

Wojciech LEGIERSKI  
Politechnika Śląska

## PROBLEM SORTOWANIA KOLORÓW W LAKIERNI

**Streszczenie.** Sortowanie kolorów jest w przemyśle samochodowym podyktowane względami ekonomicznymi. Bazuje ono na minimalizacji liczby zmian kolorów w procesie produkcyjnym w lakierni. Przedstawiono efektywne metody minimalizacji liczby tych zmian działające w oparciu o heurystyczne kryteria. Zaproponowana metoda dała ponad dwukrotną poprawę efektywności sortowania.

## COLOR SEQUENCING PROBLEM IN THE PAINT SHOP

**Summary.** Color sequencing problem have been solved in the automotive industry due economical aspects. It is based on minimization of the number of changing colors during industrial process of paint shop. Effective method based on heuristic criteria is presented. This method gives over two times increasing of effectiveness for real-world problem in comparison to existing algorithm.

### 1. Wprowadzenie

Obecne fabryki samochodów realizują produkcje pod zamówienie, czyli kolory samochodów, jakie mają być produkowane danego dnia determinują klienci. Wprawdzie na początku linii produkcyjnej samochody są grupowane w pewne grupy kolorów, jednak poprzez przechodzenie przez poszczególne etapy produkcji dochodzi do wymieszania samochodów różnych kolorów. Problem sortowania kolorów w lakierni fabryki samochodów występuje przed ostatnim etapem lakierowania, kiedy na lakiery podkładowe jest nakładany kolor właściwy. Polega on na takim ułożeniu wchodzących karoserii na lakiernię, by liczba zmian koloru była minimalna. Założenie to wynika z przesłanek ekonomicznych. Każda zmiana koloru łączy się z opróżnieniem resztek poprzedniej farby, z czyszczeniem układu lakierującego oraz przebrojeniem układu na inny kolor, co spowalnia produkcję.

Autor artykułu we współpracy z firmami Ameplus ([www.ameplus.pl](http://www.ameplus.pl)), E-APA ([www.e-apa.pl](http://www.e-apa.pl)) oraz ASI GmbH & Co zaimplementował algorytm sortujący automatycznie karoserie w jednej z fabryk samochodów. Po wdrożeniu nowej metody efektywność sortowania wzrosła o ponad 100% w porównaniu do istniejącego automatu oraz o ok. 20% w porównaniu do sterowania ręcznego. W niniejszej pracy przedstawiono założenia do rzeczywistego problemu sortowania kolorów,

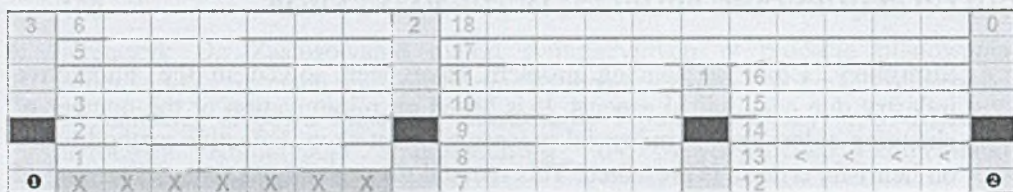


dotychczasowy sposób jego realizacji oraz zaproponowano nowy sposób rozwiązania problemu sortowania kolorów. Ze względu na ochronę danych nie są podane miejsce realizacji tego algorytmu oraz szczegóły implementacji.

## 2. Magazyn sortujący kolory

Magazyn sortujący kolory jest magazynem, który może zgromadzić 114 karoserii przygotowywanych do lakierowania. Jego funkcją jest przede wszystkim możliwość realizacji takiego grupowania kolorów, by wychodzące sekwencje były jak najdłuższe. Oczywiście jak każdy magazyn służy też do zapewnienia ciągłości produkcji na liniach poprzedzających magazyn w razie drobnych awarii na lakierni, lub w razie awarii linii poprzedzających na ciągłe dostarczanie karoserii na dalsze linie produkcyjne. Dlatego też liczba karoserii na magazynie waha się od zerowego wypełnienia do pełnego przepelnienia.

Magazyn składa się z 18 linii przesyłowych, w których transport jest możliwy tylko w 1 kierunku (oznaczonych numerami 1-18) oraz z 4 przesuwnic realizujących transport między liniami (oznaczonych numerami 0-3). Schemat magazynu przedstawiono na rysunku 1. Karoseria po wejściu zostaje umieszczona przez



Rys.1. Magazyn sortujący kolory karoserii

① - wejście na magazyn, ② - wyjście z magazynu

przesuwnicę nr 3 na jedną z 6 linii o pojemności 7 karoserii (linie 1-6), następnie przez przesuwnicę nr 2 jest transportowana na wyjście przez dwie najdłuższe linie (17 i 18), o pojemności 11 karoserii lub przez dwie grupy linii 5 - elementowych (7-10 oraz 12, 14-16) z przesuwnicą nr 1. W odróżnieniu od przesuwnic nr 1-3, które pracują w zależności od potrzeb, przesuwnica nr 0 jest odpowiedzialna za dostarczenie co ok. 90 sek. kolejnej karoserii na wejście lakierni. Linia 13 jest linią szczególną. Jej kierunek jest odwrotny do kierunku ruchu pozostałych linii i ma ona prócz funkcji sortujących funkcje zabezpieczające przed wpuszczeniem na dalsze linie produkcyjne zakazanych karoserii (np. przez brak koloru).

## 3. Definicja problemu

Sortowanie w magazynie odbywa się poprzez odpowiednie gromadzenie karoserii, by potem ich wypuszczanie dawało jak najdłuższe bloki tych samych kolorów. Efektywność sortowania mierzy się średnią długością bloków kolorów (ŚDBK) w perspektywie danego okresu czasu zgodnie ze wzorem:

$$\dot{S}DBK = \frac{\text{liczba\_karoserii}}{\text{liczba\_zmian\_koloru} + 1}$$



Problem ten jest determinowany przez strukturę magazynu, dlatego różni się od klasycznego problemu sortowania samochodów (tzw. Car Sequencing Problem CarSP) szeroko omówionego w pracy doktorskiej M. Prandstettera [5] lub zaproponowanej jako problem benchmarkowy przez biblioteki CSPLib [2]. W odróżnieniu do omawianego problemu CarSP bazuje nie na złożonej strukturze magazynu sortującego, ale na dodatkowych ograniczeniach związanych z wymaganiami co do opcji produkowanych samochodów. W literaturze można znaleźć też wiele odniesień do tego problemu, dzięki popularyzacji go przez francuskie zakłady samochodowe w problemie przedstawionym na ROADEF Challenge 2005 [3]. Podejście do tego problemu można znaleźć w pracach Jaszkiwicza, Kominka i Kubiaka [4]. Najbardziej zbliżonym problemem do omawianego w pracy jest problem typu *PaintShop Problem for Words PPW* [1]. Bazuje on na minimalizacji zmian kolorów w zdaniu zakładając, że dwie takie same litery nie mogą mieć tego samego koloru. Tutaj jednak w przeciwieństwie do przedstawionego problemu sekwencję mamy podaną, a nie wymuszaną. Przegląd literatury pozwolił autorowi na zaznajomieniu się z różnymi podejściami i możliwością wykorzystania ich w dedykowanym problemie.

#### 4. Zastany algorytm sortujący

Przedstawiany sposób sortowania został wprowadzony jako ulepszenie dotychczasowego automatycznego sortowania. ŚDBK była na poziomie 3,7 przy nieingerowaniu w układ operatorów. Dlatego sortowanie było dokonywane ręcznie przez operatorów poprzez blokowanie i odblokowywanie linii na poziomie 7,2 karoserii. Sposób działania poprzedniego algorytmu był następujący:

1. linie 1, 7 i 12 uznane zostały za przesyłowe i na nich nie gromadzono nigdy karoserii, co dawało możliwość dostępu do każdej z linii gromadzącej,
2. przychodzące karoserie były odkładane na linie wg następujących kryteriów:
  - w pierwszej kolejności brano była po uwagę linia, na której kolor ostatniej karoserii na linii był tak sam jak kolor karoserii wejściowej,
  - gdy nie odnaleziono jeszcze linii: odkładano karoserię na pierwszą pustą linię,
  - gdy nie odnaleziono jeszcze linii. odkładano karoserię na linię o najmniejszym bloku kolorów na końcu,
3. karoserie były wypuszczane z magazynu zgodnie z kryteriami:
  - karoseria o kolorze takim jak poprzedni,
  - karoseria o kolorze formującym najdłuższy blok.

Algorytm ten prócz małej efektywności miał też takie wady jak:

- konieczność częstych interwencji operatora,
- zatykanie się magazynu, gdy liczba karoserii była zbyt duża (przez niewykorzystywanie 3 linii jako linii gromadzących),
- niespełnianie ograniczeń na czas pojawienia się karoserii na lakierni (transport z ostatnich linii zbyt długo trwał).



## 5. Analiza możliwych podejść do problemu oraz prezentacja wybranego

### Wyszukiwanie najlepszego kolejnego stanu magazynu

Istnieje skończona możliwa liczba operacji, jakie mogą wykonać przesuwnice (należałoby oczywiście uwzględnić, że przesuwница nie wykonuje żadnej operacji). Dlatego jedną z propozycji na oprogramowanie algorytmu sterowania jest analiza wszystkich możliwych operacji i wykonanie tej, która sprawi, że kolejny stan będzie jakościowo lepszy od poprzedniego. O jakości stanu musiałaby decydować pewna złożona funkcja kosztów, w której dobór parametrów odbywałby się na podstawie analizy wielu przypadków i wpływu ich na decydujący parametr, czyli średni blok kolorów.

Podstawową trudnością w tym podejściu jest zbyt niski poziom abstrakcji. Trudno ocenić jakość kolejnego stanu, jeżeli jego wpływ na średni blok kolorów np. w najbliższej godzinie zależałby od tysięcy kolejnych stanów. Czyli wpływ na wynik końcowy, nie ma bezpośrednio kolejny stan, ale zespół kolejnych stanów.

### Wyszukiwania zespołu operacji

Metoda ta wymagałaby zbudowania idealnego modelu działania magazynu. Następnie należałoby dobrać metodę wyszukiującą taki zespół operacji (np. 100 operacji), które dawałyby najlepszy wynik. Wykonanie takiego zespołu operacji odbywałoby się na zamodelowanym magazynie. Sprawdzano by możliwie najwięcej kombinacji operacji. Wyszukiwanie mogłoby być realizowane przez algorytmy genetyczne, symulowane wyżarzanie lub poszukiwanie tabu.

Niestety, ta metoda niesie ze sobą bardzo duży koszt obliczeniowy i musiałaby być odnawiana w przypadku jakiegokolwiek wpływu na magazyn operatora (np. zablokowanie linii) lub po prostu pojawienie się nowej karoserii na wejściu (jest to element, którego nie da się zamodelować). Zbudowanie idealnego modelu działania magazynu nie jest również rzeczą prostą. Należałoby uwzględnić działanie stołów podwójnych, różnych czasów przejazdów przesuwnic w zależności od pozycji startowej i końcowej, hamowań itp.

### Dobór kryteriów wykonywania operacji (wybrane podejście)

Celem tego podejścia było takie dobranie kryteriów rządzących wykonywanymi operacjami, że dawały one najlepsze wyniki na podstawie analizy danych historycznych oraz przybliżonego modelu działania magazynu. Dobór kryteriów bazował na obliczaniu co krok tablic statystycznych, określających stan magazynu oraz stany na poszczególnych liniach. Kryteria te bazowały również na predykcji karoserii mających pojawić się na wejściu na podstawie odczytów we wcześniejszych sekcjach linii produkcyjnej. Budowano statystyki przyszłych kolorów i kolorom, które miały wystąpić najczęściej, przydzielano najdłuższe linie oraz na podstawie tych statystyk wybierano kolor, który powinien być wypuszczony jako kolejny.

Zalety podejścia bazującego na kryteriach to:

- w łatwy sposób można określić przyczyny podjętych decyzji przez algorytm,
- decyzje podejmowane przez algorytm są realizowane na wysokim poziomie abstrakcji,
- algorytm jest deterministyczny – zawsze zachowa się zgodnie z przewidywaniem, nie wprowadza się losowości w działaniu algorytmu.



## 6. Sposób realizacji podejścia opartego na kryteriach

### Zastosowanie rozkazów z priorytetem

Decyzje modułu logistyki są realizowane poprzez przypisanie karoseriom rozkazów. Każdy rozkaz zawiera kolejną docelową linię oraz priorytet wykonania tego rozkazu. Oznaczenie rozkazu jest następujące:

$$P|L,$$

gdzie:

P – priorytet rozkazu,

L – numer linii docelowej przeznaczonej dla karoserii.

Przesuwnica zawsze będzie realizować w pierwszej kolejności rozkazy o najwyższym priorytecie, o ile jest to możliwe (linie docelowe nie są zapchane, nie ma blokad itp.). Jeżeli przeniesienie karoserii nie jest możliwe ze względu na wypełnienie linii docelowej, przesuwica realizuje rozkaz o niższym priorytecie. Większość karoserii znajdujących się w magazynie ma przypisany tzw. pusty rozkaz oznaczony wpisem „0|1”. Pusty rozkaz oznacza, że przesuwica nie będzie przedstawiać w danej chwili karoserii. Rozkazy są uaktualniane co około 1s.

### Kryteria przyjmowania do magazynu

Przyjmowanie kolejnej karoserii do magazynu realizuje się według następujących kryteriów:

- karoseria jest wysyłana bezpośrednio na wyjście z magazynu, jeśli jest w kolorze aktualnie wydawanym z magazynu,
- karoseria jest odkładana na pierwszą z linii, w której aktualnie znajduje się dany kolor, przy czym w pierwszej kolejności brane są pod uwagę linie, w których dany kolor jest jedyny na linii,
- karoseria jest odkładana na jedną z wolnych linii, przypisanych do tego koloru. Wolne linie są przypisywane do przyjmowania danego koloru na podstawie predykcji kolorów, jakie mają się pojawić na wejściu do magazynu. Predykcja ta jest realizowana przez odczyt z bazy danych kolorów karoserii, które pojawiły się na czytniku sekcji wcześniejszych. Najdłuższe wolne linie są przypisywane kolorom, które w najbliższym czasie wystąpią najczęściej,
- jeżeli karoseria nie może zostać odłożona zgodnie z powyższymi warunkami, jest odkładana na linię już zajęta przez jakiś kolor, mającą jeszcze wolne miejsca, przy czym:
  - stara się nie zastawiać kolorów, które pojawią się w najbliższym czasie,
  - nie są preferowane linie, które już mają więcej niż 1 kolor,
  - są preferowane linie, które mają najwięcej wolnych miejsc.

### Kryteria przesuwania karoserii na magazynie

Przesuwanie karoserii na magazynie ma na celu układanie na liniach bezpośrednio przed wyjściem z magazynu bloków kolorów. Rozkazy związane z przesuwaniem karoserii mają najmniejszy priorytet, dlatego są realizowane w ostatniej kolejności. Karoserie są przesuwane na kolejne linie, jeżeli:

- ostatnim kolorem na kolejnej linii jest kolor danej karoserii,



- jest to linia wolna, przy czym zawsze stara się pozostawić możliwość przesłania kolorów z wejścia magazynu na wyjście, czyli mieć do dyspozycji linie przesyłowe, które nie są wybrane na stałe.

Jeżeli kilka z karoserii może zostać wybranych do przesunięcia ich w ramach magazynu, wybiera się taką, która:

- odblokuje kolor aktualnie wypuszczany na wyjście,
- ,dblokuje inny kolor (im więcej kolorów jest na linii tym szybciej karoseria z danej linii zostanie wybrana),
- karoseria może zostać odłożona na linię już posiadającą ten kolor.

### Kryteria wydawania z magazynu

Wydawanie karoserii z magazynu odbywa się według reguły mówiącej, że powinna się pojawić karoseria o tym samym kolorze jak ostatnia wydana z magazynu. Jeżeli nie ma w magazynie kolejnej karoserii o kolorze wydawanym lub karoseria jest zbyt daleko od wyjścia z magazynu, wybierany jest kolejny kolor. Wybór kolejnego koloru do wydawania z magazynu jest realizowany przy następujących założeniach:

- wydawane są kolory, które nie pojawią się przez dłuższy czas,
- preferowane są kolory, które zajmują więcej niż jedną linię,
- jest to kolor, który blokuje inne kolory na danej linii.

## 7. Podsumowanie

Zaproponowana metoda została wdrożona w latach 2005-2006 w rzeczywistej fabryce samochodów i została przyjęta z dużym zadowoleniem. Algorytm i prosty interfejs użytkownika napisano przy użyciu VC++ 7.1, wizualizacja była realizowana na oprogramowaniu firmy Intouch, natomiast sterowanie było dokonywane poprzez 2 sterowniki S7 400.

Zalety proponowanego podejścia to przede wszystkim: stabilność algorytmu, zdolność przewidzenia decyzji, jakie on podejmie oraz duża efektywność. Działanie tego algorytmu na rzeczywistym obiekcie dało w wyniku ŚDBK na poziomie 9,6 na przestrzeni miesiąca.

## LITERATURA

1. Epping Th., Hochstättler W., Oertel P.: Complexity results on a paint shop problem. *Discrete Applied Mathematics* 136 Special issue: The 1st Cologne-Twente Workshop on Graphs and Combinatorial Optimization (2004) 2004, s. 217–226.
2. Gent I.P., Walsh T.: CSPLib: a benchmark library for constraints. Technical report, APES-09-1999, 1999. Available at <http://4c.ucc.ie/~tw/csplib/schedule>.
3. <http://www.prism.uvsq.fr/~vdc/ROADEF/CHALLENGES/2005/>.
4. Jaszkievicz A., Kominek P., Kubiak M.: Adaptation of the genetic local search algorithm to a car sequencing problem. 7th National Conference on Evolutionary Algorithms and Global Optimization, Kazimierz Dolny, Poland 2004, p. 67–74.

5. Prandtstetter M.: Exact and heuristic methods for solving the car sequencing problem. Master's thesis supervised by G. Raidl and B. Hu, Vienna University of Technology, Institute of Computer Graphics and Algorithms., August 2005.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ewa Dudek-Dyduch

### Abstract

Color sequencing problem have been solved in the automotive industry due economical aspects. It is based on minimization of the number of changing colors during industrial process of paint shop. Effective method based on heuristic criteria is presented in the paper. effectiveness for real-world problem in comparison to existing algorithm.

Presented problem is not a classical, well-known Car Sequencing Problem, and based mainly on the structure of the store. Therefore used method rely rather on heuristic case-based reasoning than classical approach.

Its main advantages over existing method arc:

- prediction of colors, which would appear on the store, and assigning empty lines for colors, which appear in the greatest number.
- better transport of car bodies inside store,
- emptying store is based on the criteria, that it is better to wait for longer color sequence than emptying store from longest possible color block.

Presented method was implemented in car factory with great success.