych na miary efektywności

Miara efektywności	Dla wszystkich poziomów wykorzystania			Dla poziomu wykorzystania 95%		
	χ^2	p-wartość	V-Cramera	χ^2	p-wartość	V-Cramera
Czas oczekiwania ulotka	1098,543	0,12143	0,43721	146,0	0,0224	0,94112
Czas oczekiwania plakat	1207,529	0,08247	0,37693	136,3	0,0186	0,89274
Czas oczekiwania broszura	1079,328	0,04862	0,64256	112,6	<0,001	0,95641
Czas oczekiwania książka	978,0427	0,03759	0,75395	110,0	<0,001	0,95303
WIP ulotka	393,7493	0,06784	0,33708	141,0	0,04164	0,90936
WIP plakat	407,2876	0,10254	0,37970	151,6	0,03470	0,81342
WIP broszura	342,3127	0,04201	0,59614	138,0	0,02713	0,87095
WIP książka	384,2041	0,03077	0,45680	106,9	0,03689	0,89186
Długość kolejki przed offsetem	295, 6150	0,03214	0,43806	96,4	0,01786	0,82873

Test χ^2 jest jednym z najważniejszych, a także często stosowanych w praktyce, testów nieparametrycznych, który służy sprawdzaniu hipotez. Co istotne można go wykorzystywać do badania zgodności zarówno cech mierzalnych, jak i niemierzalnych,

takich jakimi są reguły priorytetowe. W tej pracy zerowa hipoteza H_0 mówi, iż rodzaj reguły priorytetowej nie ma wpływu na poszczególne miary efektywności systemu, podczas gdy alternatywna hipoteza H_1 mówi, iż rodzaj użytej reguły priorytetowej ma wpływ na miary efektywności systemu. Test został przeprowadzony na poziomie istotności wynoszącym 0,05.

Obserwując p -wartość, która jeśli jest poniżej 0,05 oznacza, że odrzucamy hipotezę H_0 na korzyść hipotezy H_1 . Można zauważyć z pierwszej części tabeli 4.5 – dla wszystkich poziomów wykorzystania, że p -wartość jest poniżej poziomu 0,05 dla czasu oczekiwania oraz ilości produkcji w toku (WIP) broszury oraz książki, a także długości kolejki przed stanowiskiem offsetowym. Potwierdza to wyniki pokazane wcześniej na wykresach dotyczących tych miar efektywności, które pokazywały, iż istotny wpływ reguł priorytetowych dla tych produktów zaczyna się już od niskich poziomów wykorzystania zasobów. W odróżnieniu do produktu klasy ulotka oraz plakat, gdzie wpływ reguł priorytetowych jest widoczny dla wysokich poziomów wykorzystania zasobów. Potwierdza to druga część tabeli 4.5, w której widać, że dla poziomu wykorzystania 95% rodzaj użytej strategii priorytetów ma wpływ na wszystkie miary efektywności systemu – p -wartość poniżej 0,05.

Dodatkowo obliczony został współczynnik V-Cramera, który wskazuje na siłę zależności pomiędzy badanymi parametrami. Jeśli współczynnik jest mniejszy niż 0,3 oznacza to, że siła zależności pomiędzy parametrami jest słaba. Jeśli jest pomiędzy 0,3 a 0,5 to oznacza średnią siłę zależności pomiędzy badanymi parametrami. Jeśli natomiast jest większy niż 0,5 oznacza już dużą zależność między badanymi parametrami. Z tabeli 4.5 można zaobserwować potwierdzenie wcześniejszych wniosków, tzn. że istnieje średnia lub silna zależność pomiędzy rodzajem użytej strategii priorytetów a poszczególnymi miarami efektywności systemu. Szczególnie silną zależność między rodzajem reguły priorytetowej a miarą efektywności współczynnik V- Cramera pokazuje dla 95% poziomu wykorzystania zasobów – wszystkie wartości współczynnika są w okolicach 0,8-0,9.

4.2.3 Wyniki optymalizacji alokacji reguł priorytetowych przed każdym stanowiskiem

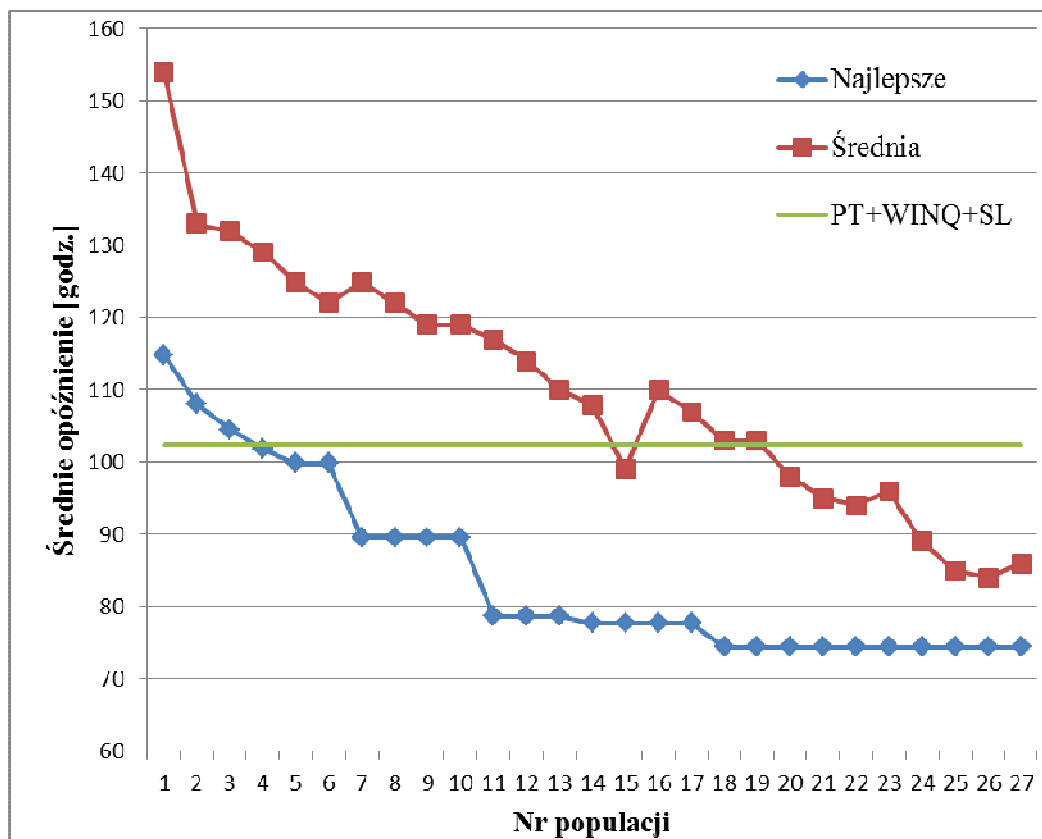
Z przeprowadzonych w poprzednim podrozdziale analiz wynika jednoznacznie, że rodzaj użytej strategii priorytetów ma istotny wpływ na różnego typu parametry wyjściowe z wieloproduktowego systemu produkcji poligraficznej. Użyteczność wykorzystania reguł

priorytetowych w kolejkach przed stanowiskami produkcyjnymi można teraz rozszerzyć o przypisanie różnych reguł dla poszczególnych stanowisk, a nie jednej reguły dla całego systemu, tak jak zostało to dotychczas wykorzystywane. Otwiera to kolejne pole poszukiwań dużej przestrzeni rozwiązań, a zatem optymalizacji alokacji reguł priorytetowych ze względu na każde stanowisko w systemie.

Algorytm genetyczny

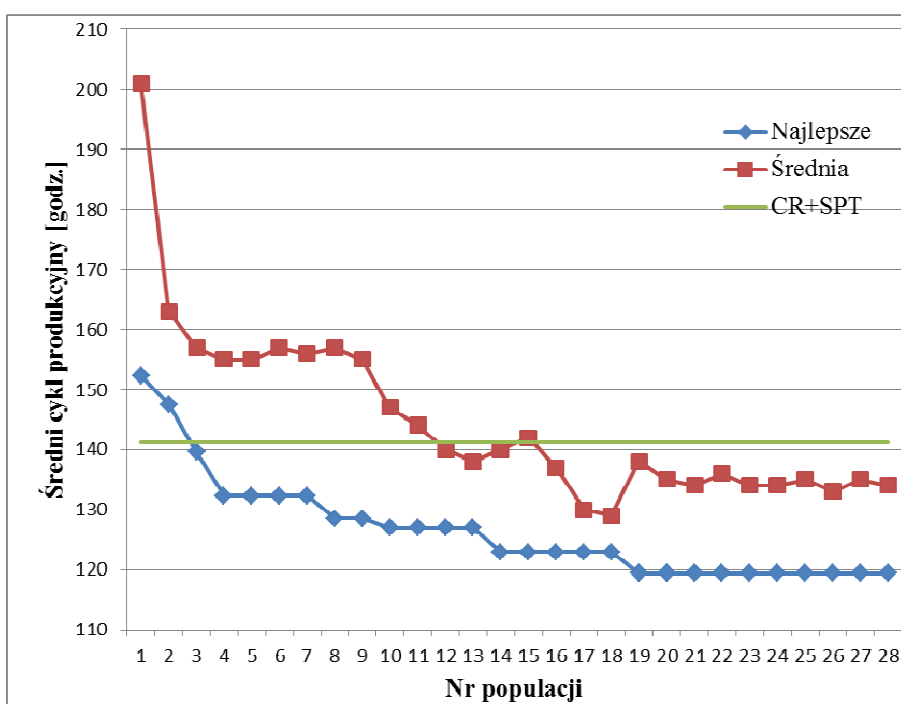
Do rozwiązania problemu znalezienia optymalnej alokacji reguł priorytetowych przed każdym stanowiskiem produkcyjnym użyto algorytmu genetycznego opisanego w podrozdziale 3.5.1. Algorytm szukał ustawienia reguł priorytetowych ze względu na minimalizację jednej z czterech miar efektywności systemu:

- Średni cykl produkcyjny
- Maksymalny cykl produkcyjny
- Średnie opóźnienie w wykonywaniu zleceń
- Maksymalne opóźnienie w wykonywaniu zleceń



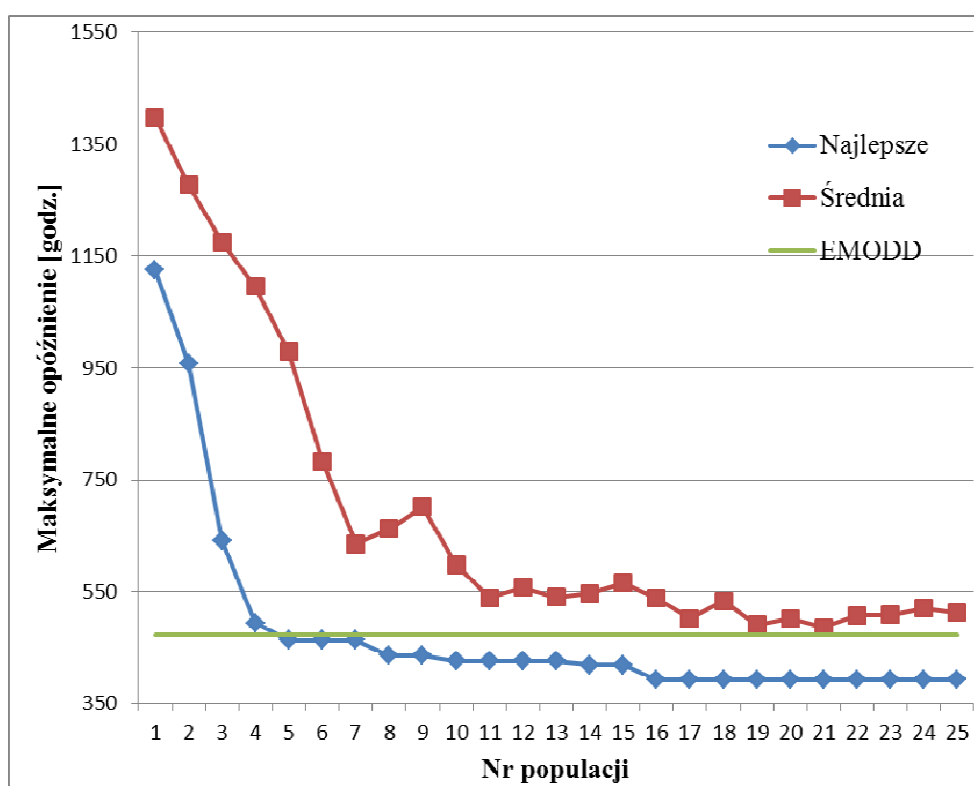
Rys. 4.16 Średnie opóźnienie w wykonywaniu zleceń względem numeru populacji algorytmu genetycznego

Rysunek 4.16 przedstawia wyniki eksperymentów z użyciem algorytmu genetycznego, który minimalizował średnie opóźnienie w wykonywaniu zleceń produkcyjnych poprzez poszukiwanie optymalnej alokacji reguł priorytetowych przed każdym stanowiskiem produkcyjnym. Na wykresie widać rezultat najlepszego osobnika z danej populacji (niebieskie punkty), średnie przystosowanie osobników z danej populacji (czerwone punkty). Dla porównania przedstawiony został także wynik uzyskany przez ustawienie pojedynczej reguły priorytetowej dla całego systemu, która dała najlepszy wynik w optymalizacji danej miary efektywności (zielona linia), w przypadku średniego opóźnienia w wykonywaniu zadań jest to reguła PT+Winq+SL. Algorytm uzyskał warunek stopu po 27 populacjach co daje 11340 eksperymentów symulacyjnych (11340=60 osobników x 27 populacji x 7 replikacji). Ponieważ jedna replikacja trwa około 1 sekundy to poszukiwania algorytmu genetycznego trwały około 3,5 godziny. Algorytm już po 4 populacji znalazł lepszą alokację reguł priorytetowych niż najlepsza reguła priorytetowa ustawiona dla całego systemu (PT+Winq+SL). Średnie przystosowanie osobników w populacjach jest nieznacznie gorsze niż wartość przystosowania najlepszego osobnika, jednak wraz z kolejnymi populacjami regularnie się poprawia. Największa poprawa średnich wartości przystosowania osobników następuje na początku algorytmu między 1 a 2 populacją, co oznacza, że osobniki z drugiej populacji, które zostały stworzone już poprzez operacje genetyczne dają lepsze rezultaty niż początkowe losowe osobniki z pierwszej populacji, potwierdza to poprawne działanie algorytmu.



Rys. 4.17 Średni cykl produkcyjny względem numeru populacji algorytmu genetycznego

W przypadku minimalizacji średniego cyklu produkcyjnego algorytm uzyskał warunek stopu po 28 populacji (rysunek 4.17). Algorytm znalazł alokację reguł priorytetowych, która dała lepszy rezultat niż wynik uzyskany z ustawienia jednej reguły priorytetowej (CR+SPT) już po 3 populacji algorytmu. Podobnie w przypadku minimalizacji maksymalnego cyklu produkcyjnego - już po 3 populacji lepsze ustawienie niż rezultat uzyskany z reguły EMODD (rysunek 4.19). Warunek stopu został osiągnięty w tym przypadku w 22 populacji. W przypadku minimalizacji maksymalnego opóźnienia algorytm znalazł lepsze ustawienie reguł priorytetowych po 4 populacji (rysunek 4.18), a warunek stopu w 25 populacji.

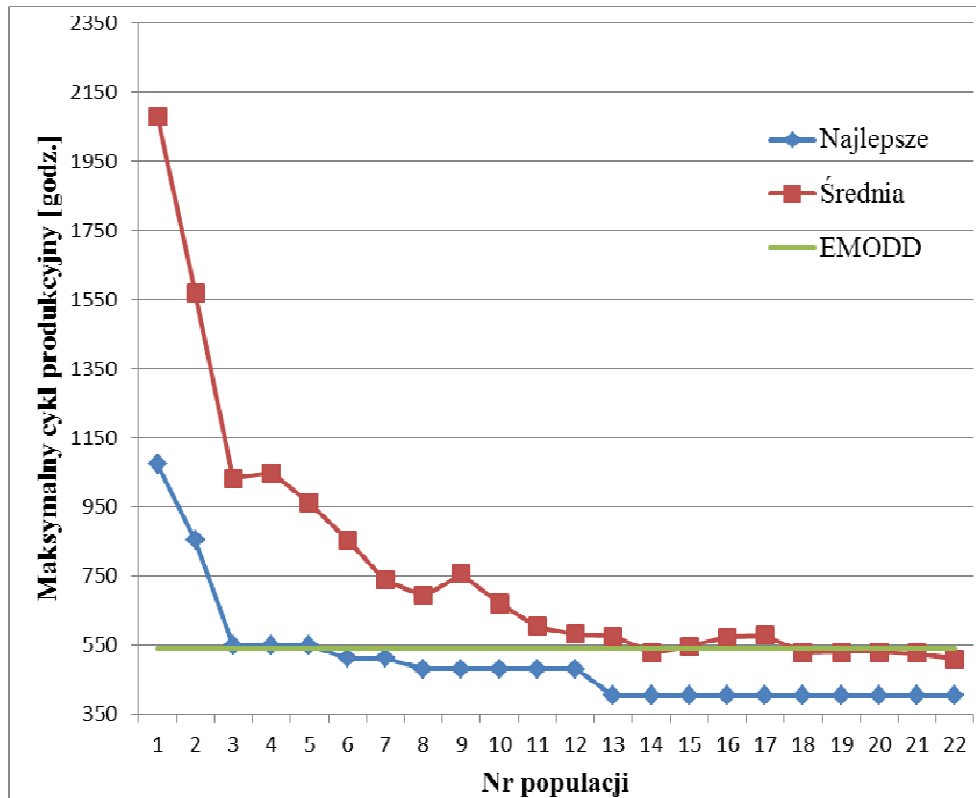


Rys. 4.18 Maksymalne opóźnienie względem numeru populacji algorytmu genetycznego

W przypadku minimalizacji maksymalnego opóźnienia w wykonywaniu zadań, a także minimalizacji maksymalnego cyklu produkcyjnego widać, że średnie przystosowanie osobników poprawia się w znaczący sposób do 7,8 populacji algorytmu genetycznego, pozostając w zbliżonym poziomie do rezultatu najlepszego osobnika z populacji (rysunek 4.18, 4.19), świadczy to o dobrym działaniu algorytmu, który minimalizuje te miary efektywności systemu produkcyjnego.

W tabeli 4.7 pokazano znalezioną najlepszą alokację reguł priorytetowych dla poszczególnych stanowisk badanego systemu produkcyjnego, znalezioną przez algorytm

genetyczny dla wszystkich czterech analizowanych miar efektywności systemu. Z tabeli można zobaczyć, że dynamicznie reguły wieloatrybutowe zostały wybierane częściej, niż jednoatrybutowe, szczególnie dla stanowisk produkcyjnych, które są stale wysoko obciążone, takich jak maszyny offsetowe.



Rys. 4.19 Maksymalny cykl produkcyjny względem numeru populacji algorytmu genetycznego

Z tabeli 4.7 można także odczytać, iż dla różnych miar efektywności (czyli różnych funkcji przystosowania w algorytmie genetycznym), nie zostały wybrane te same ciągi zakodowanych genów, a co za tym idzie te same reguły priorytetowe. Potwierdza to tezę, iż po pierwsze nie ma uniwersalnej jednej reguły która by jednoznacznie przewyższała inne w swoim działaniu, a także nie ma zgodności co do wyboru reguł jeżeli chodzi o różne parametry wyjściowe z systemu. Obserwując wyniki badań decydent, który zarządza systemem produkcyjnym powinien wybrać takie reguły priorytetowe działające w buforach przed poszczególnymi stanowiskami produkcyjnymi aby optymalizować wybrane przez siebie i strategię przedsiębiorstwa miary efektywności systemu produkcyjnego.

Tabela 4.7 Najlepsze ustawienie reguł priorytetowych dla poszczególnych miar efektywności

Stanowisko robocze	Średnie opóźnienie		Średni cykl		Maksymalne opóźnienie		Maksymalny cykl	
	Gen	Reguła priorytetowa	Gen	Reguła priorytetowa	Gen	Reguła priorytetowa	Gen	Reguła priorytetowa
RIP	9	S/OPN	10	S/RPT+SPT	7	EMODD	7	EMODD
CTP	8	CR+SPT	11	PT+Winq+SL	8	CR+SPT	1	FIFO
Maszyna offsetowa 1	8	CR+SPT	8	CR+SPT	7	EMODD	7	EMODD
Maszyna offsetowa 2	10	S/RPT+SPT	8	CR+SPT	7	EMODD	7	EMODD
Schnięcie	8	CR+SPT	7	EMODD	8	CR+SPT	8	CR+SPT
Odwracanie	8	CR+SPT	7	EMODD	9	S/OPN	10	S/RPT+SPT
Falcerka	11	PT+Winq+SL	11	PT+Winq+SL	11	PT+Winq+SL	9	S/OPN
Trójnóż	4	LOR	10	S/RPT+SPT	2	SPT	10	S/RPT+SPT
Gilotyna	2	SPT	1	FIFO	9	S/OPN	9	S/OPN
Zbieranie składek	7	EMODD	8	CR+SPT	8	CR+SPT	8	CR+SPT
Oprawa szyta	10	S/RPT+SPT	10	S/RPT+SPT	8	CR+SPT	10	S/RPT+SPT
Oprawa klejona	10	S/RPT+SPT	8	CR+SPT	11	PT+Winq+SL	9	S/OPN

Aby zobaczyć pełniejszy obraz jak poszczególne reguły działają na cały system produkcyjny przedstawiono rezultaty poszczególnych miar efektywności przy założeniu działania jednej reguły priorytetowej w całym systemie (tabela 4.8). W tabeli można także dla porównania zobaczyć wyniki miar efektywności otrzymane przy użyciu algorytmu genetycznego, a także aby zwalidować użyty algorytm genetyczny zostały przeprowadzone dodatkowe analizy z wykorzystaniem metody Monte Carlo. Metoda Monte Carlo zastosowana jest tutaj jako procedura zupełnie losowego doboru reguł priorytetowych do stanowisk produkcyjnych. Za pomocą tej metody zbadano 25000 możliwych ustawień, eksperymenty trwały ponad 90 godzin, a jak można odczytać z tabeli 4.8 i tak algorytm genetyczny, który znalazł najlepsze rozwiązania po około 3,5 godziny uzyskał lepsze wyniki. Rezultat, czyli alokacja reguł priorytetowych, uzyskana przez algorytm genetyczny jest także znacznie lepsza niż pojedyncza działająca reguła priorytetowa dla całego systemu.

Tabela 4.8 Miary efektywności systemu dla poszczególnych reguł priorytetowych ustawionych na wszystkich stanowiskach porównane z rezultatem poszukiwań metody Monte Carlo i algorytmu genetycznego

Dispatching rules	Średnie opóźnienie	Średni cykl	Maksymalne opóźnienie	Maksymalny cykl
FIFO	188,2043	262,4071	627,2463	596,0347
SPT	297,4506	402,3742	1748,102	1642,215
LPT	312,1453	394,4705	1455,053	1501,407
LOR	246,0127	207,1875	1637,304	1575,631
MOR	256,7461	407,8619	1347,21	1401,502
EDD	205,4520	311,2743	604,7428	683,2104
EMODD	135,7409	153,1473	472,3581	540,2713
CR+SPT	107,7642	141,2501	641,2981	579,4347
SOP/N	120,1496	151,0274	927,1412	937,1358
S/RPT+SPT	112,4539	147,6247	870,4872	827,813
PT+WINQ+SL	102,4973	172,1298	1045,203	921,0862
Monte Carlo	86,5432	127,0485	415,3147	421,1964
Algorytm genetyczny	74,5193	119,6426	392,7621	403,3304

4.2.4 Wyniki analizy wrażliwości rozwiązania optymalnego

W tym podrozdziale przeprowadzona zostanie analiza wrażliwości rozwiązania optymalnego znalezione w podrozdziale 4.2.3 dla poszczególnych miar efektywności. Jako metodę analizy wrażliwości przyjęto metodę regresji powierzchni odpowiedzi. Modele kwadratowej regresji powierzchni odpowiedzi są typem układu hybrydowego, posiadającego cechy zarówno modeli regresji wielomianowej jak i modeli regresji czynnikowej ułamkowej (frakcyjnej). Modele te zawierają wszystkie efekty modeli regresji wielomianowej, do stopnia drugiego oraz dodatkowo efekty dwuczynnikowej interakcji zmiennych predykcyjnych (Internetowy Podręcznik Statystyki, 14.09.2013r.) oraz są szeroko stosowane jako metoda badań analizy wrażliwości w eksperymentach przeprowadzanych w przemyśle (Noguera i in., 2006). Zmiennymi objaśniającymi w modelu regresyjnym będą:

- X_1 - odchylenie standardowe liczby kopii wszystkich typów produktów,
- X_2 - intensywność przychodzącego strumienia zamówień wszystkich typów produktów,

Zatem model będzie zawierał 2 zmiennych objaśniających, których parametry wejściowe będą się zmieniać jak w tabeli 4.9 (eksperyment 2^5 według metodologii DOE):

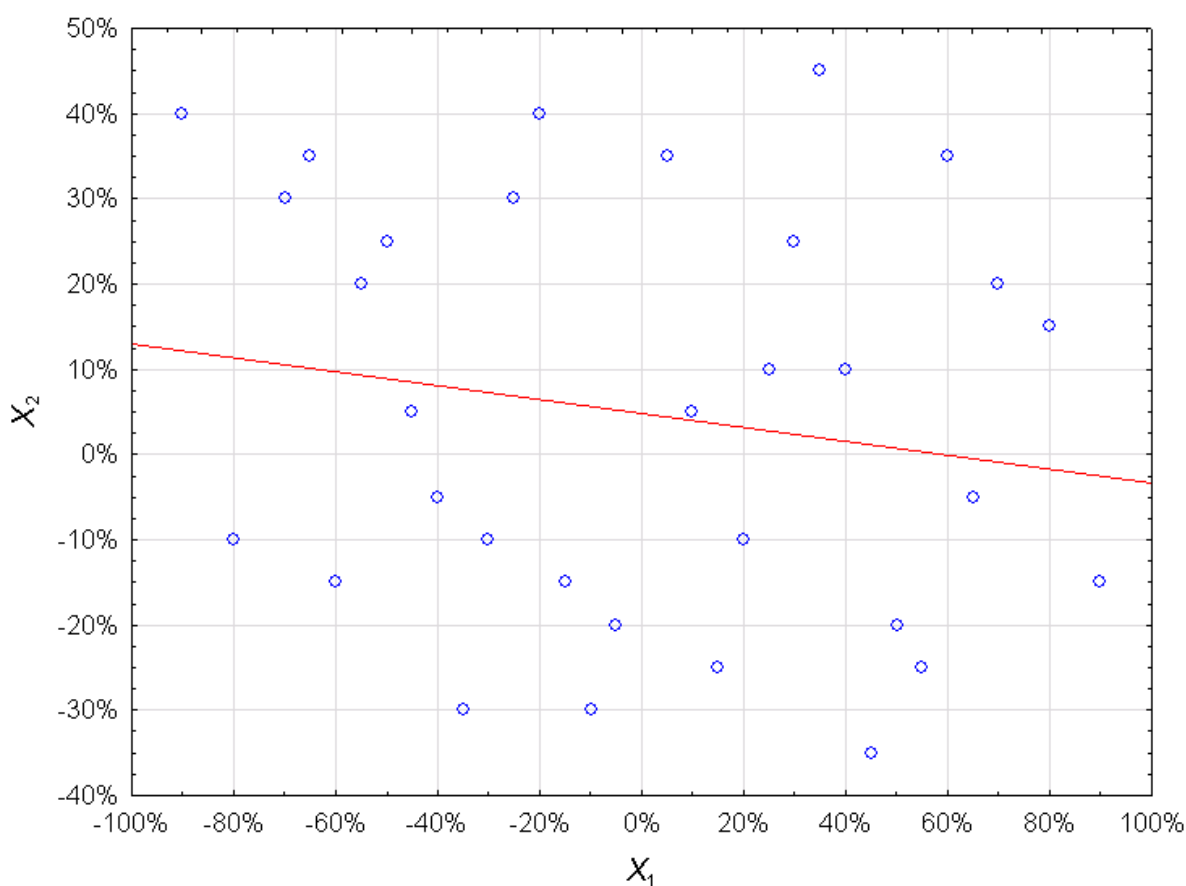
Tabela 4.9 Parametry eksperymentu analizy wrażliwości według planu 2^5

Nr przypadku	Zmienna objaśniająca		Nr przypadku	Zmienna objaśniająca	
	X_1	X_2		X_1	X_2
1	+10%	+5%	17	-80%	-10%
2	+20%	-10%	18	-90%	-40%
3	+30%	+45%	19	+5%	+35%
4	+40%	+10%	20	-5%	-20%
5	+50%	-20%	21	+15%	-25%
6	+60%	+25%	22	-15%	-15%
7	+70%	+20%	23	+25%	+10%
8	+80%	-35%	24	-25%	+30%
9	+90%	-15%	25	+35%	+45%
10	-10%	-30%	26	-35%	-30%
11	-20%	+40%	27	+45%	-35%
12	-30%	+45%	28	-45%	+5%
13	-40%	-5%	29	+55%	-25%
14	-50%	+25%	30	-55%	+20%
15	-60%	+15%	31	+65%	-5%
16	-70%	+30%	32	-65%	+35%

Wszystkie założenia modelu regresyjnego przedstawione w podrozdziale 3.6 zostały spełnione, w szczególności założenie o niewystępowaniu silnej zależności pomiędzy zmiennymi objaśniającymi. Widać to na rysunku 4.20, na którym przedstawiony został rozrzut punktów z tabeli 4.8 wraz z dopasowaną prostą regresji liniowej. Współczynnik regresji liniowej w tym wypadku wynosi $r = -0,16$, a współczynnik determinacji $r^2 = 0,03$. Oba współczynniki są bliskie zeru co potwierdza bardzo słabą zależność pomiędzy X_1 i X_2 .

Zmienną objaśnianą w modelu regresyjnym będzie jedno z wyjść modelu symulacyjnego (jedna z miar efektywności systemu produkcji poligraficznej), przyjęte jako funkcja kryterialna algorytmu genetycznego z podrozdziału 4.2.3:

- \tilde{Y}_1 - średni cykl produkcyjny
- \tilde{Y}_2 - maksymalny cykl produkcyjny
- \tilde{Y}_3 - średnie opóźnienie w wykonywaniu zadań
- \tilde{Y}_4 - maksymalne opóźnienie w wykonywaniu zadań



Rys. 4.20 Wykres rozrzutu zmiennych objaśniających X_2 względem X_1 - brak zależności liniowej

Model kwadratowej regresji odpowiedzi zawierający wielomian stopnia drugiego oraz składniki odpowiadające za interakcję czynników wejściowych wygląda następująco:

$$Y_t = b_{0t} + \sum_{i=1}^n b_{it} X_i + \sum_{i=1}^n b_{iit} X_i^2 + \sum_{i < j=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ijt} X_i X_j + \varepsilon_t \quad (32)$$

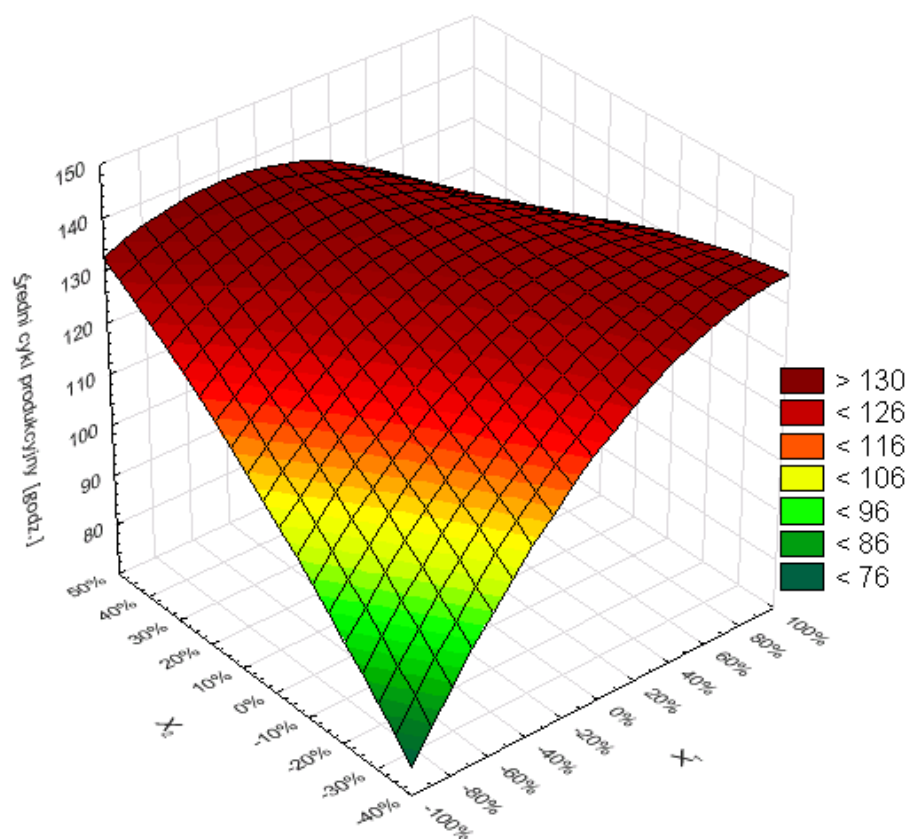
gdzie:

- Y_t – wartość zmiennej objaśnianej danego modelu regresyjnego, $t \in \{1,2,3,4\}$ – średnia wartość z 7 replikacji przebiegu eksperymentu symulacyjnego,
- X_{it} – wartość ustalona i -tej zmiennej objaśniającej danego modelu regresyjnego, $i \in \{1,2\}$,
- b_{it} – efekt pierwszego stopnia i -tej zmiennej objaśniającej danego modelu regresyjnego, $i \in \{1,2\}$, $t \in \{1,2,3,4\}$ – współczynniki modelu oszacowane za pomocą analizy regresji,
- b_{it} – efekt drugiego stopnia (kwadratowy) i -tej zmiennej objaśniającej danego modelu regresyjnego, $i \in \{1,2\}$, $t \in \{1,2,3,4\}$ – współczynniki modelu oszacowane za pomocą analizy regresji,
- b_{ijt} – efekt interakcji pomiędzy i -tą a j -tą zmienną objaśniającą danego modelu regresyjnego, $i \in \{1,2\}$, $t \in \{1,2,3,4\}$ – współczynniki modelu oszacowane za pomocą analizy regresji,
- ε_t – błąd losowy danego modelu regresyjnego, $t \in \{1,2,3,4\}$,
- b_{0t} – wyraz wolny danego modelu regresyjnego, $t \in \{1,2,3,4\}$.

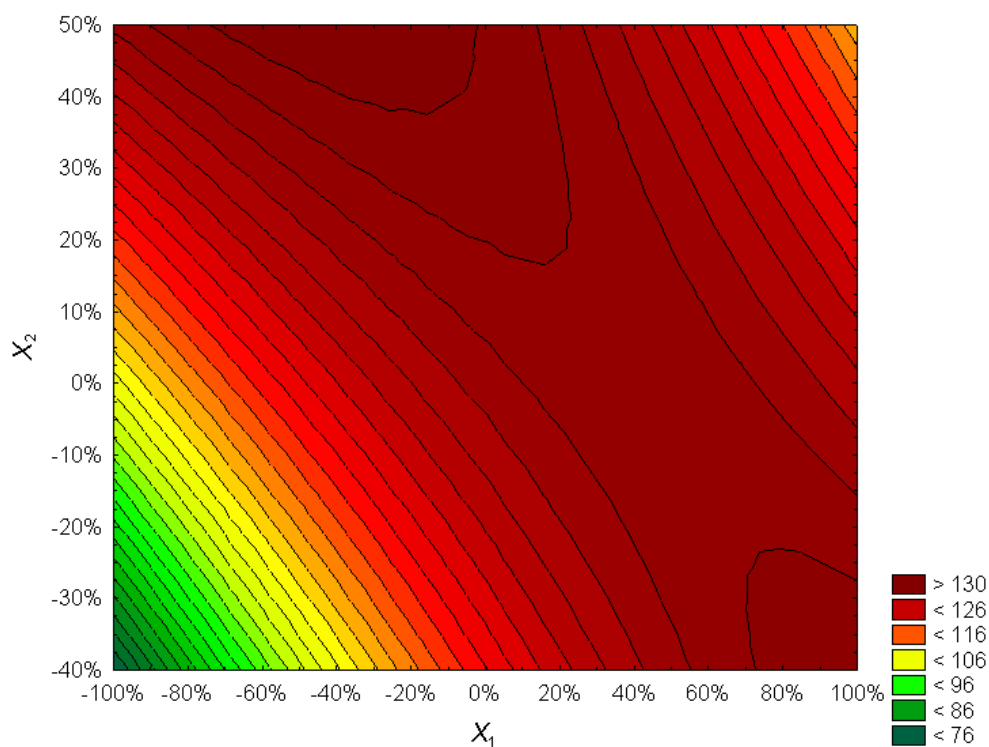
Pierwszy model kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego cyklu produkcyjnego wygląda zatem następująco:

$$\tilde{Y}_1 = 130,97 + 11,74 X_1 + 19,73 X_2 - 14,21 X_1^2 - 45,28 X_1 X_2 - 20,15 X_2^2 \quad (33)$$

Na rysunkach 4.21 i 4.22 przedstawiono graficznie model kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego cyklu produkcyjnego względem dwóch zmiennych objaśniających X_1 - odchylenia standardowe liczby kopii wszystkich typów produktów oraz X_2 - intensywności przychodzącego strumienia zamówień wszystkich typów produktów. Z wykresów można odczytać, że przy niewielkich zmianach zmiennych objaśniających do ok. 40% wartość zmiennej objaśnianej nie zmienia się znacząco - do 10 godzin. Przy optymalnym rozwiązaniu znalezionym przez algorytm genetyczny średni cykl produkcyjny wynosił niecałe 120 godzin, więc zmienna objaśniana oscyluje w granicy zmian do 9%. Wynik ten wskazuje na dosyć dobrą odporność rozwiązania optymalnego na zmiany warunków działania systemu. Przy dużych zmianach szczególnie odchylenia standardowego liczny kopii produktów (prawie 100%) widać, że średni cykl maleje ze względu na to, iż zmiana odchylenia standardowego może powodować zarówno wzrost jak i spadek liczby kopii.



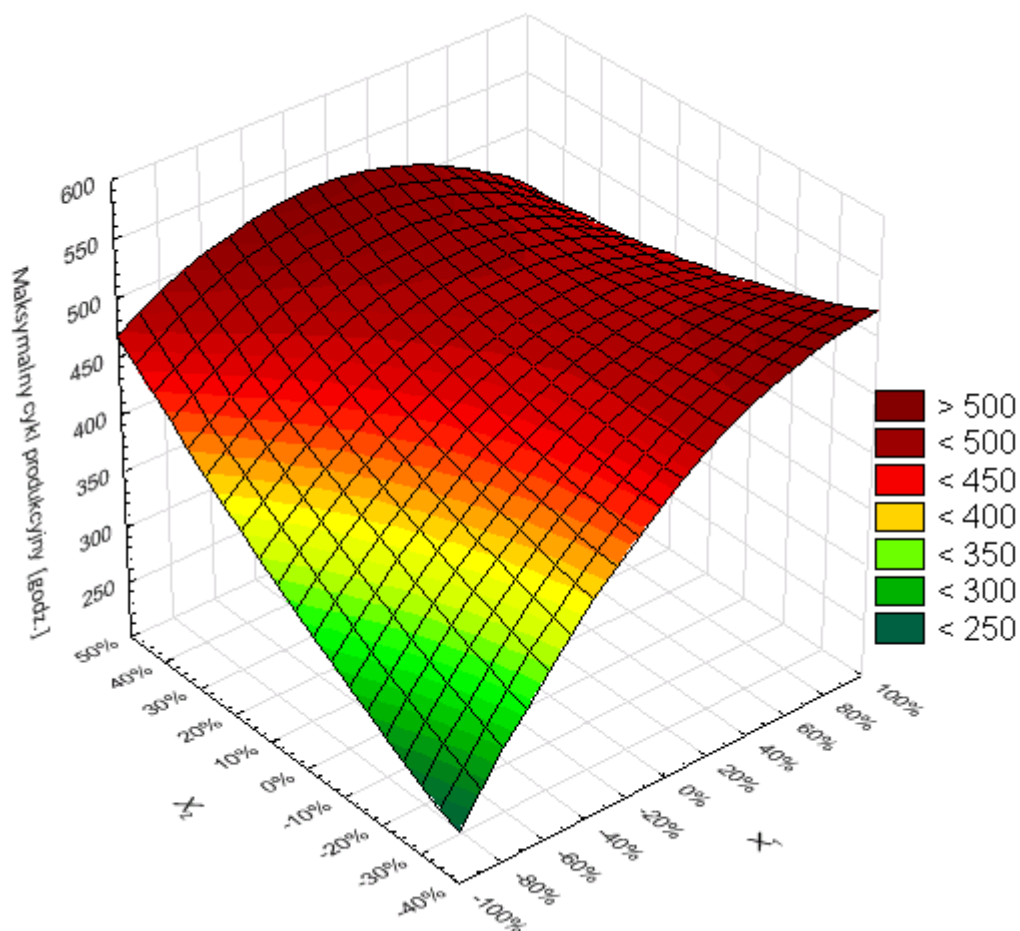
Rys. 4.21 Wykres powierzchniowy kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego cyklu produkcyjnego [godz.] względem X_1 i X_2



Rys. 4.22 Wykres warstwiczny kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego cyklu produkcyjnego [godz.] względem X_1 i X_2

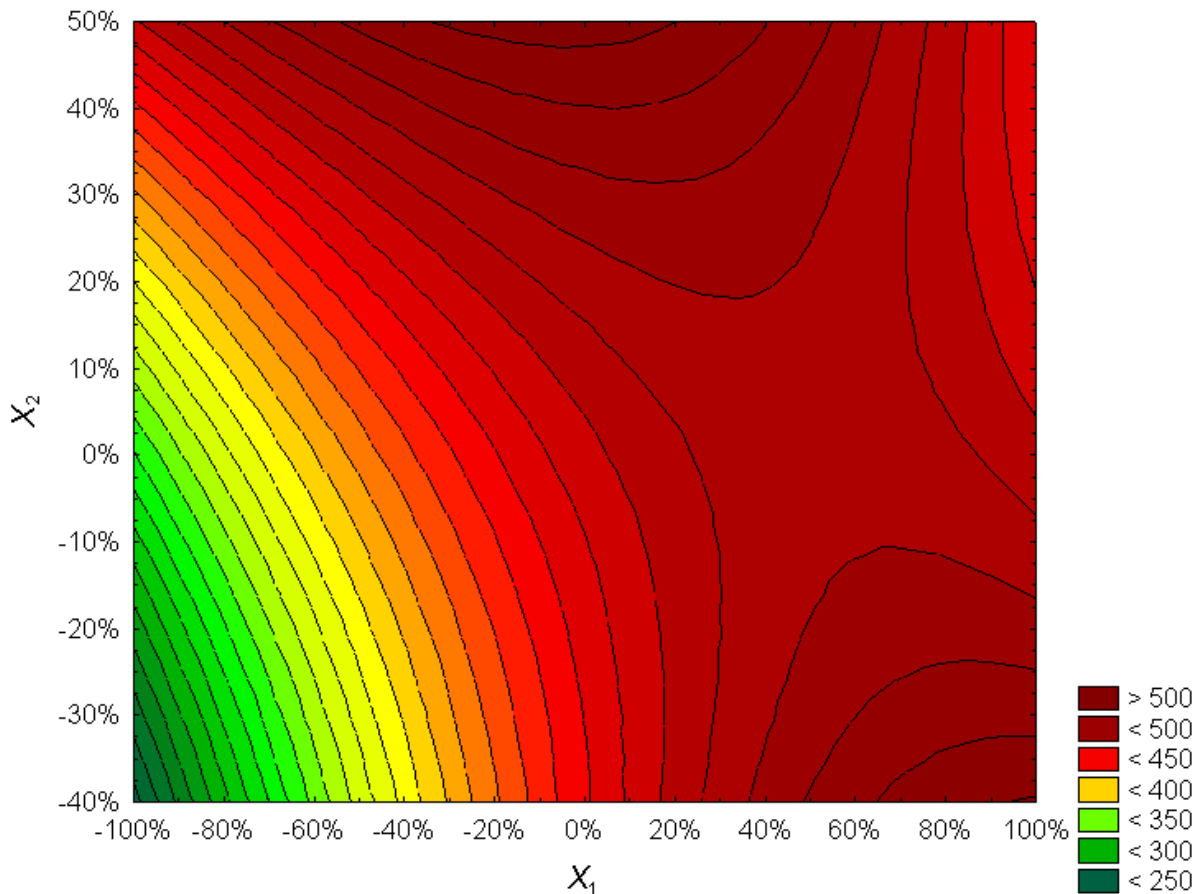
Kolejny model kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego cyklu produkcyjnego przedstawia się wzorem:

$$\tilde{Y}_2 = 466,51 + 72,23 X_1 + 76,51 X_2 - 65,18 X_1^2 - 162,91 X_1 X_2 + 79,45 X_2^2 \quad (34)$$



Rys. 4.23 Wykres powierzchniowy kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego cyklu produkcyjnego [godz.] względem X_1 i X_2

Na kolejnych rysunkach 4.23 i 4.24 przedstawiono model kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego cyklu produkcyjnego względem dwóch zmiennych objaśniających. Analogicznie jak w przypadku średniego cyklu produkcyjnego, niewielkie zmiany zmiennych objaśniających powodują zmianę maksymalnego cyklu w granicach do 13%. Jednakże można tutaj zauważyć, że zmiany w odchyleniu standardowym liczby kopii produktów znacznie bardziej wpływają na maksymalny cykl, niż zmiany w intensywności strumienia zamówień.

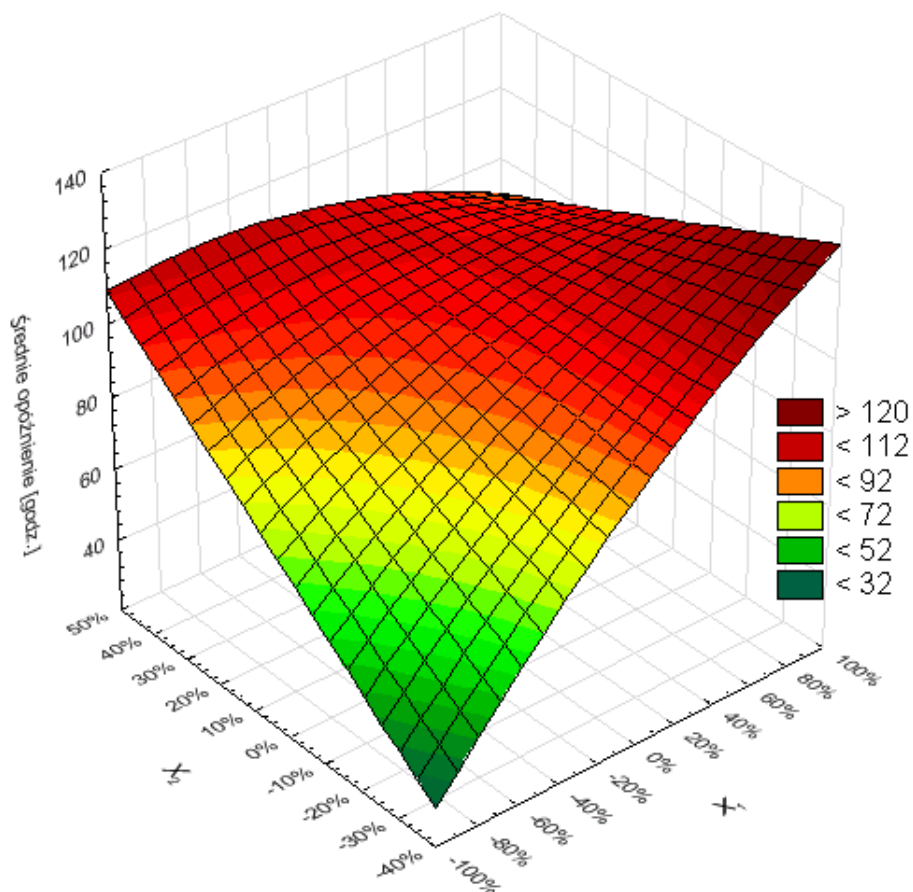


Rys. 4.24 Wykres warstwiczny kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego cyklu produkcyjnego [godz.] względem X_1 i X_2

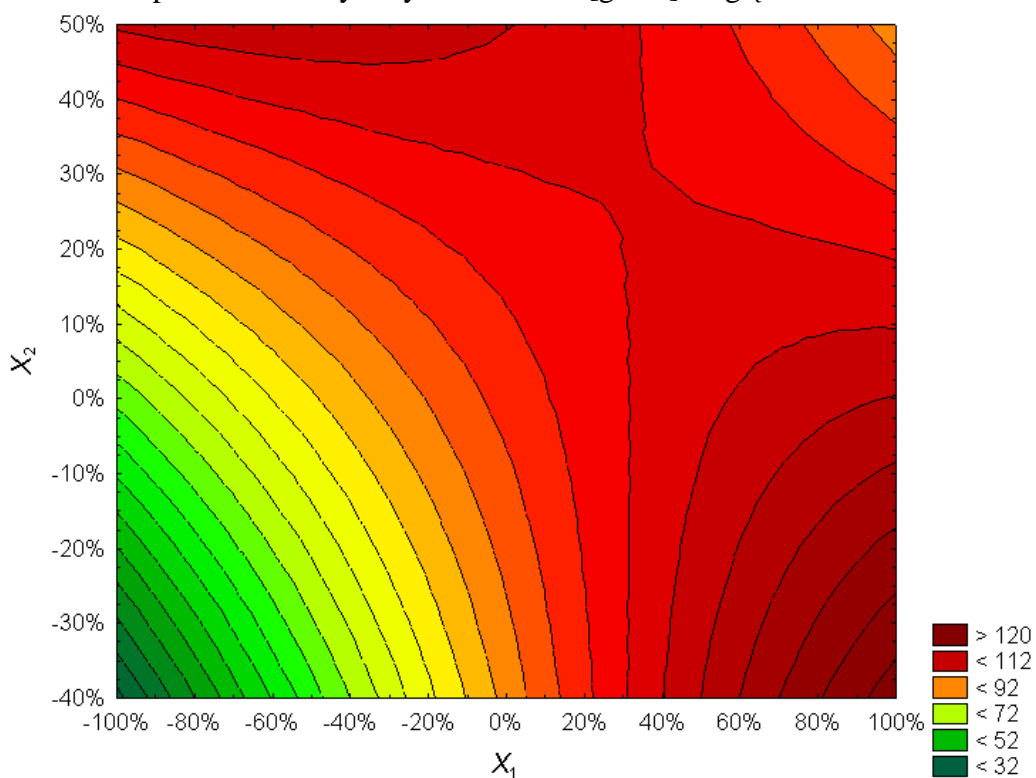
Następny model kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego opóźnienia w wykonywaniu zleceń wygląda następująco:

$$\tilde{Y}_3 = 97,43 + 23,55 X_1 + 20,83 X_2 - 8,75 X_1^2 - 65,68 X_1 X_2 + 1,52 X_2^2 \quad (35)$$

Z wykresów przedstawionych na rysunkach 4.25 i 4.26, na których przedstawiono model kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego opóźnienia względem dwóch zmiennych objaśniających, widać, że rozwiązanie optymalne uzyskane przez algorytm genetyczny (mniej niż 75 godzin) dobrze radzi sobie nawet przy większych zmianach intensywności strumienia zamówień, trochę gorzej dla zmiany wartości odchylenia standardowego liczby kopii produktów. Można zauważyć, że nawet gdy intensywność zamówień maleje, średnie opóźnienie rośnie wraz ze wzrostem odchylenia standardowego liczby kopii produktów. Mimo wszystko rozwiązanie optymalne ustawienia reguł priorytetowych radzi sobie dużo lepiej dla większości zmian parametrów wejściowych, niż przy pojedynczej regule priorytetowej ustawionej dla całego systemu.



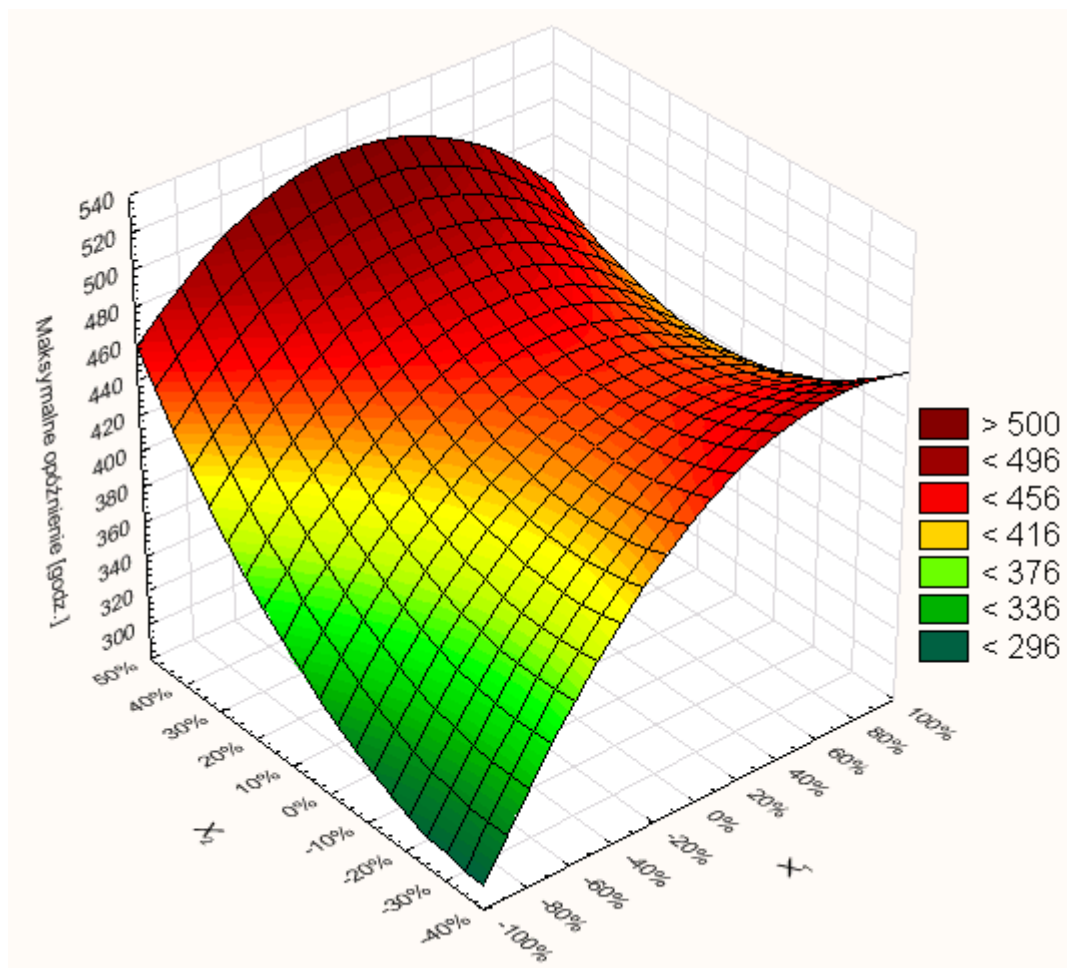
Rys. 4.25 Wykres powierzchniowy kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego opóźnienia w wykonywaniu zadań [godz.] względem X_1 i X_2



Rys. 4.26 Wykres warstwiczny kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego opóźnienia w wykonywaniu zadań [godz.] względem X_1 i X_2

Ostatni model kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego opóźnienia w wykonywaniu zadań przedstawia się wzorem:

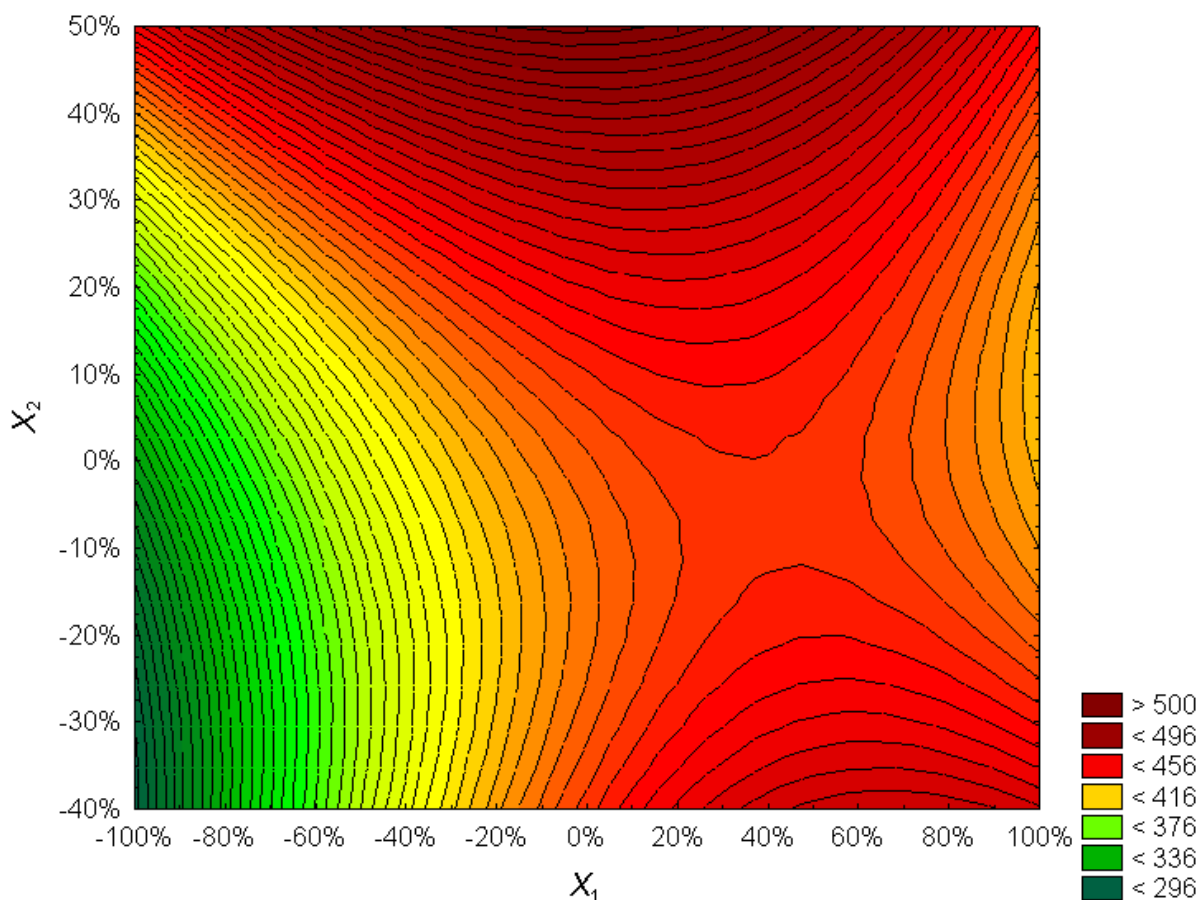
$$\tilde{Y}_4 = 435,45 + 45,92 X_1 + 63,47 X_2 - 62,96 X_1^2 - 98,52 X_1 X_2 + 202,24 X_2^2 \quad (36)$$



Rys. 4.27 Wykres powierzchniowy kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego opóźnienia w wykonywaniu zadań [godz.] względem X_1 i X_2

Tym razem z wykresów przedstawiających model kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego opóźnienia względem dwóch zmiennych objaśniających (rys 4.27 i 4.28), można odczytać, że inaczej niż w poprzednich przypadkach zmiana intensywności strumienia zamówień ma większy wpływ niż zmiana odchylenia standardowego liczby kopii produktów. Analogicznie jak w poprzednich analizach jednakże niewielkie zmiany zmiennych objaśniających powodują niewielką zmianę maksymalnego opóźnienia w wykonywaniu zadań. Również jak było to widać na poprzednich rysunkach znaczne

zmniejszenia zmiennych objaśniających powodują spadek wartości maksymalnego opóźnienia.



Rys. 4.28 Wykres warstwiczny kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego opóźnienia w wykonywaniu zadań [godz.] względem X_1 i X_2

Podsumowując analizę wykresów można stwierdzić, że rozwiązania optymalne ustawień reguł priorytetowych na poszczególnych stanowiskach w systemie znalezione przez algorytm genetyczny dla wszystkich funkcji kryterialnych są stosunkowo odporne na niewielkie zmiany parametrów wejściowych do systemu, które w tym wypadku odzwierciedlały losowe zmiany otoczenia systemu, które mogą występować w praktyce.

Aby dodatkowo ocenić ocenę istotności statystycznej poszczególnych modeli regresji przeprowadzono analizy istotności poszczególnych parametrów regresji dla danych parametrów wyjściowych systemu – zmiennych objaśnianych (tabela 4.10). W tabeli pokazano również wartość testu F Snedecora, który pozwala na ocenę istotności statystycznej całego modelu regresji. Model uznaje się za istotny, jeżeli wariancja resztowa modelu jest statystycznie istotnie mniejsza, niż wariancja zmiennej zależnej. Z tabeli można zauważyć, że na poziomie istotności 5% wszystkie modele regresji są statystycznie istotne. Natomiast testy istotności poszczególnych parametrów regresji b_i , pokazują, które

ze zmiennych objaśniających w modelu kwadratowej powierzchni odpowiedzi są statystycznie istotne i należy je włączyć do równania regresji. Wykonuje się k testów z wykorzystaniem rozkładu t -Studenta o $n-(k+1)$ stopniach swobody.

Tabela 4.10 Testy istotności poszczególnych parametrów regresji wraz z wartościami testu F Snedecora całego modelu dla poszczególnych zmiennych objaśnianych

\tilde{Y}_1 - średni cykl produkcyjny				\tilde{Y}_2 - maksymalny cykl produkcyjny			
	efekty - b_i	wartość statystyki t -Studenta	p -wartość		efekty - b_i	wartość statystyki t -Studenta	p -wartość
wyraz wolny	130,973	47,860	0,000	wyraz wolny	466,512	26,892	0,000
X_1	11,742	3,940	0,001	X_1	72,228	3,823	0,001
X_1^2	-14,211	-2,241	0,034	X_1^2	-65,178	-1,622	0,117
X_2	19,735	2,929	0,007	X_2	46,509	6,791	0,005
X_2^2	-20,145	-0,669	0,510	X_2^2	79,446	5,416	0,031
$X_1 X_2$	-45,281	-3,452	0,002	$X_1 X_2$	-162,912	-1,959	0,061
		F	p			F	p
		5,279	0,002			3,804	0,010
\tilde{Y}_3 - średnie opóźnienie w wykonywaniu zadań				\tilde{Y}_4 - maksymalne opóźnienie w wykonywaniu zadań			
	efekty - b_i	wartość statystyki t -Studenta	p -wartość		efekty - b_i	wartość statystyki t -Studenta	p -wartość
wyraz wolny	97,429	21,924	0,000	wyraz wolny	435,456	35,775	0,000
X_1	23,555	4,867	0,038	X_1	45,921	3,464	0,002
X_1^2	-8,754	-0,850	0,403	X_1^2	-62,960	-2,232	0,034
X_2	20,830	5,904	0,008	X_2	63,469	2,118	0,044
X_2^2	19,517	4,031	0,026	X_2^2	202,246	1,509	0,143
$X_1 X_2$	-65,677	-3,083	0,005	$X_1 X_2$	-98,516	-1,688	0,103
		F	p			F	p
		5,673	0,001			5,111	0,002

Z otrzymanych wartości statystyki t -Studenta oraz p -wartości z tabeli 4.9 można stwierdzić, że w przypadku wszystkich zmiennych objaśnianych (parametrów wyjściowych systemu) efekty liniowe były statystycznie istotne (p -wartość $< 0,05$). Interakcje drugiego rzędu okazały się także statystycznie istotne we wszystkich przypadkach oprócz maksymalnego cyklu produkcyjnego. W każdym z pokazanych

modeli regresji przynajmniej jeden z kwadratowych efektów był również statystycznie istotny. Podsumowując te wyniki, jak również wyniku test F Snedecora, który wskazał statystyczną istotność całych modeli, można stwierdzić, że przeprowadzone analizy i budowa modeli kwadratowej regresji odpowiedzi była uzasadniona.

Zakończenie

Zmiany technologiczne i złożoność zjawisk wpływających na gospodarkę sprawiają, iż problemy pojawiające się w przemyśle oraz zagadnienia rozwojowe stają się coraz bardziej kompleksowe. Proponowane w tej pracy rozwiązanie polega na stworzeniu za pomocą informatycznych narzędzi systemu wspomagającego zarządzanie kolejnością wykonywania zleceń na poszczególnych stanowiskach produkcyjnych. Prowadzone badania przyczynią się do doskonalenia istniejących procesów produkcyjnych. Dzięki tym udoskonaleniom przedsiębiorstwa mogą zwiększyć swoją efektywność, a przez to konkurencyjność swojej produkcji.

Obszar realizacji badań doktorskich obejmuje zastosowanie narzędzi oraz metod informatycznych w celu udoskonalenia procesów produkcyjnych w przemyśle poligraficznym. Celem usprawnienia procesów produkcyjnych jest wprowadzenie innowacji, realizowane poprzez reorganizację procesu zarządzania kolejnością wykonywania zleceń za pomocą priorytetów dynamicznych. Cel postawiony we wstępie rozprawy:

Opracowanie modelu i algorytmów optymalizujących efektywność systemu produkcyjnego z priorytetami dynamicznymi na przykładzie systemu produkcji poligraficznej

został osiągnięty. Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w oparciu o model zbudowany na podstawie rzeczywistych danych maszyn i struktury systemu produkcji poligraficznej. Dzięki temu modelowanie i symulacja produkcyjnych procesów poligraficznych jest bardziej rzeczywista i opiera się o rzetelne dane. Powoduje to wzrost znaczenia wyników badań, które mogą być wdrożone bezpośrednio przez przedsiębiorstwa dzięki ich lepszemu dopasowaniu i zaowocować podniesieniem efektywności systemu.

Analizy pozwoliły znaleźć optymalne wielkości buforów przed stanowiskami produkcyjnymi oraz wykazać interakcje pomiędzy parametrami sterującymi, a także

zidentyfikować, które z nich mają największy wpływ na badane wyjściowe parametry systemu. W dalszej części opracowano metody optymalizacji złożonych systemów produkcyjnych z wykorzystaniem komputerowej symulacji oraz algorytmów genetycznych. Uzyskane wyniki pokazują, iż nie ma uniwersalnej jednej reguły priorytetowej która by jednoznacznie przewyższała inne w swoim działaniu, a także nie ma zgodności co do wyboru reguł jeżeli chodzi o różne parametry wyjściowe z systemu. Obserwując wyniki badań decydując, który zarządza systemem produkcyjnym powinien wybrać takie reguły priorytetowe działające w buforach przed poszczególnymi stanowiskami produkcyjnymi aby optymalizować wybrane przez siebie i strategię przedsiębiorstwa miary efektywności systemu produkcyjnego.

Najczęściej w literaturze światowej można znaleźć badania na temat szeregowania w problemach, które nie są oparte o dane z rzeczywistych systemów. Jeśli są to rzeczywiste systemy to często szeregowanie odbywa się dla systemów z małą liczbą stanowisk (Li i in. 2013, Gupta 1988, Wang i Lu 2007). Brak jest zatem szerokich badań nad szeregowaniem, a w szczególności wykorzystaniem dynamicznych priorytetów w złożonych, wieloproduktowych systemach produkcyjnych, które modelowane są na podstawie rzeczywistych danych.

W tej pracy został zbudowany model matematyczny i symulacyjny złożonego, wieloproduktowego systemu produkcji poligraficznej, w którym reguły priorytetowe mogą być inne na każdym stanowisku produkcyjnym. Przyjęta hipoteza pracy:

Dobór odpowiedniej strategii priorytetów skutkuje podniesieniem efektywności systemu produkcyjnego

została potwierdzona. Wyniki optymalizacji modelu symulacyjnego pozwoliły na stwierdzenie, iż odpowiednia alokacja reguł priorytetowych na stanowiskach systemu produkcyjnego daje lepsze efekty niż jedna reguła priorytetowa przyjęta dla wszystkich stanowisk w całym systemie. Efektywność została mierzona poprzez poprawę czterech wybranych miar efektywności systemów:

- Średni cykl produkcyjny
- Maksymalny cykl produkcyjny
- Średnie opóźnienie w wykonywaniu zleceń

- Maksymalne opóźnienie w wykonywaniu zleceń

We wszystkich przypadkach odpowiednie ustawienie reguł priorytetowych, znalezione dzięki zastosowaniu algorytmu genetycznego, dało poprawę o kilkanaście procent w stosunku do jednej, najlepszej reguły ustawionej dla całego systemu. Dla najbardziej obciążonych stanowisk w systemie, takich jak: offsetowe maszyny drukujące, najlepsze rezultaty zostały osiągnięte dla wieloatrybutowych reguł priorytetowych, które biorą pod uwagę kilka parametrów danego zlecenia. Te najbardziej obciążone stanowiska stanowią wąskie gardła w systemach produkcyjnych i zazwyczaj maszyny, które tam pracują są bardzo kosztowne, szczególnie w systemach produkcji poligraficznej. Dzięki optymalizacji uszeregowania zadań w systemie przy pomocy reguł priorytetowych, można uzyskać podniesienie efektywności bez ponoszenia dodatkowych kosztów. Zatem korzyścią płynącą z realizacji badań pracy doktorskiej będzie podniesienie konkurencyjności przedsiębiorstw z branży poligraficznej poprzez skrócenie cykli produkcyjnych, zminimalizowanie kolejek przed stanowiskami produkcyjnymi (co wpływa na zaoszczędzenie kosztów utrzymania powierzchni magazynowych) a także zwiększenie produktywności systemu produkcyjnego.

Istnieją dalsze możliwości rozwoju metod użytych w tej pracy. Kolejne kroki badań powinny zawierać analizy, które pozwolą na opracowanie reguł mówiących pod zmianą jakich warunków (wewnętrznych lub zewnętrznych) należałoby zmienić strategię priorytetów na danym stanowisku.

Spis rysunków

Rys.1.1 Schemat systemu	str. 5
Rys.1.2 Model systemu produkcyjnego.....	str. 6
Rys.1.3 Proces produkcyjny w drukarni offsetowej.....	str. 14
Rys.1.4 Ewolucja wskaźników efektywności.....	str. 18
Rys. 1.5 Metody analizy systemów produkcyjnych	str. 22
Rys. 1.6 Modelowanie systemów z wykorzystaniem symulacji komputerowej	str. 22
Rys. 2.1 Rola szeregowania w planowaniu	str. 29
Rys. 2.2 Istota priorytetowania zleceń.....	str. 32
Rys. 2.3 Graf semantyczny metod w szeregowaniu zadań.....	str. 33
Rys. 2.4 Schemat obsługi reguł SPT i LPT	str. 35
Rys. 2.5 Schemat obsługi reguł MOR i LOR	str. 35
Rys. 2.6 Schemat obsługi reguły EDD	str. 35
Rys. 3.1 Optymalizacja oparta na symulacji.....	str. 59
Rys. 3.2 Strategie optymalizacja opartej na symulacji w zależności natury funkcji celu f oraz przestrzeni dopuszczalnych parametrów sterujących D	str. 60
Rys. 3.3 Wykorzystanie algorytmu symulowanego wyżarzania w odnajdywaniu optymalnego rozmieszczenia buforów dla systemu produkcyjnego	str. 65
Rys. 3.4 Optymalizacja ustawienia reguł priorytetowych z wykorzystaniem algorytmu genetycznego	str. 68
Rys. 3.5 Przykładowe krzyżowanie dwupunktowe	str.74
Rys. 3.6 Przykładowa mutacja.....	str. 74
Rys. 4.1 Schemat analizowanego offsetowego procesu produkcyjnego	str. 82
Rys. 4.2 Fragment modelu symulacyjnego z oprogramowania Arena 9.0.....	str. 87
Rys. 4.3 Przebieg algorytmu symulowanego wyżarzania dla przypadku 300 iteracji .	str. 89
Rys. 4.4 Przebieg algorytmu symulowanego wyżarzania dla przypadku 600 iteracji .	str. 90
Rys. 4.5 Wykres powierzchniowy zależności pomiędzy wielkością bufora a wykorzystaniem zasobów	str. 93
Rys. 4.6 Funkcja całkowitego zysku dla poszczególnych reguł priorytetowych	str. 94
Rys. 4.7 Czas oczekiwania produktu klasy ulotka względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych.....	str. 95

Rys. 4.8 Czas oczekiwania produktu klasy plakat względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych	str. 95
Rys. 4.9 Czas oczekiwania produktu klasy broszura względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych	str. 96
Rys. 4.10 Czas oczekiwania produktu klasy książka względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych	str. 97
Rys. 4.11 Ilość produkcji w toku (WIP) produktu klasy ulotka względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych.....	str. 98
Rys. 4.12 Ilość produkcji w toku (WIP) produktu klasy plakat względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych.....	str. 98
Rys. 4.13 Ilość produkcji w toku (WIP) produktu klasy broszura względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych.....	str. 99
Rys. 4.14 Ilość produkcji w toku (WIP) produktu klasy książka względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych.....	str. 100
Rys. 4.15 Długość kolejki przed maszyną offsetową względem poziomu wykorzystania dla różnych reguł priorytetowych	str. 100
Rys. 4.16 Średnie opóźnienie w wykonywaniu zleceń względem numeru populacji algorytmu genetycznego	str. 103
Rys. 4.17 Średni cykl produkcyjny względem numeru populacji algorytmu genetycznego	str.104
Rys. 4.18 Maksymalne opóźnienie względem numeru populacji algorytmu genetycznego	str. 105
Rys. 4.19 Maksymalny cykl produkcyjny względem numeru populacji algorytmu genetycznego	str. 106
Rys. 4.20 Wykres rozrzutu zmiennych objaśniających X_2 względem X_1 - brak zależności liniowej.....	str. 110
Rys. 4.21 Wykres powierzchniowy kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego cyklu produkcyjnego [godz.] względem X_1 i X_2	str. 112
Rys. 4.22 Wykres warstwiczny kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego cyklu produkcyjnego [godz.] względem X_1 i X_2	str. 112
Rys. 4.23 Wykres powierzchniowy kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego cyklu produkcyjnego [godz.] względem X_1 i X_2	str. 113
Rys. 4.24 Wykres warstwiczny kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego cyklu produkcyjnego [godz.] względem X_1 i X_2	str. 114

Rys. 4.25 Wykres powierzchniowy kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego opóźnienia w wykonywaniu zadań [godz.] względem X_1 i X_2	str. 115
Rys. 4.26 Wykres warstwiczny kwadratowej regresji odpowiedzi dla średniego opóźnienia w wykonywaniu zadań [godz.] względem X_1 i X_2	str. 115
Rys. 4.27 Wykres powierzchniowy kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego opóźnienia w wykonywaniu zadań [godz.] względem X_1 i X_2	str. 116
Rys. 4.28 Wykres warstwiczny kwadratowej regresji odpowiedzi dla maksymalnego opóźnienia w wykonywaniu zadań [godz.] względem X_1 i X_2	str. 117

Spis tabel

Tabela 3.1 Zakodowane wartości reguł priorytetowych.....	str. 70
Tabela 3.2 Przykładowe wartości chromosomu pojedynczego osobnika.....	str. 71
Tabela 4.1 Parametry modelowanych produktów	str. 84
Tabela 4.2 Czasy trwania operacji technologicznych na poszczególnych stanowiskach roboczych (w minutach)	str. 86
Tabela 4.3 Wartości buforów znalezionych przez algorytm symulowanego wyżarzania wraz z funkcją celu	str. 88
Tabela 4.4 Trzy analizowane poziomy wielkości buforów	str. 91
Tabela 4.5 Analiza wariancji (ANOVA) dla eksperymentu trzyczynnikowego	str. 92
Tabela 4.6 Współczynniki Chi-kwadrat oraz V-Cramera dla oceny wpływu reguł priorytetowych na miary efektywności.....	str. 101
Tabela 4.7 Najlepsze ustawienie reguł priorytetowych dla poszczególnych miar efektywności	str. 107
Tabela 4.8 Miary efektywności systemu dla poszczególnych reguł priorytetowych ustawionych na wszystkich stanowiskach porównane z rezultatem poszukiwań metody Monte Carlo i algorytmu genetycznego.....	str. 108
Tabela 4.9 Parametry eksperymentu analizy wrażliwości według planu 2^5	str. 109
Tabela 4.10 Testy istotności poszczególnych parametrów regresji wraz z wartościami testu F Snedecora całego modelu dla poszczególnych zmiennych objaśnianych.....	str. 118

Bibliografia

1. Aczel A.D.: Statystyka w zarządzaniu, rozdział 11. Warszawa: PWN, 2005.
2. Ahmadizar F., Farahani M.H.: A novel hybrid genetic algorithm for the open shop scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 25, 2012, s.775-787.
3. AL-Ahmari A.M.A, Ridway K.: An integrated modelling method to support manufacturing system analysis and design. *Computers & Industrial Engineering*: 38, 1999 s. 225–238.
4. Alrefaei M., Andradóttir S.: A simulated annealing algorithm with constant temperature for discrete stochastic optimization. *Management Science*: 45, 1999, s. 748–764.
5. Anderson E.J., Nyirenda J.C.: Two new rules to minimize tardiness in a jobshop. *International Journal of Production Research*: 28, 1990, s. 2277-2292.
6. Andradottir S.: Global Search for Discrete Stochastic Optimization. *SIAM Journal on Optimization* 6(2), 1996, s. 513-530.
7. Arnaout J.P., Musa R., Rabadi G.: Ant Colony Optimization Algorithm to Parallel Machine Scheduling Problem with Setups. W: *Proceedings 4th IEEE Conference on Automatic Science and Engineering*, Washington DC, USA, 2008, s. 579-582.
8. Ball P.: Abstracting performance in hierarchical manufacturing simulation. *Journal of Materials Processing Technology*: 76, 1998, s. 246–251.
9. Banks J., Carson J., Nelson B.: *Discrete-event System Simulation*, 3rd edition. New York: Prentice Hall, 2001.
10. Barton, R.R., Meckesheimer, M.: *Metamodel-Based Simulation Optimization*, Chapter 18 in *Elsevier Handbooks in Operations Research and Management Science: Simulation*, 13, (eds. S.G. Henderson and B.L. Nelson), New York: Elsevier, 2006.
11. Baykasoglu A., Ozbakır L.: Analyzing the effect of dispatching rules on the scheduling performance through grammar based flexible scheduling system. *International Journal of Production Economics*: 124, 2010, 369–381.

12. Bedford A., Zeepongsekul P.: On a dual queueing system with preemptive priority service discipline. *European Journal of Operational Research*: 161, 2005, s. 224–239.
13. Bianchi L., Dorigo M., Gambardella L.M., Gutjahr W.J.: A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial. *Optimization Natural Computing*: 8, 2009, s. 239–287.
14. Bitran G.R., Dasu, S.: A review of open queueing network models of manufacturing systems. *Queueing Systems*: 12 (1-2), 1992, s. 95-133.
15. Blackstone J.H., Philips D.T., Hogg G.L.: A state-of-the survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research*: 20, 1982, s. 27–45.
16. Błażewicz J., Ecker K., Schmidt G., Węglarz J.: *Scheduling in Computer and Manufacturing Systems*, 2nd Edition. New York: Springer, 1994.
17. Boon M.A.A., Adan I.J.B.F., Boxma O.J.: A polling model with multiple priority levels. *Performance Evaluation*: 67 (6), 2010, s. 468-484.
18. Bozer Y.A., Kim J.: Determining transfer batch sizes in triphased material handling systems. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*: 8(4), 1996, s. 313-356.
19. Bramson M.: Instability of FIFO queueing networks. *The Annals of Applied Probability*: 4(2), 1994, s. 414–431.
20. Brandt A., Brandt M.: On the two-class M/M/1 system under preemptive resume and impatience of the prioritized customers. *Queueing Systems*: 47, 2004, s. 147–168.
21. Brucker P., Hurink J., Jurisch B., Wöstmann B.: A branch & bound algorithm for the open-shop problem, *Discrete Applied Mathematics*: 76, 1997, s. 43–59.
22. Brucker P., Neyer J.: Tabu search for the multi-mode job-shop problem. *OR Spektrum*: 20, 1997, s. 21–28.
23. Bulgak A.A., Sanders J.L.: Integrating a modified simulated annealing algorithm with the simulation of a manufacturing system to optimize buffer sizes in automatic assembly systems”, Haigh P., Comfort J., Abrams M. (eds.) in *Proceedings of the 1988 Winter Simulation Conference*. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988, s. 684–90.
24. Buslenko N.P., Kałasznikow W.W., Kowalenko I.N.: *Teoria systemów złożonych*. Warszawa: PWN, 1979.

25. Cacuci D.G., Ionescu-Bujor M., Navon M.: Sensitivity And Uncertainty Analysis: Applications to Large-Scale Systems (Volume II). London: Chapman & Hall, 2005.
26. Cakar T., Yildirim M.B.: A neuro-genetic approach to design and planning of a manufacturing cell. *Journal of Intelligent Manufacturing*: 16, 2005, s. 453–462.
27. Chan F.T.S., Chan H.K, Lau H.C.W., Ip R.W.L.: Analysis of dynamic dispatching rules for a flexible manufacturing system. *Journal of Materials Processing Technology*: 138, 2003, s. 325–331.
28. Chen H., Ihlow J., Lehmann C.: A genetic algorithm for flexible job-shop scheduling. W: *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, 1999, s.1120–1125.
29. Cheng R., Gen M., Tsujimura Y.: A tutorial survey of job-shop scheduling problems using genetic algorithms, part II: hybrid genetic search strategies. *Computers & Industrial Engineering*: 36, 1999, s. 343-364.
30. Chiang T.C., Fu L.C.: Using dispatching rules for job shop scheduling with due-date based objectives. *International Journal of Production Research*: 45, 2007, s. 3245–3262.
31. Choi B.D., Kim B., Chung J.: M/M/1 queue with impatient customers of higher priority. *Queueing Systems*: 38, 2001, s. 49–66 .
32. Dai. J.G., Yeh D.H., Zhou C.: The QNET Method for Re-Entrant Queueing Networks with Priority Disciplines. *Operations Research*: 45(4), 1997, s. 610-623.
33. de Souza Filho E.M., Bahiense L., Virgilio, Ferreira Filho J.M.: Scheduling a multi-product pipeline network. *Computers and Chemical Engineering*: 53, 2013, s. 55– 69. Deb K.: Introduction to Evolutionary Multiobjective Optimization, Multiobjective Optimization. *Lecture Notes in Computer Science*: 525(2), 2008, s. 59-96.
35. Diaby M., Cruz J.M., Nsakanda A.L.: Shortening cycle times in multi-product, capacitated production environments through quality level improvements and setup reduction. *European Journal of Operational Research*: 228, 2013, s. 526–535.
36. Doll C.L., Whybark, D.C.: Iterative procedure for the single-machine multi-product lot scheduling problem. *Management Science*: 20(1), 1973, s. 50-55.
37. Dominic P.D.D., Kaliyamoorthy S., Saravana Kumar M.: Efficient dispatching rules for dynamic job shop scheduling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 24, 2004, s. 70–75.

38. Dorndorf U., Pesch E., Phan-Huy T.: Solving the open-shop scheduling problem. *Journal of Scheduling*: 4, 2001, s. 157–174.
39. Durlik I.: *Inżynieria zarządzania, cz. 1 i 2*. Warszawa: Placet, 2000.
40. Dwiliński L.: *Zarządzanie produkcją*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2002.
41. Eid M.S., Moghrabi C., Eldin H.K.: A simulation approach to quality/cost decision scenarios. *Computers & Industrial Engineering*: 33, 1997, s. 105-108.
42. Enns S.T.: A dynamic forecasting model for job shop flow time prediction and tardiness control. *International Journal of Production Research*: 33, 1995, s. 1295–1312.
43. Frantzen M., Amos H.C.N., Moore P.: A simulation-based scheduling system for real-time optimization and decision making support. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*: 27, 2011, s. 696–705.
44. Fu, M.C.: Optimization via simulation: a review. *Annals of Operational Research*: 53, 1994, s. 199-248.
45. Gao J., Sun L., Gen M.: A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems. *Computers & Operations Research*: 35, 2008, s. 2892–2907.
46. Glynn P.W.: Stochastic approximation for Monte Carlo optimization. W: *Proceedings of Winter Simulation Conference*, 1986, s. 356-364.
47. Goldberg D.E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley, 1989.
48. Goldberg D.E.: *Algorytmy genetyczne i ich zastosowania*. Warszawa: WNT, 1995.
49. Gregor M., Skorik P.: Simulation and emulation of manufacturing systems behaviour. *Management and Production Engineering Review*: 1(2), 2010, s. 11–21.
50. Gross D., Harris C.M.: *Fundamentals of Queueing Theory*, third ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1988.
51. Guo Z.X., Wong W.K., Leung S.Y.S., Fan J.T., Chan S.F.: Mathematical model and genetic optimization for the job shop scheduling problem in a mixed- and multi-product assembly environment: A case study based on the apparel industry. *Computers & Industrial Engineering*: 50, 2006, s. 202–219.
52. Gupta, J.D.N.: Two-stage hybrid flowshop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*: 39 (4), 1988, s. 359–364

53. Gutenbaum J.: Modelowanie matematyczne systemów. Warszawa: PWN, 1987.
54. Habchi G., Labrune C.: Study of lot sizes on job shop systems performance using simulation. *Simulation Practice and Theory*: 2, 1995, s. 277-289.
55. Haddock J., Mittenthal J., Simulation optimization using simulated annealing. *Computers and Industrial Engineering*: 22, 1992, s. 387-95.
56. Haghighi A.M., Mishev D.P.: Aparallel priority queueing system with finite buffers. *Journal of Parallel and Distributed Computing*: 66, 2006, s. 379 – 392.
57. Harchol-Balter M., Osogami T., Scheller-Wolf A., Wierman A.: Multi-Server Queueing Systems with Multiple Priority Classes. *Queueing Systems*: 51, 2005, s. 331-360.
58. Haupt R.: A survey of priority rule-based scheduling, *OR Spektrum*: 11, 1989, s. 3-16.
59. Helton J.C., Johnson J.D., Salaberry C.J., Storlie C.B.: Survey of sampling based methods for uncertainty and sensitivity analysis. *Reliability Engineering and System Safety*: 91, s. 1175-1209, 2006.
60. Hnaien F., Delorme X., Dolgui A.: Genetic algorithm for supply planning in two-level assembly systems with random lead times. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*: 22, 2009, s. 906-915.
61. Hodge D.J., Glazebrook K.D.: Dynamic resource allocation in a multi-product make-to-stock production system. *Queueing Systems*: 67, 2011, s. 333-364.
62. Holland J.K.: *Adaptation in Neural and Artificial Systems*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
63. Hon K.K.B.: Performance and Evaluation of Manufacturing Systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*: 54 (2), 2005, s. 139-154.
64. Internetowy Podręcznik Statystyki - Ogólne modele regresji (GRM). www.statsoft.pl/textbook/stgrm.html, dostęp 14.09.2013r.
65. Ip W.H., Li Y., Man K.F., Tang K.S.: Multi-product planning and scheduling using genetic algorithm approach. *Computers & Industrial Engineering*: 38, 2000, s. 283-296.
66. Iravani F., Balcioglu B.: On priority queues with impatient customers. *Queueing Systems*: 58, 2008, s. 239-260.
67. Jayamohan M.S., Rajendran C.: New dispatching rules for shop scheduling: a step forward. *International Journal of Production Research*: 38, 2000, s. 563-586.

68. Jia H.Z., Nee A.Y.C., Fuh Y.Y.H., Zhang Y.F.: A modified genetic algorithm for distributed scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*: 14, 2003, s. 351-362.
69. Johri P.K.: Practical issues in scheduling and dispatching in semiconductor wafer fabrication. *Journal of Manufacturing Systems*: 12, 1993, s. 474–485.
70. Kaplan R., Norton D.: *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*, Boston: Harvard Business School Press, 1996.
71. Katayama T.: Analysis of a time-limited service priority queueing system with exponential timer and server vacations. *Queueing Systems*: 57, 2007, s. 169–178.
72. Kelton W.D., Sadowski R.P., Sturrock D.T.: *Simulation with Arena*, 3 ed. Boston: McGraw-Hill, 2004.
73. Kim D.W., Kim K.H., Jang W., Chen F.F.: Unrelated parallel machine scheduling with setup times using simulated annealing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*: 18, 2002, s. 223-231.
74. Kim D.W., Na D.G., Chen F.F.: Unrelated parallel machine scheduling with setup times and total weighted tardiness objective. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*: 19, 2003, s. 173-181.
75. Kim K., Chae K.C.: Discrete-time queues with discretionary priorities. *European Journal of Operational Research*: 200, 2010, s. 473–485.
76. Kim S.-H., Nelson B.L.: Selecting the Best System, Chapter 17 in *Elsevier Handbooks in Operations Research and Management Science: Simulation*, 13, (eds. Henderson S.G. and Nelson B.L.), New York: Elsevier, 2006.
77. Kim Y.D., Kim J.U., Lim S.K., Jun H.B.: Due-Date Based Scheduling and Control Policies in a Multiproduct Semiconductor Wafer Fabrication Facility. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*: 11, 1998, s. 155-164 .
78. Kirkpatrick S., Gelatt C.D. Jr, Vecchi M.P.: Optimization by simulated annealing. *Science*: 220, 1983, s. 671–80.
79. Kleijnen J. P.C.: *Sensitivity Analysis of Simulation Models*, Discussion Paper No. 2009–11, Tilburg University: Center for Economic Research.
80. Klempka R., Stankiewicz A.: *Modelowanie i symulacja układów dynamicznych*. Kraków: Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH, 2004.
81. Korytkowski P., Wiśniewski T., Rymaszewski S.: An evolutionary simulation-based optimization approach for dispatching scheduling. *Simulation Modelling: Practice and Theory*: 35, 2013a, s. 69–85.

82. Korytkowski P., Wiśniewski T., Rymaszewski S.: Parameter sensitivity analysis for offset printing simulation model. *Electrical Review (Przegląd Elektrotechniczny)*: 89(1a), 2013b, s. 99-102.
83. Kosturiak J., Gregor M.: *Simulation von Produktions systemen*. Wien: Springer Verlag, 1995.
84. Krishnamoorthy A., Babu S., Narayanan V. C.: The MAP/(PH/PH)/1 queue with self-generation of priorities and non-preemptive service. *European Journal of Operational Research*: 195, 2009, s. 174–185.
85. Kumar P.R.: Scheduling semiconductor manufacturing plants. *IEEE Control Systems Magazine*: 14(6), 1994, s. 33–40.
86. Kumar V., Narashima Murthy A.N., Chandrashekara K.: Scheduling of flexible manufacturing systems using genetic algorithm: A heuristic approach, *Journal of Industrial Engineering International*: 7(14), 2011, s. 7-18.
87. Lambrecht M.R., Vanderveken H.: *Production Scheduling and Sequencing for Multi-Stage Production Systems*. *OR Spektrum*: 1, 1979, s. 103-114.
88. Langaris C.: Waiting time analysis of a two-stage queueing system with priorities. *Queueing Systems*: 14, 1993, s. 457–473.
89. Law A.M, Kelton W.D.: *Simulation Modeling and Analysis*, third ed. McGraw-Hill, New York, 2000.
90. Lengyel A., Hatono I., Ueda K.: Scheduling for on-time completion in job shops using feasibility function. *Computers & Industrial Engineering*: 45, 2003, s. 215–229.
91. Li J., Gonzalez M., Zhu Y.: A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing. *International Journal of Production Economics*: 117, 2009, s. 286–301.
92. Li S., Tang T., Collins D.W.: Minimum inventory variability schedule with applications in semiconductor fabrication. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*: 9(1), 1996, s. 145–149.
93. Li S., Tang T., Collins D.W.: Minimum inventory variability schedule with applications in semiconductor fabrication. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*: 9(1), 1996, s. 145–149.
94. Li Z.-T., Chen Q.-X., Mao N., Wang X., Liu J.: Scheduling rules for two-stage flexible flow shop scheduling problem subject to tail group constraint. *International Journal of Production Economics*: 146, 2013, s. 667–678.

95. Liao C.J., Tsai Y.L., Chao C.W.: An ant colony optimization algorithm for setup coordination in a two-stage production system. *Applied Soft Computing*: 11, 2011, s. 4521–4529.
96. Lu M.S., Romanowski R.: Multi-contextual ant colony optimization of intermediate dynamic job shop problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 60, 2012, s. 667-681.
97. Lu S.H., Kumar P.R.: Distributed scheduling based on due dates and buffer priorities. *IEEE Transactions on Automatic Control*: 36(12), 1991, s. 1406–1416.
98. Łubniewski R., Waclawek M., Zymonik J.: *Wybrane zagadnienia organizacji produkcji w przedsiębiorstwie przemysłowym*. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1986.
99. Mansharamani R.: An overview of discrete event simulation methodologies and implementation. *Sadhana* 22(5), 1997, s. 611–627.
100. Mattfeld D.C., Bierwirth C.: An efficient genetic algorithm for job shop scheduling with tardiness objectives. *European Journal of Operational Research*: 155, 2004, s. 616–630.
101. Michalewicz Z. : *Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne*. Warszawa: WNT, 2003.
102. Miettinen K., Mäkelä M.M., Maaranen H.: Efficient hybrid methods for global continuous optimization based on simulated annealing. *Computers & Operations Research*: 33, 2006, s. 1102–1116.
103. Mishra P.K., Pandey P.C.: *Simulation Studies of Flexible Manufacturing Systems Using Statistical Design of Experiments*. *Computers & Industrial Engineering*: 16 (1), s. 65–74, 1989.
104. Moffat J.: Representing the command and control process in simulation models of conflict. *Journal of the Operational Research Society*: 51 (4), 2000, s. 431-439.
105. Monch L.: Simulation-based benchmarking of production control schemes for complex manufacturing systems. *Control Engineering Practice*: 15, 2007, 1381–1393.
106. Montgomery D.C.: *Design and Analysis of Experiments*. New York: Wiley, 2009.
107. Mourani I., Hennequin S., Xie X.: Simulation-based optimization of a single-stage failure-prone manufacturing system with transportation delay. *International Journal of Production Economics*: 112, 2008, s. 26–36.

108. Noguera J.H., Watson E.F.: Response surface analysis of a multi-product batch processing facility using a simulation metamodel. *International Journal of Production Economics*: 102, 2006, 333–343.
109. Nowicki E., Smutnicki C.: A fast taboo search algorithm for the job-shop problem, *Management Science*: 42, 1996, s. 797-813.
110. O’Kane J.F., Spencekley J.R., Taylor R.: Simulation as an essential tool for advanced manufacturing technology problems. *Journal of Materials Processing Technology*: 107, 2000, s. 412–424.
111. O’Hagan A.: *Uncertain Judgements: Eliciting Experts' Probabilities*. Chichester: Wiley, 2006.
112. Osbert-Pociecha G.: Relacja między efektywnością i elastycznością organizacji, [w:] *Efektywność - rozważania nad istotą i pomiarem*, (red.) Dudycz T., Tomaszewicz Ł. Wrocław: Wydawnictwo AE we Wrocławiu, 2007, s. 337-349.
113. Pająk E.: *Zarządzanie produkcją*. Warszawa: Wydawnictwo naukowe PWN, 2007
114. Pardo M.J., Fuente D.: Optimizing a priority-discipline queueing model using fuzzy set theory. *Computers and Mathematics with Applications*: 54, 2007, s. 267–281.
115. Park C.H., Lee H.S.: Performance evaluation of a multi-product CONWIP assembly system with correlated external demands. *International Journal of Production Economics*: 144 (2013) s. 334–344.
116. Pasternak K.: *Zarys zarządzania produkcją*. Warszawa: Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, 2005.
117. Paul R.J., Chaney T.S.: Simulation optimisation using a genetic algorithm. *Simulation Practice and Theory*: 6, 1998, s. 601–611.
118. Pezella F., Merelli E.: A tabu search method guided by shifting bottleneck for the job shop scheduling. *European Journal of Operational Research*: 120, 2000, s. 297–310.
119. Pidd M.: *Computer Simulation in Management Science*, fourth ed. Wiley, Chichester, UK, 1998.
120. Pierreval H., Tautou L.: Using evolutionary algorithms and simulation for the optimization of manufacturing systems. *IIE Transactions*: 29, 1997, s. 181-189.
121. Popov O.: *Elementy teorii systemów – systemy dynamiczne*. Szczecin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2005.
122. Raghu T.S., Rajendran C.: An efficient dynamic dispatching rule for scheduling in a job shop. *International Journal of Production Economics*: 32, 1993, s. 301–313.

123. Rajendran C, Holthaus O.: A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops. *European Journal of Operational Research*: 116 ,1999, s. 156-170.
124. Rajendran C, O. Holthaus, A comparative study of dispatching rules in dynamic flowshops and jobshops. *European Journal of Operational Research*: 116, 1999, s. 156-170.
125. Ramaswamy S ., Yan Y.: Interactive modeling and simulation of virtual manufacturing assemblies: An agent-based Approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*: 10, 1999, s. 503-518
126. Robinson S.: General concepts of quality for discrete-event simulation. *European Journal of Operational Research*; 138, 2002, 103-117.
127. Ryan S.M., Vorasayan J.: Allocating work in process in a multiple-product CONWIP system with lost sales. *International Journal of Production Research*: 43(2), 2004, s. 223-246.
128. Saaty. T.L.: *Decision making for leaders*. Pittsburgh: RWS Publications, 2001.
129. Sabuncuoglu I.: A study of scheduling rules of flexible manufacturing systems: a simulation approach: *International Journal of Production Research*: 36, 1998, s. 527–546.
130. Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saisana M., and Tarantola S.: *Global Sensitivity Analysis*. New York: John Wiley & Sons. 2008,
131. Saltelli A., Tarantola S., Campolongo F., Ratto M.: *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
132. Sarin S.C., Varadarajan A., Wang L.: A survey of dispatching rules for operational control in wafer fabrication. *Production Planning & Control*: 22(1), 2011, s. 4–24.
133. Scott L.R., Harmonosky C.M.: An improved simulated annealing simulation optimization method for discrete parameter stochastic systems. *Computers & Operations Research*: 32, 2005, 343–358.
134. Shi C., Gershwin S.B.: An efficient buffer design algorithm for production line profit maximization. *International Journal of Production Economics*: 122, 2009, s. 725–740.

135. Sleptchenko A., Harten A., Heijden M.: An Exact Solution for the State Probabilities of the Multi-Class, Multi-Server Queue with Preemptive Priorities. *Queueing Systems*: 50, 2005, s. 81–107.
136. Sooyoung K., Youngshin P., Chi-Hyuck J., Performance evaluation of re-entrant manufacturing system with production loss using mean value analysis production loss using mean value analysis. *Computers & Operations Research*: 33, 2006, s. 1308–1325.
137. Stoner J.A.F., Freeman R.E., Gilbert D.R.: *Kierowanie*. Warszawa: PWE, 1997.
138. Sulmicki P.: *Planowanie i zarządzanie gospodarcze*. Warszawa: PWE, 1978.
139. Takagi H.: *Queueing Analysis: Vacations and Priority System*, vol. I. Amsterdam: North-Holland, 1991.
140. Taleizadeh A.A., Jalali-Naini S.G., Weec H.-M., Kuo T.-C.: An imperfect multi-product production system with rework. *Scientia Iranica*: 20(3), 2013, s. 811–823.
141. Uzsoy R., Lee C.Y., Martin-Vega L.A.: A review of production planning and scheduling models in the semiconductor industry. Part I: System characteristics, performance evaluation and production planning. *IIE Transactions*: 24, 1992, s. 47–60.
142. Van Houdt B., Blondia C.: Analyzing priority queues with 3 classes using tree-like processes. *Queueing Systems*: 54, 2006, s. 99–109.
143. Van Volssem S., Dullaert W., Van Landeghem H.: An Evolutionary Algorithm and discrete event simulation for optimizing inspection strategies for multi-stage processes. *European Journal of Operational Research*: 179, 2007, s. 621–633.
144. Vinod V., Sridharan R.: Simulation modeling and analysis of due-date assignment methods and scheduling decision rules in a dynamic job shop production system. *International Journal of Production Economics*: 129, 2011, s. 127–146.
145. Walraevens J., Steyaert B., Bruneel H.: A preemptive repeat priority queue with resampling: Performance analysis. *Annals of Operations Research*: 146, 2006, s. 189–202.
146. Wang H., Lu X.: Approximation algorithms for two-stage flexible flow shop scheduling subject to release dates. *OR Transactions*: 11(3), 2007, s. 86–94
147. Wang Q., Chatwin C.R.: Key issues and developments in modelling and simulation-based methodologies for manufacturing systems analysis, design and performance evaluation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 25, 2005, s. 1254–1265.

148. Wiśniewski T., Zaikin O.: A simulation approach to evaluating manufacturing system performance. *Management and Production Engineering Review*: 2(3), 2011, s. 60–67.
149. Wisniewski T., Korytkowski P., Zaikin O., Pesikov E.: Using Dynamic Priority Rules for Optimization of Complex Manufacturing Systems. In proceedings of 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, Bucharest, Romania, 14(1), 2012, s. 138-144.
150. Yang T., Tseng L.P.: Solving a multiple objective simulation model using a hybrid response surface method and lexicographical goal programming approach – A case study on IC ink marking machines. *Journal of the Operational Research Society*: 53, 2002, s. 211–221.
151. Yildirim M.B., Cakar T., Doguc U., Meza J.C.: Machine number, priority rule, and due date determination in flexible manufacturing systems using artificial neural networks. *Computers & Industrial Engineering*: 50, 2006, s. 185–194
152. Zhang H., Gen M.: Multistage-based genetic algorithm for flexible job shop scheduling problem. *Journal of Complexity International*: 11, 2005, s. 223–232.
153. Zhang H., Jiang Z., Guo C.: Simulation-based optimization of dispatching rules for semiconductor wafer fabrication system scheduling by the response surface methodology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*: 41, 2009, s. 110–121.
154. Zitzler E., Laumanns M., Bleuler S.: A Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization, *Metaheuristics for Multiobjective Optimisation*. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems: 535, 2004, s. 3-37.