

Nadążne sterowanie procesem sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni

The follow-up control of the body sequencing process at the paint shop

JOLANTA KRYPEK
SARA BYSKO*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.7.57>

Przedstawiono zmodyfikowaną metodę nadążnego sterowania produkcją, którą można wykorzystać w wielowersyjnym procesie sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni. Badano rzeczywistą strukturę lakierni wraz z buforem (Car Sequencing Problem 4.0). Głównymi celami badań były minimalizacja liczby przebrojeń wynikających ze zmian kolorów oraz synchronizacja tych przebrojeń z wymuszonym, okresowym czyszczeniem pistoletów malarskich.

SŁOWA KLUCZOWE: przemysł motoryzacyjny, nadążne sterowanie produkcją, Car Sequencing Problem 4.0, algorytm nadążnego sekwencjonowania, przebrojenia

A modified method of follow-up production control that can be used in a multi-version car body sequencing process at the paint shop department is presented. The actual structure of the paint shop along with the buffer was subjected to tests (Car Sequencing Problem 4.0). The main goals of the research were to minimize the number of changeovers resulting from color changes and to synchronize these changeovers with forced, periodic cleaning of paint guns.

KEYWORDS: automotive industry, follow-up production control, Car Sequencing Problem 4.0, follow-up sequencing algorithm, changeovers

Wprowadzenie

Wysokie wymagania rynku, zapewnienie terminowości realizacji zleceń, konieczność szybkiego reagowania na potrzeby konkretnego klienta oraz minimalizacja kosztów produkcji, magazynowania i transportu wymuszają na producentach stosowanie elastycznej formy organizacji produkcji. Jest ona charakterystyczna dla wielowersyjnej, powtarzalnej produkcji na zamówienie (*Make to Order, MTO*), a jej skuteczność jest zapewniona poprzez sekwencjonowanie (mieszanie) wariantów produktów w ramach tego samego procesu.

Przykładem takiej produkcji jest wieloetapowy proces produkcji samochodów [1,2]. Każdy etap charakteryzuje się własnym zestawem ograniczeń i wymagań, które muszą zostać spełnione podczas ustalania kolejności produkowania samochodów. Oznacza to, że jeśli sekwencja samochodów nie jest zaplanowana we właściwy sposób, stanowiska robocze poszczególnych wydziałów mogą być nadmiernie obciążone. Efektem są częste przebrojenia urządzeń. Jednocześnie wymagana jest wysoka wydajność procesów, którą można utrzymać poprzez umieszczenie buforów zapewniających ciągłość produkcji.

System sterowania buforem znajdującym się na wydziale lakierni powinien umożliwiać rozwiązanie dwóch problemów skojarzonych bezpośrednio z funkcją bufora, tj.:

- zarządzania i kontroli ciągłego przepływu samochodów,
- automatycznego generowania – optymalnych pod względem zadanych kryteriów – sekwencji samochodów.

Optymalizacja wydajności linii lakierniczej odbywa się na drodze sekwencjonowania karoserii pod względem ich wariantów kolorystycznych. Sekwencje determinują liczbę przebrojeń dyszy lakierniczych – im więcej zmian kolorów, tym większe koszty produkcji. Powodem tego jest nie tylko zużycie rozpuszczalnika stosowanego do czyszczenia dyszy przy zmianie koloru, lecz także strata niewykorzystanej farby, która w trakcie przebrojenia pozostaje na ściankach dyszy [1].

Kolejnym wyzwaniem jest automatyzacja podejmowania decyzji wykonawczych. Niestety, sterowanie takimi buforami jest ciągle realizowane przez operatora i decyzje są podejmowane na podstawie jego doświadczenia.

W artykule przedstawiono nadążny algorytm sterowania (*follow-up sequencing algorithm* – FuSA) procesem sekwencjonowania karoserii (wariantów produkcji) w wielowersyjnym, powtarzalnym procesie lakierowania, oparty na idei nadążnego sterowania produkcją (NSP).

Rolą algorytmu FuSA jest generowanie takich sekwencji karoserii kierowanych do lakierowania, które zapewnią minimalizację liczby przebrojeń wynikających ze zmiany koloru oraz ich synchronizację z periodycznymi czyszczeniami dysz lakierniczych. W badaniach porównawczych zastosowano również autorskie algorytmy priorytetowe i teoriogrowy [7].

Nadążne sterowanie procesem sekwencjonowania karoserii

Algorytm nadążnego sekwencjonowania jest przeznaczony do bieżącej generacji planów wykonawczych – sekwencji karoserii. Decyzje są podejmowane dla horyzontu równego bądź krótszego od okresu czyszczenia periodycznych (*NPerClean*). Plany wykonawcze nadążają za planami operacyjnymi pochodzącymi z jednostki koordynacyjnej systemu. Decyzje algorytmu FuSA są podejmowane na podstawie stanu algorytmu, na który składają się ostatnio podjęte decyzje i stan zaległości w realizacji planów operacyjnych przez plany wykonawcze [10].

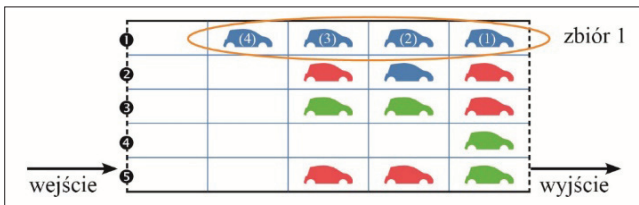
Algorytm FuSA stanowi integrację dwóch algorytmów. Pierwszy z nich, algorytm załadowczy, jest przeznaczony do wyznaczania linii transportowej, na którą ma zostać załadowana karoseria znajdująca się na przelotniku załadowczym, w celu utworzenia bloku kolorystycznego. Algorytm rozładowczy generuje bieżący plan wykonawczy rozumiany jako zestaw decyzji określający porządek rozładowywania bufora w horyzoncie

* Dr inż. Jolanta Krypek, jolanta.krypek@polsl.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2015-3453> – Politechnika Śląska, Gliwice, Polska
Dr inż. Sara Bysko, sara.bysko@polsl.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4065-8213> – Politechnika Śląska, Gliwice, Polska

czasowym równym bądź krótszym od $NPerClean$. W przypadku ogólnym decyzja ta dotyczy zbioru karoserii, w związku z czym konieczne jest również określenie, w jakiej kolejności poszczególne karoserie z tego zbioru powinny opuszczać bufor. Takie podejście zapewnia, że podejmowane decyzje są najlepsze z perspektywy aktualnej sytuacji na linii, ale jednocześnie nie jest wykluczona możliwość ich poprawy w horyzoncie planowania o długości $NPerClean$, co pokazano na rys. 1 i 2.

Przypadek 1

Zakładając, że okres czyszczeń periodycznych wynosi $NPerClean = 7$, na podstawie analizy stanu bufora (rys. 1) można stwierdzić, że nie da się wygenerować optymalnej (jednokolorowej) podsekwencji dla horyzontu planowania o długości $NPerClean$, dlatego wyszukiwane są zbiory karoserii z cechą koloru, tworzące jednolite bloki.



Rys. 1. Początkowy stan bufora dla przykładu wyznaczania bloku dla horyzontu planowania o długości krótszej od $NPerClean = 7$

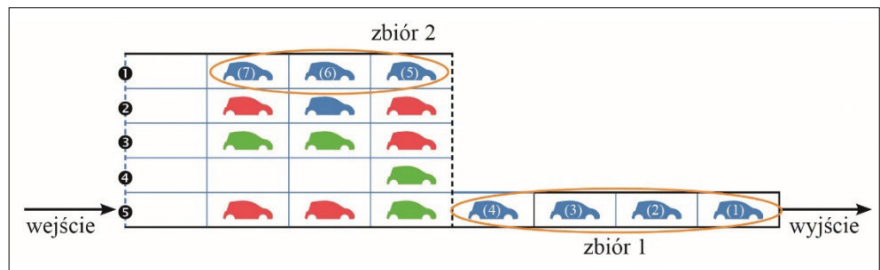
Do celu lakierniczej może zostać skierowany zbiór czterech karoserii w kolorze niebieskim z pierwszej linii transportowej (zbiór 1); poszczególne karoserie ze zbioru będą rozładowywane w kolejności zgodnej z regułą FIFO, tj.: (1), (2), (3), (4). W ten sposób otrzymuje się plan wykonawczy o długości horyzontu planowania 4. Kolejna decyzja wyjścia jest podejmowana w chwili, gdy bufor opuszcza ostatnia karoseria ze zbioru wyznaczonego w ramach poprzedniej decyzji. Gdy kolejne karoserie ze zbioru 1 opuszczają bufor, na jego wejściu pojawiają się karoserie, dla których muszą być podjęte decyzje wejścia. Jeżeli na wejściu pojawiają się karoserie niebieskie, to są one kierowane na linię transportową, na której bezpośrednio przed nimi znajdowały się karoserie w tym kolorze. Jeżeli na wejściu pojawiają się karoserie w innym kolorze, to są one kierowane na linię zgodnie z przyjętymi kryteriami. Na podstawie analizy aktualnego stanu bufora algorytm podejmuje decyzję, by do wyjścia skierować zbiór trzech karoserii w kolorze niebieskim z pierwszej linii transportowej (zbiór 2).

Sytuacja przedstawiona na rys. 2 potwierdza, że podjęcie pierwszej decyzji, dla której długość planu wykonawczego jest mniejsza od $NPerClean$ (cztery karoserie z siedmiu wymaganych – zbiór 1), nie wykluczyło możliwości generacji podsekwencji optymalnej w horyzoncie planowania o długości $NPerClean$.

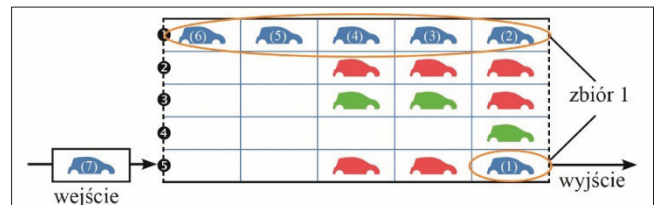
Przypadek 2

Istotną cechą algorytmu FuSA jest występowanie sprzężenia informacyjnego pomiędzy algorytmem załadowniczym i rozładowniczym (rys. 3 i 4).

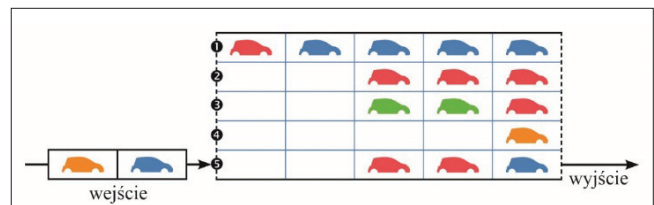
Podejmowane decyzje mają na celu optymalizację zarówno wskaźników określających jakość sekwencji wyjściowej, jak i stanu bufora. Algorytm przeprowadza analizę skutków, jakie decyzja wejścia karoserii do bufora będzie miała dla sytuacji na jego wyjściu, i – analogicznie



Rys. 2. Stan bufora dla przykładu wyznaczenia dopełnienia optymalnej podsekwencji $NPerClean$ -elementowej



Rys. 3. Początkowy stan bufora dla przykładu wykorzystania sprzężenia informacyjnego algorytmu FuSA



Rys. 4. Stan bufora dla przypadku podejmowania decyzji z uwzględnieniem koloru karoserii znajdującej się na wejściu bufora

– decyzje wyjścia bufora podejmowane są z uwzględnieniem sytuacji wejściowej. Jako że na podstawie informacji o stanie bufora nie można wyznaczyć podsekwencji optymalnej w horyzoncie planowania o długości $NPerClean = 7$, algorytm wyjściowy skieruje do celu lakierniczej zbiór sześciu karoserii w kolorze niebieskim, znajdujących się na pierwszej i piątej linii transportowej. Informacja o podjętej decyzji zostanie przekazana do algorytmu wejściowego. Jednocześnie algorytm wejściowy zakomunikuje, że na wejściu znajduje się karoseria niebieska, która może zostać wykorzystana do utworzenia optymalnej podsekwencji $NPerClean$ -elementowej, ale wówczas konieczne jest zwolnienie miejsca na pierwszej linii transportowej. W pierwszej kolejności do celu lakierniczej zostanie skierowana karoseria z pierwszej linii transportowej i tę informację otrzymuje algorytm wejściowy.

Decyzja algorytmu FuSA dotycząca wejścia bufora jest podejmowana z uwzględnieniem informacji zarówno o karoserii znajdującej się na przenośniku załadowniczym, jak i karoseriach znajdujących się na pozycjach bezpośrednio poprzedzających (rys. 4). Przykładowo, algorytm nie skieruje karoserii w kolorze niebieskim na czwartą linię transportową, ponieważ taka decyzja zablokowałaby możliwość umieszczenia tam karoserii w kolorze pomarańczowym i wydłużenia bloku w tym kolorze

Przypadek 3

Ważną cechą algorytmu FuSA jest to, że charakteryzuje go własność nadążania za zmieniającym się planem produkcji. Plan produkcyjny jest tworzony dla ograniczonego horyzontu czasowego (zwykle 3–4 godzin) i nie jest korygowany na bieżąco ze znanym okresem. Po każdej korekcie planu zmieniają się liczebności karoserii w określonym kolorze. Priorytety kolorów aktualizowane są po każdej decyzji wyjścia karoserii z bufora. Priorytet koloru $PrioFuSA(cX)$ wyznaczany jest według wzoru:

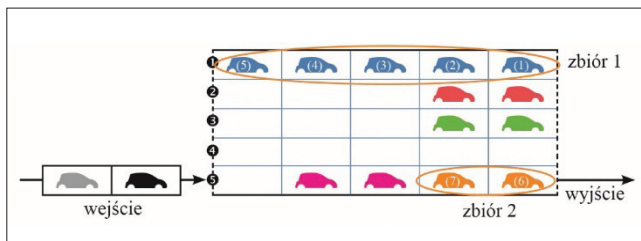
$$Prio(cX) = \frac{NPP(cX) - NP(cX) - NB(cX)}{NPP}$$

gdzie:

- NPP – liczba wszystkich karoserii określona przez plan produkcyjny (*Number of cars in the Production Plan*),
- $NPP(cX)$ – liczba wszystkich karoserii w kolorze cX określona przez plan produkcyjny (*Number of cars in cX in the Production Plan*),
- $NP(cX)$ – liczba wyprodukowanych karoserii w kolorze cX (*Number of Produced cars in cX*),
- $NB(cX)$ – liczba karoserii w kolorze cX znajdujących się w buforze (*Number of cars in cX in the Buffer*).

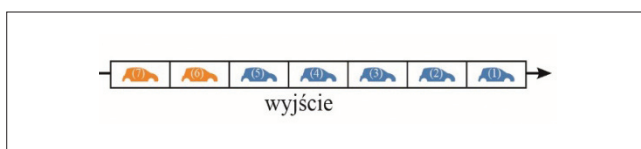
Przykład: na pewnym etapie produkcji na podstawie planu produkcyjnego wyznaczono następujące priorytety kolorów (*PrioFuSA*): czerwony = 7/10, niebieski = 0, zielony = 1/10, pomarańczowy = 0, czarny = 5/10, szary = 1, różowy = 9/10.

Wartość parametru $NPerClean$ wynosi 7.



Rys. 5. Początkowy stan bufora dla przypadku podejmowania decyzji z uwzględnieniem priorytetów kolorów

Na podstawie analizy priorytetów można stwierdzić, że na wejściu bufora nie pojawi się już żadna karoseria w kolorze niebieskim i pomarańczowym. W związku z tym zasadne jest utworzenie z karoserii w tych kolorach (zbiór 1 oraz zbiór 2) podsekwencji $NPerClean$ -elementowej i skierowanie jej do celi lakierniczej, co oznacza zwolnienie pierwszej linii transportowej. Jednocześnie algorytm będzie musiał zdecydować, którą z karoserii znajdujących się na wejściu bufora (czarną czy szarą) skierować na wolną linię. Porównując priorytety tych kolorów: $Prio$ (szary) > $Prio$ (czarny), w pierwszej kolejności wyznaczona zostanie linia dla karoserii w kolorze o wyższym priorytecie, czyli szarym, i będzie to wolna linia (linia 4). W takiej sytuacji karoseria w kolorze czarnym może zostać skierowana na linię drugą, trzecią lub piątą. Kolor zielony ma najniższy priorytet, w związku z tym karoseria w kolorze czarnym zostanie skierowana na linię trzecią.



Rys. 6. Sekwencja wyjściowa po uwzględnienia priorytetów kolorów

Algorytm *FuSA* charakteryzuje się również tym, że podczas podejmowania decyzji brane są pod uwagę nie tylko informacje z bieżącej chwili, lecz także stan bufora i sytuacja na jego wyjściu w przyszłości, tzn. po zrealizowaniu planu wykonawczego. Innymi słowy, algorytm wnioskuje o przyszłym stanie bufora i sytuacji na wyjściu, by dostosować swoje działanie z wyprzedzeniem, zanim nastąpią rzeczywiste zmiany. Wskazuje to na predykcyjny charakter algorytmu.

Podsumowanie

Sekwencjonowanie samochodów przeznaczonych do malowania jest uzasadnione względami ekonomicznymi. Badania dotyczyły sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni, z uwzględnieniem występowania na linii produkcyjnej bufora o skończonej pojemności i określonej strukturze. Zasadniczym problemem związanym z opracowaniem metody sekwencjonowania było zapewnienie jej działania w oparciu o ograniczone informacje bieżące oraz krótki horyzont czasowy, dla którego znany był plan produkcyjny.

Proces podejmowania decyzji związanych z wyznaczeniem linii transportowej dla karoserii wjeżdżającej do bufora oraz wyborem karoserii transportowanej do stacji lakierniczej musi być zintegrowany, a decyzje powinny być podejmowane w czasie rzeczywistym. Ponadto konieczne było uwzględnienie w kryteriach optymalizacji zarówno przebrojeń dyszy lakierniczych, wynikających ze zmian kolorów farby, jak i okresowych czyszczeń dyszy, zapewniających dobrą jakość lakierowania.

Przegląd literatury wykazał istnienie luki badawczej w zakresie efektywnego sekwencjonowania karoserii w procesie lakierowania. W efekcie opracowano nową koncepcję rozwiązania tego problemu – *Car Sequencing Problem 4.0* – która uwzględnia rzeczywistą strukturę lakierni i stosowanych tam buforów, stworzono narzędzie do modelowania bufora, opracowano automatyczny system sterowania.

Praca została sfinansowana ze środków przewidzianych na 02/010/BK-18/0102 oraz 02/010/BKM-18/0136, t.1.

LITERATURA

- [1] Krystek J., Alszer S. „Współczesne problemy sekwencjonowania samochodów na wydziale lakierni”. *Mechanik*, 7 (2017): 527–529.
- [2] Krystek J., Alszer S. „Nowoczesne aspekty problemu sekwencjonowania samochodów na wydziale montażu”. *Przegląd mechaniczny*. 9 (2017): 23–25.
- [3] Boysena N., Emde S., Hoeck M., Kauderer M. “A survey on part logistics in the automotive industry”. *European Journal of Operational Research*. 242 (2015).
- [4] Parello Bruce D., Kabat Waldo C., Wos Larry. 1986. “Job-shop scheduling using automated reasoning: a case study of the car sequencing problem”. *Journal of Automated Reasoning*. 2, 1 (1986): 1–42.
- [5] Perron L., Shaw P. “Combining forces to solve the car sequencing problem”. J.C. Regin, M. Rueher. *Proceedings of CP-AI-OR'2004*. Berlin: Springer-Verlag. 2004: 225–239. DOI: 10.1007/978-3-540-24664-0_16.
- [6] 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): 912–927.
- [7] Bysko S. “Sekwencjonowanie w produkcji wielowersyjnej dla skończonej pojemności bufora”. Gliwice. Rozprawa doktorska (niepublikowana). 2019.
- [8] Bysko S., Krystek J. “Automotive Paint Shop 4.0”. *Computers & Industrial Engineering*. DOI: 10.1016/j.cie.2018.11.056. (Publikacja w druku).
- [9] Krystek J. „Nadążne sterowanie produkcją jako metoda sekwencjonowania wariantów produktów”. M. Karkula, J. Matuszek, B. Skołod. *Wokół inżynierii produkcji*. Wydawnictwa AGH, Kraków. (2017): 121–128.
- [10] Bysko Sara, Krystek Jolanta. 2020. “Follow-Up Sequencing Algorithm for Car Sequencing Problem 4.0”. Szewczyk R., Zieliński C., Kaliczyńska M. (eds.) *Automation 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer. 920 (2020). ■