

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

Praca dyplomowa

*Opracowanie heurystyk do optymalizacji problemów dyskretnych z wieloma ograniczeniami*

*Metaheuristics for multi-constrain discrete optimization problems*

Autor: *Maciej Morgalla*

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka

Opiekun pracy: *dr hab. inż. Wojciech Chmiel*

Kraków, 2023

# Spis treści

[1.Wstęp 3](#_Toc140224969)

[1.1. Wprowadzenie 3](#_Toc140224970)

[1.2. Cel i zakres pracy 3](#_Toc140224971)

[2. Rozważany problem i metody jego rozwiązania 3](#_Toc140224972)

[2.1. Produkcja i jej ograniczenia 3](#_Toc140224973)

[2.2. Metody optymalizacji produkcji 3](#_Toc140224974)

[3. Opis przyjętego modelu matematycznego 4](#_Toc140224975)

[3.1. Procesy produkcyjne 4](#_Toc140224976)

[3.2. Operacje 5](#_Toc140224977)

[3.3. Maszyny 6](#_Toc140224978)

[3.4. Symulacja 7](#_Toc140224979)

[3.5 Funkcja kary 7](#_Toc140224980)

[4. Stosowane algorytmy 8](#_Toc140224981)

[4.1. Algorytm genetyczny 8](#_Toc140224982)

[4.2. Schemat działania algorytmu genetycznego 8](#_Toc140224983)

[4.3. Algorytm Johnsona 8](#_Toc140224984)

[4.4. Wykorzystanie algorytmu Johnsona 8](#_Toc140224985)

[4.5. Utworzone heurystyki 8](#_Toc140224986)

[5. Opis aplikacji 9](#_Toc140224987)

[5.1. Środowisko programistyczne 9](#_Toc140224988)

[5.2. Proces powstawania i testowania kodu 9](#_Toc140224989)

[6. Wybrane scenariusze testowe 9](#_Toc140224990)

[6.1. Scenariusz 1 9](#_Toc140224991)

[7. Podsumowanie 9](#_Toc140224992)

[8. Bibliografia 9](#_Toc140224993)

# 1.Wstęp

## 1.1. Wprowadzenie

Rozwój cywilizacji i napędzający ją postęp technologiczny stwarza każdemu człowiekowi szansę, na życie lepsze niż życie jego przodków. Postępująca industrializacja i mechanizacja, a w ostatnim czasie automatyzacja procesów produkcyjnych pozwoliła na zaoszczędzenie materiałów, czasu, energii i pieniędzy przy produkcji wyrobów znanych od dekad, oraz na wytwarzanie zupełnie nowych, o wyższej złożoności, jak na przykład mikroprocesory. Niestety przy tej okazji należy podkreślić, że często obniżenie kosztów produkcji towarzyszy obniżeniu jakości towarów. Kiedyś produkty AGD były droższe i produkowane w mniejszej ilości, ale jednocześnie były bardziej trwałe niż te produkowane w dzisiejszych czasach. Być może należałoby podnieść jakość obecnie produkowanych urządzeń, a ich ceny zmniejszać poszukując innych sposobów.

Proces produkcyjny zazwyczaj składa się choć z kilku operacji, które wykonuje się w określonym czasie, miejscu i kroku produkcji. Wobec tego usprawnienie przebiegu produkcji mogłoby ograniczyć znacząco czas, koszty, straty energii i inne jego parametry. Nie jest to jednak łatwe, szczególnie w przypadku dużej elastyczności parku maszynowego i dużej ilości procesów.

## 1.2. Cel i zakres pracy

# 2. Rozważany problem i metody jego rozwiązania

## 2.1. Produkcja i jej ograniczenia

## 2.2. Metody optymalizacji produkcji

# 3. Opis przyjętego modelu matematycznego

## 3.1. Procesy produkcyjne

W celu wytworzenia danego produktu lub półproduktu konieczne jest przeprowadzenie odpowiedniego procesu, a co za tym idzie składających się na niego kroków. Wobec tego, kiedy wytwórca otrzymuje zamówienie na określone towary, bądź konieczne jest uzupełnienie asortymentu, zleca się wykonanie określonych procesów produkcyjnych. W przyjętym modelu matematycznym procesy te są elementami zbioru .

Każdy proces ma inny charakter, gdyż każdy skutkuje wytworzeniem towaru o innych właściwościach. W zależności od poziomu skomplikowania produkcji mogą się składać z zaledwie kilku lub z wielu operacji, o określonym czasie trwania. Z uwagi na różnorodność czynności wytwórczych, niektóre procesy mogłyby być wykonywane przez nieskończenie długi czas, gdyż upływ czasu nie wpływa na jakość wyrobów. Inne jednak, jak na przykład procesy w których kluczową rolę odgrywa obróbka cieplna, muszą zostać wykonane w skończonym czasie, aby zachować parametry wyrobu końcowego. Dlatego niezwykle ważne jest zachowanie narzuconych limitów czasowych. Ze względu na dużą korelację czasu wykonywania procesu z czasem trwania poszczególnych operacji i przerw między nimi, model matematyczny nie uwzględnia parametru uwzględniającego maksymalny czas trwania procesu, gdyż zawiera się on w limitach nałożonych na kroki niższego poziomu.

Każdy proces składa się z wielu operacji , które zgodnie z założeniami muszą zostać wykonane w ściśle ustalonej kolejności. W rzeczywistych procesach istnieją takie operacje, które mogą być wykonywane jednocześnie, jednak ze względu na duże komplikacje wynikające z takiej możliwości, model nie przyjmuje takich rozwiązań. Mimo to możliwa jest taka implementacja, przy czym proces taki należałoby podzielić na rozpatrywane osobno podprocesy o priorytetach skłaniających algorytm do umieszczenia ich w planie produkcji w wymaganej kolejności.

*Rys. 3.1 Przykładowa kolejność wykonywania operacji w ramach procesu.*

Ze względu na różne właściwości procesów tj. ich długość trwania, miejsce w strategii firmy, odbiorca itp. mogą one posiadać określony priorytet , który odzwierciedla ich wagę wobec innych procesów. Jeśli proces posiada wyższy priorytet od innych, powinien zgodnie z założeniami zostać wykonany w pierwszej kolejności. Tutaj należy jednak zwrócić również uwagę na to, że w założeniu istnieje ograniczenie czasowe symulacji wynoszące jedną dobę, bowiem zakłada się, iż zlecenia wykonania procesów napływają raz dziennie, co w większości przypadków nie powoduje problemów, gdyż zamówienia wykonywane są na określony dzień. Wobec tego zachowanie priorytetu nie należy do najważniejszych celów do osiągnięcia przez rozwiązanie końcowego. Mimo to zostało zachowane w modelu, gdyż może być okolicznością zbliżającą rozwiązanie do perfekcyjnego.

*Tabela 3.1 Przykładowe parametry procesu.*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Nazwa parametru | Oznaczenie | Przykładowa wartość | Uwagi |
| numer identyfikacyjny |  | 8 | - |
| priorytet |  | 4 | , przy czym większa wartość oznacza większy priorytet |
| zbiór operacji |  | {5,2,6,8} | , kluczowa jest kolejność wykonywania operacji |

## 3.2. Operacje

Jak wspomniano w poprzednim podrozdziale, pojedyncza operacja stanowi część procesu. Tak jak wynikiem całego procesu jest wytworzenie danego produktu lub półproduktu, tak wynikiem wykonania operacji jest półprodukt o określonej strukturze i określonych właściwościach m.in. cieplnych i fizycznych. Przykładem operacji może być nalewanie soku do butelek, czy też podgrzewanie cieczy w kadzi do określonej temperatury

W niektórych przypadkach wymagane jest wykonanie operacji przed lub po pewnym czasie od zakończenia poprzedniej operacji. Może to być czas potrzebny np. na ostudzenie półproduktu, bądź czas, w którym półprodukt wciąż zachowuje swoje właściwości potrzebne w kolejnej operacji, czy też jakość półproduktu nie pogarsza się. Zachowanie limitów czasowych może być kluczowe w produkcji, dlatego należy zawsze je spełniać, gdyż ich niedotrzymanie może skutkować wytworzeniem wadliwego towaru. Model matematyczny w przypadku, gdy konieczne jest odczekanie przed rozpoczęciem kolejnej operacji, wymaga powiększenia o wymaganą wartość czas wykonywania operacji na wymagających tego maszynach. Jeśli zaś chodzi o maksymalny czas, w którym kolejna operacja ma zostać wykonana, to wartość tą można ustawić w parametrach operacji, zarówno dla okna czasowego przed jak i po.

Kluczowym parametrem wykonywania operacji jest czas. O ile ważne jest zachowanie limitów czasowych pomiędzy operacjami, tak i same operacje wykonywane są w określonym czasie. Ze względów praktycznych czas może się różnić w zależności od maszyny czy też stanowiska, na którym jest wykonywana. Wiąże się to z różnymi właściwościami maszyn (na przykład mocą), poziomem doświadczenia pracowników na stanowisku itp. (patrz rozdz. 3.3).

Każda operacja do prawidłowego wykonania potrzebuje określony surowiec, produkt lub półprodukt w odpowiedniej ilości, zaś po jej wykonaniu otrzymuje się inne produkty lub półprodukty przeznaczone do kolejnych operacji lub do dystrybucji. Dlatego niezwykle ważnym elementem symulowania procesu produkcji jest sprawdzanie ciągłości dostaw wymaganych surowców w odpowiedniej ilości. Pewną komplikacją może być sposób wytwarzania nowych produktów, gdyż może być przeprowadzony zgodnie z dwoma scenariuszami. W pierwszym scenariuszu wszystkie produkty operacji są gotowe do dalszego użycia dopiero w momencie jej zakończenia. Przykładem takiej operacji może być podgrzewanie cieczy. Dzięki odpowiedniemu mieszaniu ciecz powinna osiągnąć zadaną wartość temperatury w całym naczyniu dopiero po upływie pewnego czasu. Nawet jednak jeśli weźmie się pod uwagę nierównomierne nagrzewanie się cieczy, to oddzielenie cieczy o mniejszej temperaturze od tej o odpowiedniej temperaturze w większości przypadków jest niemożliwe, a w dodatku nie zapewnia, że nie zostanie pobrana niewłaściwa ilość. Przeciwnie, w drugim scenariuszu pewna ilość produktów jest gotowa do dalszej obróbki jeszcze podczas trwania operacji. Doskonałym przykładem takich operacji są działania wykonywane na taśmach produkcyjnych, gdzie gotowe produkty zjeżdżają z taśmy co określony czas. Stworzony model matematyczny zapewnia ustawienie nieregularnego wypuszczania produktów, co pozwala na symulowanie produkcji nie opierających się na maszynach (które zazwyczaj działają z taką samą częstotliwością), a na stanowiskach, obsługiwanych przez pracowników ludzkich, oraz na dowolne pobieranie gotowych produktów niezależnie od postępu produkcji.

Dodatkowo do modelu matematycznego zaimplementowana została możliwość pauzowania wykonywania operacji. Niestety jej używanie jest niepraktyczne z powodu wykorzystywanych algorytmów, bowiem zaimplementowany algorytm Johnsona opiera się w na przydzielaniu operacji do maszyn w odpowiednim czasie i kolejności, bez uwzględniania ewentualnych pauz, zaś algorytm genetyczny opiera się na harmonogramowaniu operacji i przerw pomiędzy operacjami. Dodanie możliwości pauzowania pozwoliłoby na ogromny bałagan w potencjalnych rozwiązaniach i choć zapewne dążyłoby do optymalnych obszarów, to utrudniałoby poszukiwanie, nie uwzględniając już o ich utraty przy korzystaniu z algorytmu Johnsona.

*Tabela 3.2 Przykładowe parametry operacji.*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Nazwa parametru | Oznaczenie | Przykładowa wartość | Uwagi |
| numer identyfikacyjny |  | 3 | - |
| maksymalny czas rozpoczęcia po poprzedniej operacji [s] |  | 24 | - |
| maksymalny czas od zakończenia operacji do rozpoczęcia kolejnej [s] |  | 9.2 | W przypadku podania parametru  w kolejnej operacji model ignoruje ten parametr. |
| macierz potrzebnych surowców |  |  | Każda kolumna oznacza inny surowiec. Ostatnia kolumna oznacza % czasu, w którym następuje pobranie surowców w podanej liczbie. |
| lista produktów |  |  | Każda kolumna oznacza inny produkt. Ostatnia kolumna oznacza % czasu, w którym możliwe jest odebranie produktów w podanej liczbie. |
| możliwość pauzowania\* |  | prawda (true) | - |
| maksymalny czas pauzy [s]\* |  | 100 | - |
| maksymalna liczba pauz\* |  | 5 | Nadanie wartości -1 oznacza możliwość nielimitowanego pauzowania |

\*zmienna nie ma znaczenia przy stosowanych algorytmach

## 3.3. Maszyny

Choć operacja i jej właściwości są niezwykle ważne w kontekście poszukiwania rozwiązań problemu, to jednak dużo istotniejsze są obsługujące je maszyny. Pod pojęciem maszyny kryje się wiele sposobów przetwarzania produktów, od stacji roboczej, na której obróbkę wykonują pracownicy ludzcy, przez zautomatyzowane stanowiska, aż po produkcję taśmową. Pomimo tak dużej różnorodności, na potrzeby tej pracy, używa się tylko ogólnego pojęcia maszyna.

Maszyny mogą różnić się między sobą, chociażby wykonywalnymi operacjami. Przykładowo proces toczenia czy gwintowania byłby niemożliwy do zrealizowania na stanowisku przystosowanym tylko do malowania. Dlatego każda maszyna posiada swój własny zbiór operacji, które jest w stanie wykonać. Ponadto czas wykonywania tej samej operacji na dwóch różnych maszynach może się różnić. Powodem takiego stanu rzeczy może być różnica w konstrukcji maszyn, czy też doświadczenia kadry pracowniczej. Wobec tego możliwe jest optymalizowanie czasu produkcji, poprzez przydzielanie operacji do maszyn, które wykonują ją najszybciej. Jednocześnie pojawia się zagrożenie, bowiem może istnieć jedna supermaszyna, która może wykonać wszystkie operacje i w dodatku w najkrótszym czasie, jednakże wykonanie wszystkich operacji może zająć jej więcej czasu, niż gdyby niektóre działania przejęły inne maszyny. Tym ważniejsze staje się korzystanie z algorytmów.

Inną właściwością maszyny jest możliwa konieczność jej przekalibrowania, w momencie zakończenia operacji jednego typu, aby przystosować ją do wykonania kolejnej operacji lecz innego typu. Przykładem może być maszyna nalewająca soki do kartonów. Oczywiste jest, że gdy zmienia się nalewany sok z jabłkowego na porzeczkowy, konieczna jest zmiana opakowań, do których nalewa się soki, oraz oczyszczenie maszyny z resztek poprzedniego soku, co wymaga przerwy w produkcji. Czas ten może się znacząco różnić nawet przy przejściu z tej samej operacji, gdyż następujące operacje mogą posiadać zupełnie inny charakter i mogą mieć zupełnie inne wymagania produkcyjne.

*Tabela 3.3 Przykładowe parametry maszyny.*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Nazwa parametru | Oznaczenie | Przykładowa wartość | Uwagi |
| numer identyfikacyjny |  | 0 | - |
| macierz przekalibrowania [s] |  |  | Każda operacja jest reprezentowana przez jedną kolumnę i jeden wiersz. Kolumny oznaczają operację poprzedzającą, a rzędy następującą. |
| lista czasów wykonywania poszczególnych operacji [s] |  | {0,0,15,28,0,56} | Zera reprezentują operacje, które nie mogą być wykonywane. Algorytm, przed zleceniem maszynie operacji, każdorazowo sprawdza czy czas na liście jest niezerowy. |

## 3.4. Symulacja

Kluczowym krokiem w badaniu rozpatrywanego rozwiązania jest wykonanie symulacji zgodnie z jego harmonogramem. Do jej przeprowadzenia konieczne jest stworzenie list zawierających informacje o wszystkich procesach, operacjach i maszynach, zgodnie z tabelami 3.1-3.3. Ponadto należy utworzyć listę zawierającą początkową ilość wszystkich surowców, półproduktów i produktów. Informacje zawarte we wszystkich czterech listach są wystarczające, aby obliczyć parametry potrzebne do oceny rozwiązania.

W ramach symulacji model matematyczny rozpatruje kolejno każdą maszynę, dodając do czasu jej pracy wszystkie zawarte w harmonogramie czasy operacji, czasy przerw, oraz czasy na przeregulowanie. We wszystkich kluczowych momentach tworzona jest nowa struktura zawierająca informacje konieczne do oceny symulacji.

Wynikiem działania symulacji są trzy listy zawierające: czasy rozpoczęcia i zakończenia poszczególnych symulacji wraz ze szczegółowymi informacjami dotyczącymi procesu i maszyny, zapotrzebowania operacji pod postacią czasu zaistnienia potrzeby wraz z id i ilością surowca oraz produkty operacji w takiej samej postaci jak lista potrzeb.

## 3.5 Funkcja kary

Wyniki symulacji w postaci trzech list są kluczowym czynnikiem oceny rozwiązania. Analiza list pod kątem poprawności wraz z odnotowaniem w odpowiedniej postaci wszelkich nieprawidłowości pozwala na sprawdzenie przydatności rozwiązania poprzez użycie funkcji kary.

W założeniu funkcja kary powiększa się znacznie przy zaistnieniu każdego zaburzenia w procesie produkcyjnym. Jej podstawowym składnikiem jest czas trwania całej produkcji. Jest on szczególnie ważny w przypadku istnienia dwóch rozwiązań o takim samym stopni zgodności z założeniami, lecz o innych czasach, bowiem wtedy mniejsza wartość tej zmiennej wskazuje na lepszą alternatywę.

*x* – oceniane rozwiązanie

*a, b, c, d, e, f, g* – wagi poszczególnych zmiennych

– liczba procesów, w których kolejność operacji została zaburzona

*t* – czas potrzebny do wykonania wszystkich procesów [s]

– liczba nadmiarowych pauz

– nadmiarowy czas pauz [s]

– liczba procesów o niższym priorytecie, które zostały wykonane przed procesami o wyższym priorytecie

– bezwzględna różnica pomiędzy granicznym czasem trwania przerwy pomiędzy operacjami, a osiągniętym czasem

– ilość surowców niedostarczonych na czas do wykonania operacji

Wzór 3.1 przedstawia sposób przełożenia jakości rozpatrywanego rozwiązania na wartość liczbową. Zgodnie z założeniami im wynik funkcji jest mniejszy, tym lepsze jest rozwiązanie.

Należy przypomnieć, iż heurystyki używane do optymalizacji rozwiązań nie uwzględniają istnienia pauz, przez co z nich nie korzystają. Wobec tego zmienne oraz we wszystkich prawidłowych obliczeniach wynoszą zero.

# 4. Stosowane algorytmy

## 4.1. Algorytm genetyczny

## 4.2. Schemat działania algorytmu genetycznego

## 4.3. Algorytm Johnsona

## 4.4. Wykorzystanie algorytmu Johnsona

## 4.5. Utworzone heurystyki

# 5. Opis aplikacji

## 5.1. Środowisko programistyczne

## 5.2. Proces powstawania i testowania kodu

# 6. Wybrane scenariusze testowe

## 6.1. Scenariusz 1

# 7. Podsumowanie

# 8. Bibliografia