

Współczesne problemy sekwencjonowania samochodów na wydziale lakierni

Contemporary aspects of car sequencing problem in a paint shop

JOLANTA KRYPEK
SARA ALSZER *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.67>

W artykule przedstawiono problem sekwencjonowania samochodów z perspektywy wymagań stawianych przez wydział lakierni. Zagadnienie ustalania kolejności realizacji zleceń produkcyjnych w zależności od koloru, na jaki malowana jest dana karoseria, było w literaturze rozpatrywane wielokrotnie. Założenia, które proponowano w ramach prowadzonych rozważań, znacznie jednak upraszczały analizowany problem w stosunku do istniejących wymagań i rozwiązań przemysłowych. Celem przeprowadzonej analizy problemu jest wykazanie konieczności zupełnie nowego podejścia do zagadnienia sekwencjonowania, uwzględniającego rzeczywistą strukturę linii produkcyjnej samochodów oraz organizację pracy lakierni.

SŁOWA KLUCZOWE: inżynieria produkcji, sekwencjonowanie, produkcja samochodów, buforowanie, CSP

The article presents a problem of car sequencing from the perspective of the paint shop requirements. The issue of determining production orders depending on a color, on which a body is painted, has been considered in the literature several times. However, the assumptions proposed by scientists simplified greatly the analyzed problem in relation to the existing industrial solutions and requirements. The purpose of conducted analysis is to demonstrate a need for a completely new approach to sequencing problem, taking into account an actual structure of a car production line and organization of work in a paint shop.

KEYWORDS: production engineering, sequencing, car production, buffering, CSP

Na rynku światowym obserwuje się obecnie tendencję do odchodzenia od produkcji na magazyn (*make to stock*) w kierunku produkcji na zlecenie (*make to order*) charakterystycznej dla produkcji wielowersyjnej czy wieloasortymentowej. Maszyny i urządzenia wykorzystywane w produkcji powinny mieć zdolność do szybkiego przezbierania w zależności od wykonywanego zamówienia. Powstaje więc pytanie, w jaki sposób zorganizować produkcję i w jakiej kolejności realizować zlecenia, aby liczba koniecznych przebrojeń, przekładająca się bezpośrednio na czas i koszty produkcji, była jak najmniejsza. Ten problem, określany jako problem sekwencjonowania, był

szeroko omawiany w literaturze, przy czym analizowano głównie proces montażu samochodów [1–5].

Problem sekwencjonowania samochodów, czyli CSP (*car sequencing problem*) wynika ze specyfiki samego procesu produkcyjnego oraz struktury linii produkcyjnej. Każdy samochód produkowany jest w kilku następujących po sobie etapach (rys. 1), realizowanych na wydziałach: tłoczni, spawalni, lakierni i montażu.

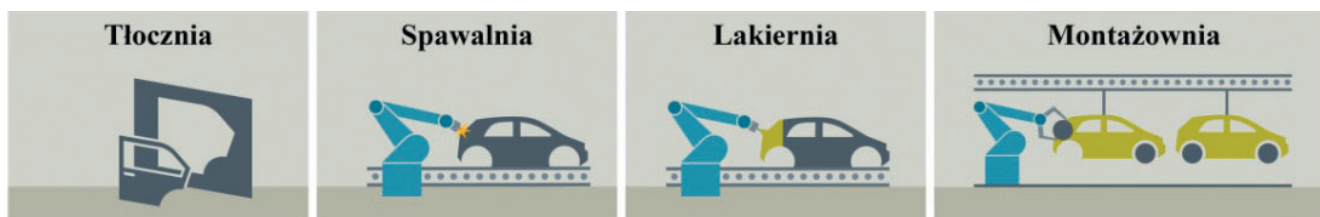
Lakierowanie karoserii jest złożonym procesem, obejmującym kilkadziesiąt etapów. Wyróżnia się cztery zasadnicze fazy lakierowania:

- przygotowanie karoserii do procesu lakierowania,
- lakierowanie,
- obróbkę końcową,
- końcową kontrolę jakości.

Niezależnie od produkowanej wersji samochodu każda karoseria musi przejść przez wszystkie wymienione powyżej etapy malowania. W przypadku większości operacji kolor, na jaki zostanie pomalowana karoseria, nie ma większego znaczenia z perspektywy optymalizacji procesu. Sekwencja karoserii determinuje jednak liczbę przebrojeń dyszy lakierniczych, które biorą udział w dwóch etapach procesu lakierowania, tj. malowania farbą podkładową oraz farbą bazową. Powodem tego jest występowanie tych farb w różnych kolorach (wariantach). W związku z tym, biorąc pod uwagę cechę pojazdu, jaką jest kolor, należy tak ustalić sekwencję karoserii, aby liczba przebrojeń dyszy była jak najmniejsza.

Sekwencjonowanie samochodów na wydziale lakierni

Oryginalny problem sekwencjonowania samochodów został zdefiniowany przez Parello i in. [6] w 1986 r. i obejmował zagadnienie sekwencjonowania samochodów wyłącznie na wydziale montażu. Rozwiązaniem tego problemu było znalezienie sekwencji pojazdów wyposażonych w komponenty standardowe i dodatkowe, których montaż bardziej obciążał linię w stosunku do wyposażenia standardowego. Ustalona sekwencja karoserii przemieszczających się przez kolejne stacje robocze linii montażu miała na celu spełnienie wymagania dotyczącego nieprzekroczenia przepustowości tych stacji.



Rys. 1. Etapy produkcji samochodów

* Dr inż. Jolanta Krypek (jolanta.krypek@polsl.pl), mgr inż. Sara Alszer (sara.alszer@polsl.pl) – Zakład Inżynierii Systemów, Instytut Automatyki, Politechnika Śląska

Wychodząc naprzeciw rosnącemu zapotrzebowaniu na rozwiązanie problemu sekwencjonowania łączącego ograniczenia procesu montażu i procesu lakierniczego francuska organizacja French Society of Operations Research and Decision Analysis zorganizowała w 2005 r. konkurs o nazwie ROADEF'2005 Challenge. Uwzględniono m.in. fakt, że dysza lakiernicza ma skończoną pojemność, i założono, że zostaje oczyszczona po osiągnięciu tej pojemności, co – podobnie jak czyszczenie dyszy przy każdorazowej zmianie koloru – powoduje zwiększenie zużycia rozpuszczalnika. Zauważono, że zmiany kolorystyczne (przebrojenia) skutkują wydłużeniem czasu produkcji oraz wpływają na wzrost kosztów produkcji. Powodem tego jest nie tylko zużycie rozpuszczalnika, lecz także strata niewykorzystanej farby, która w trakcie przebrojenia pozostaje w dyszy. Wprowadzenie czyszczeń periodycznych miało na celu wskazanie na konieczność utrzymywania dobrej jakości farb – jeżeli dysza nie będzie czyszczona syste-

matycznie, pozostająca farba ulegnie aglutynacji (zlepianiu cząsteczek), w czego efekcie karoseria nie zostanie prawidłowo pokryta farbą. Zaproponowano także, by przy obliczaniu liczby zmian kolorów brać pod uwagę przebrojenie, które zachodzi na przełomie dwóch dni produkcji, o ile następuje zmiana koloru. Wszystkie wprowadzone ograniczenia związane z wydziałem lakierni zostały opisane jedną zmienną *NCC* (*number of color changes*), określającą liczbę zmian kolorów, i uwzględnione z wagą w_{cc} jako jeden ze składników wielokryterialnej funkcji celu:

$$Z = w_{cc} \cdot NCC + w_{HPRC} \cdot NHPRC + w_{LPRC} \cdot NLPRC$$

Pozostałe dwie zmienne – *NHPRC* (*number of high priority ratio constraint*) oraz *NLPRC* (*number of low priority ratio constraint*) – określały liczbę naruszeń ograniczenia przepustowości linii montażu dla opcji, które odpowiednio w dużym i małym stopniu obciążały linię montażu [7].

Przykład

Na rys. 2 i 3 przedstawiono wpływ sekwencji na liczbę zmian kolorów przy następujących założeniach:

- lakiernia dysponuje jednym przezbrajającym robotem lakierniczym,
- po trzeciej karoserii następuje periodyczne czyszczenie dyszy,
- przy określaniu liczby zmian kolorów uwzględnia się przebrojenie występujące na przełomie dwóch dni produkcji,
- plan produkcji zakłada pomalowanie trzech karoserii na kolor szary oraz dwóch karoserii na kolor czerwony,
- karoseria z dnia poprzedniego została pomalowana na kolor niebieski.

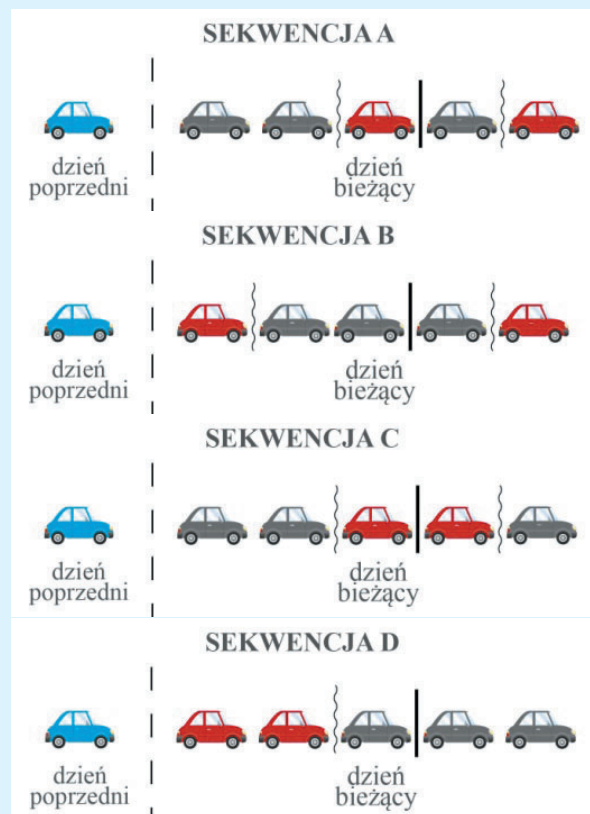
Dodatkowo na rysunkach zaznaczono: czyszczenie periodyczne – pogrubioną linią prostą, przebrojenie – cienką linią falistą.

Sekwencja A generuje trzy zmiany koloru, sekwencje B i C – dwie zmiany, a sekwencja D – jedną zmianę. W sekwencji B i C występuje sytuacja, w której czyszczenie dyszy wypełnionej odpowiednio farbą szarą i czerwoną nastąpi na skutek czyszczenia periodycznego. W efekcie pozostała w dyszy farba zostanie stracona, ponieważ po procesie czyszczenia dysza zostanie ponownie załadowana farbą tego samego koloru. Takie sekwencje są niekorzystne zwłaszcza z perspektywy minimalizacji zużycia farby. W sekwencji A czyszczenie periodyczne pokrywa się wprawdzie ze zmianą koloru, jednak i tak konieczne jest dwukrotne przebrojenie dyszy. Najbardziej korzystna wydaje się sekwencja D, w której występuje tylko jedna zmiana koloru.

Biorąc jednak pod uwagę wymagania zakładów przemysłowych, zagadnienie CSP na wydziale lakierni należałoby rozważyć z perspektywy minimalizacji nie tylko liczby zmian kolorów, lecz także zużycia lakieru i czynnika stosowanego do czyszczenia dyszy lakierniczych. Składnik *NCC* w funkcji celu nie jest wystarczający – minimalizacja zużycia rozpuszczalnika nie jest brana pod uwagę. Rozwiązanie optymalne, uwzględniające wymagania przemysłowe, zostało przedstawione na rys. 3.

Sekwencja E, podobnie jak sekwencja D, wymaga tylko jednej zmiany koloru, ale teraz zmiana koloru następuje w tej samej chwili co czyszczenie periodyczne dyszy (występujące zawsze, niezależnie od sekwencji kolorów).

To oznacza, że poszukując sekwencji optymalnej, należy dążyć do sytuacji, gdy jak najwięcej czyszczeń wynikających ze zmiany kolorów pokrywa się z periodycznymi czyszczeniami dyszy. W tym celu oprócz monitorowania liczby zmian kolorów konieczna jest również analiza wystąpień czyszczeń periodycznych.



Rys. 2. Wpływ doboru sekwencji na liczbę zmian kolorów



Rys. 3. Optymalna sekwencja karoserii

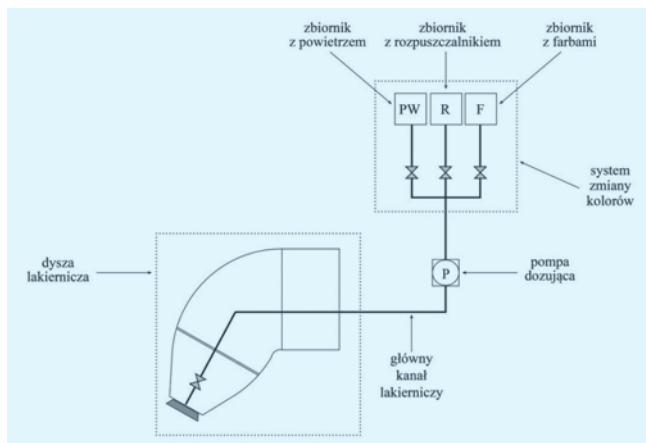
Problem CSPwB na wydziale lakierni

Założenie, że celem optymalizacji procesu lakierowania jest wyłącznie minimalizacja liczby zmian kolorów, nie jest akceptowane. Wśród pozostałych założeń, które nie odzwierciedlają rzeczywistej organizacji pracy na wydziale lakierni, można wymienić:

- wykorzystanie systemu lakierniczego opartego na wypełnianiu dyszy lakierniczej porcjami farby,
- przebieg procesu lakierniczego zminimalizowany do zaledwie jednej operacji – lakierowania farbą bazową,
- traktowanie procesu produkcji samochodu jako ciągu technologicznego, w którym sekwencja pojazdów określana jest raz, przed wydziałem tłoczni.

Ze względu na poczynione uproszczenia rozwiązania wypracowane przez naukowców nie znalazły bezpośredniego zastosowania w przemyśle. W związku z tym autorzy artykułu przedstawiają zmodyfikowane podejście do problemu, określanego dalej jako Car Sequencing Problem with Buffers (CSPwB).

W CSPwB stosowany będzie ciągły system lakierniczy (rys. 4). Kolejnym istotnym argumentem przemawiającym za rezygnacją z systemu porcjowego jest możliwość wykonania redundancji systemu zmiany kolorów, doprowadzającego poszczególne substancje do dyszy. Istnieje wówczas możliwość zarezerwowania jednego kanału dla koloru dominującego, który najczęściej występuje w zamówieniach klientów. Takie rozwiązanie pozwala znacząco zminimalizować liczbę przebrojeń dyszy, a w konsekwencji – zmniejszyć zużycie farby oraz rozpuszczalnika. Niezbędne jest stosowanie periodycznego czyszczenia dyszy, co zapewnia wysoką jakość procesu malowania.



Rys. 4. Struktura ciągłego systemu lakierniczego

Kolejną modyfikacją jest uwzględnienie w CSPwB etapowości procesu lakierowania. Spośród wszystkich operacji lakierniczych można wyróżnić trzy najważniejsze: malowanie farbą podstawową, malowanie farbą bazową oraz malowanie farbą bezbarwną – wskazuje to na etapowość procesu lakierowania. W pierwszym i drugim przypadku sekwencja pojazdów powinna być dostosowana do wymagań danego etapu procesu. Wynika to m.in. z faktu, że liczba kolorów podstawowych jest zazwyczaj mniejsza w porównaniu z liczbą dostępnych kolorów bazowych. Farba bezbarwna występuje tylko w jednym wariantcie i w związku z tym nie jest brana pod uwagę w niniejszych rozważaniach. Konieczne jest zatem zastosowanie takiej struktury linii produkcyjnej, która umożliwi bieżącą zmianę sekwencji oraz zachowanie ciągłości produkcji. Zasadniczą zaletą wykorzystania magazynów buforowych na wydziale lakierni jest: po pierwsze – odseparowanie

procesów malowania farbą podstawową i farbą bazową, po drugie – uniezależnienie całego wydziału lakierni od wydziału spawalni i wydziału montażu. W efekcie pierwszy bufor służy do zmiany sekwencji karoserii opuszczających wydział spawalni, zgodnie z ograniczeniami procesu malowania farbą bazową, natomiast drugi bufor umożliwia dopasowanie kolejności karoserii, przy założeniu optymalizacji procesu malowania farbą bazową.

Podsumowanie

Problem sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni był analizowany na przestrzeni wielu lat. Mimo rozszerzenia oryginalnego zagadnienia CSP o parametry i ograniczenia wynikające z procesu lakierniczego analiza problemu sekwencjonowania wciąż pozostawała nieadekwatna do problemów występujących na rzeczywistej linii produkcyjnej. Mając na uwadze zaproponowane przez autorów artykułu modyfikacje, wynikiem działania algorytmu sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni powinny być cztery sekwencje: sekwencja wejściowa/wyjściowa do/z bufora magazynowania I oraz sekwencja wejściowa/wyjściowa do/z bufora magazynowania II. Wobec tego poszukiwanie rozwiązania CSPwB może być prowadzone niezależnie dla obu etapów procesu malowania. Niemniej jednak przy ustalaniu sekwencji wyjściowej z bufora I, w przypadku otrzymania kilku optymalnych sekwencji spełniających wymagania procesu malowania kolorem podstawowym, rozstrzygnięcie wyboru sekwencji może zostać przeprowadzone w oparciu o wymagania procesu malowania farbą bazową. Podobna sytuacja zachodzi w przypadku sekwencji wyjściowej z bufora II – wówczas pod uwagę można wziąć ograniczenia wynikające z optymalizacji procesu montażu. Nie zmienia to jednak faktu, że struktura linii wyposażonej w bufory daje możliwość niezależnego i bieżącego sekwencjonowania karoserii na każdym etapie produkcji.

Praca powstała we współpracy z firmą ProPoint Sp. z o.o. Sp. k. i jest finansowana ze środków BKM-506/RAU1/2016, t. 18.

LITERATURA

1. Gottlieb J., Puchta M., Solnon C. "A study of greedy, local search and ant colony optimization approaches for car sequencing problems". *Applications of Evolutionary Computing*. Vol. 2611 of LNCS. Berlin Heidelberg (Germany): Springer-Verlag, 2003, s. 246–257.
2. Puchta M., Gottlieb J. "Solving car sequencing problems by local optimization". *EvoWorkshops*. Vol. 2056 of LNCS. Berlin Heidelberg (Germany): Springer-Verlag, 2002, s. 246–257.
3. Zufferey N., Studer M., Silver E. "Tabu search for a car sequencing problem". *Proceedings of the 19th International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference (FLAIRS 2006)*. The AAAI Press, CA, 2006, s. 457–462.
4. Gravel M., Gagne C., Price W. "Review and comparison of three methods for the solution of the car-sequencing problem". *Journal of the Operational Research Society*. 56, 11 (2005): s. 1287–1295.
5. Bautista J., Pereira J., Adenso-Diaz B. "A beam search approach for the optimization version of the car sequencing problem". *Annals of Operations Research*. 159, 1 (2008): s. 233–244.
6. Parello B.D., Kabat W.C., Wos L. "Job-shop scheduling using automated reasoning: a case study of the car sequencing problem". *Journal of Automated Reasoning*. 2, 1 (1986): s. 1–42.
7. Solnon C., Cung Van Dat, Nguyen A., Artigues C. "The car sequencing problem: overview of state-of-the-art methods and industrial case-study of the ROADEF 2005 challenge problem". *European Journal of Operational Research*. 191, 3 (2008): s. 912–927.