

Jolanta KRYSTEK, Sara BYSKO, Łukasz Domin
Politechnika Śląska

SEKWENCJONOWANIE KAROSERII W CZASIE RZECZYWISTYM W LAKIERNI – STUDIUM PRZYPADKU

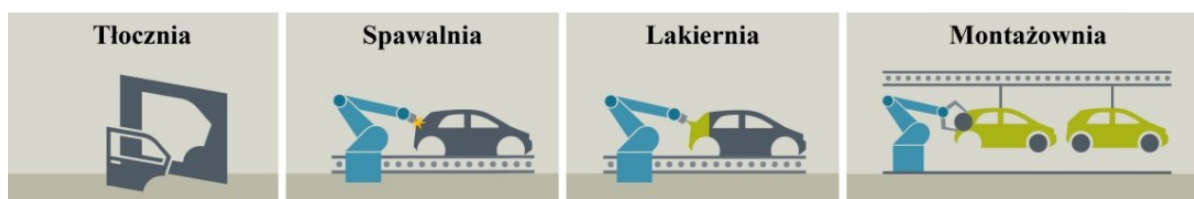
Streszczenie. Problem skutecznego sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni wynika ze specyfiki samego procesu produkcyjnego oraz ze struktury linii produkcyjnej. W artykule opisano nowe podejście do tego zagadnienia uwzględniające rzeczywistą strukturę wydziału lakierni z występującymi tam buforami. Sekwencjonowanie karoserii przeznaczonych do lakierowania jest uzasadnione względami ekonomicznymi. Głównym celem badań jest minimalizacja kosztownych przebrojeń wynikających ze zmiany kolorów. Do badań wykorzystano autorskie aplikacje, w których zostały zaimplementowane i przetestowane autorskie algorytmy sekwencjonowania karoserii.

SEQUENCING OF BODY IN REAL TIME IN THE PAINT SHOP - CASE STUDY

Summary. The problem of effective car body sequencing in the paint shop results from the specifics of a production process itself and from the structure of a production line. The paper presents a new approach to this issue, taking into account the actual structure of the paint shop with buffers. Sequencing of body car in the paint shop is justified by economic reasons. The main aim of the research is to reduce expensive changeovers resulting from the change of colors. Authors' applications in which were implemented and tested proprietary car body sequencing algorithms were used.

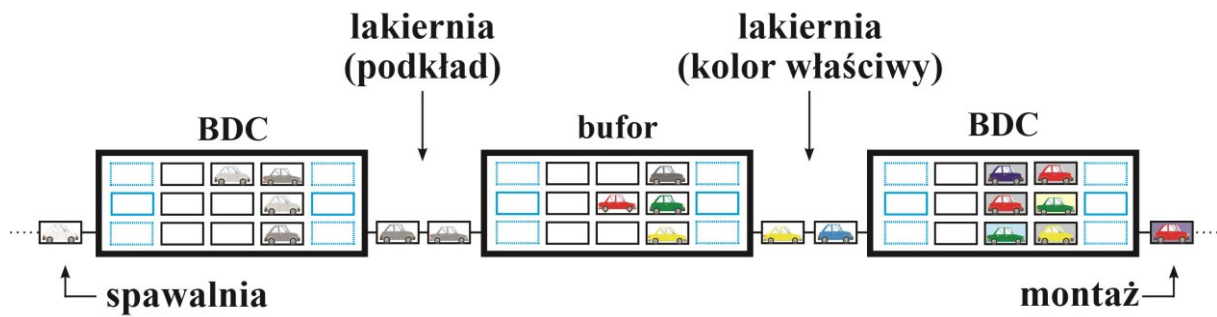
1. Wprowadzenie

Efektywnie działająca fabryka samochodów osobowych produkuje około 1000 pojazdów na dwie zmiany robocze dziennie. Każdy samochód produkowany jest w kilku następujących po sobie etapach – produkcja rozpoczyna się na wydziale tłoczni, a kończy na wydziale montażu (rys. 1).



Rys. 1. Etapy produkcji samochodów. Źródło: opracowanie własne

System transportowy wykorzystywany do przekazywania nadwozi pomiędzy poszczególnymi etapami produkcji obejmuje nie tylko system przenośników, ale także coraz częściej stosowane bufory. W tych buforach nadwozia pojazdów mogą być czasowo przechowywane, ponieważ niektóre etapy nie mogą zostać zatrzymane, podczas gdy inne wymagają okresowych przestojów. Bufory międzywydziałowe ulokowane są pomiędzy spawalnią, lakiernią i montażem i zapewniają ciągłość produkcji. Przed wysłaniem karoserii do wydziału lakierni, pojazdy trafiają początkowo do bufora karoserii, tzw. BDC (ang. *Body Distribution Center*). Bufor ten daje możliwość dostosowania sekwencji karoserii opuszczających spawalnię, do wymagań wydziału lakierni. Między wydziałem lakierni a wydziałem montażu znajduje się kolejny bufor BDC. Polakierowane karoserie mogą więc zostać skierowane bezpośrednio na linię montażu końcowego bądź do bufora w przypadku, gdy brakuje którejś z części wyposażenia. Dodatkowo, w ramach wydziału lakierni, stosowany jest często bufor poprzedzający proces lakierowania karoserii farbą bazową, wykorzystywany do bieżącego sekwencjonowania karoserii (rys. 2).



Rys. 2. Struktura lakierni. Źródło: opracowanie własne

Ta modyfikacja struktury wydziału lakierni pozwala na zwiększenie elastyczności procesu lakierniczego – sekwencja karoserii może zostać zmieniona w trakcie trwania produkcji. Istotne jest więc pytanie: jak za tego pomocą bufora, z sekwencji optymalnej dla wydziału spawalni, utworzyć sekwencję optymalną z punktu widzenia kryteriów optymalizacji procesu lakierowania?

Wielu producentów samochodów wykorzystuje bufory różniące się strukturą i liczbą przechowywanych karoserii, szukając najlepszego rozwiązania pod względem skuteczności sekwencjonowania [1]. Karoserie opuszczające poprzedni etap produkcji – spawalnię są dostarczane do lakierni w dowolnej kolejności kolorystycznej. Problem sortowania kolorów w lakierni fabryki samochodów może dotyczyć zarówno etapu nakładania podkładu jak i nakładania farby bazowej ale gama kolorystyczna farb podkładowych jest niewielka i tutaj nie stosuje się rzeczywistego sekwencjonowania. Sekwencjonowanie polega na takim ułożeniu karoserii kierowanych do drugiego etapu malowania – nakładania farby bazowej, by liczba zmian koloru była minimalna. Kolor samochodu jest przyporządkowywany do karoserii po wejściu do wydziału lakierni. Dlatego w wielu lakierniach, znaczące możliwości optymalizacyjne leżą w odpowiednim układaniu partii przed wejściem do komory lakierniczej, tj. w tworzeniu bloków samochodów, które muszą być polakierowane w tym samym kolorze, poprzez tasowanie nadwozi samochodowych za pomocą systemu buforowego. Jeśli nie ma takiego bufora, to kolejność wprowadzania karoserii do lakierni musi być zgodna z planem produkcji wydziału spawalni i nie ma w tym przypadku żadnej możliwości

tasowania karoserii. Przypadkowa kolejność kolorystyczna wpływa znacząco na zwiększenie liczby przebrojeń kabiny lakierniczej.

Kolor, na jaki ma zostać polakierowana karoseria, jest określony w nadrzędnym harmonogramie produkcji. Jeżeli kolejne pojazdy przekazywane do lakierowania nie mają przypisanego tego samego koloru, wówczas farba w pistolecie musi zostać wypłukana, a głowica pistoletu lakierniczego wyczyszczona rozpuszczalnikiem. Proces ten nie tylko marnuje czas i pieniądze, ale jest także obciążeniem dla środowiska. Dlatego tak istotne jest lakierowanie karoserii jak najdłuższymi partiami charakteryzującymi się jednolitą opcją kolorystyczną. W związku z powyższym, biorąc pod uwagę cechę pojazdu jaką jest kolor, należy tak ustalać kolejne sekwencje karoserii, by liczba przebrojeń dysz lakierniczych była jak najmniejsza. W produkcji samochodów najczęściej uwzględniane są jedynie przebrojenia wynikające ze zmiany koloru i taki przypadek zostanie przedstawiony w rozdziale 3. W rozdziale 4 opisano bardziej zaawansowane podejście w którym należy uwzględnić dodatkowe wymaganie technologiczne: czyszczenie periodyczne systemu lakierniczego. Uwzględnienie czyszczeń periodycznych ma na celu wskazanie na konieczność utrzymywania dobrej jakości farb [7]. Jeżeli dysza nie będzie czyszczona systematycznie, pozostająca farba ulegnie aglutynacji (zlepianiu cząsteczek), co skutkuje słabą jakością lakierowanej karoserii

W artykule zostaną przedstawione dwa podejścia do problemu sekwencjonowania stosowane w przemyśle automotive przez różnych producentów samochodów. Różnią się one strukturą buforów i założeniami dla procesu lakierowania oraz wynikającymi z tych różnic konsekwencjami dla problemu sekwencjonowania karoserii. Ze względu na ochronę danych nie są podane dane producentów oraz szczegóły implementacji algorytmów.

2. Ogólny opis problemu

Problem sekwencjonowania stał się jednym z głównych aspektów optymalizacji produkcji w branży samochodowej, a w literaturze jest opisany jako *Car Sequencing Problem*, *CSP*) [1]. Można wyróżnić kilka obszarów, w których stosowano sekwencjonowanie, oceniane odpowiednimi dla rozważanego procesu wskaźnikami:

- sekwencjonowanie samochodów na wydziale montażu końcowego [9] – minimalizacja liczby naruszeń ograniczenia przepustowości linii montażu;
- sekwencjonowanie samochodów, jednocześnie dla wydziałów lakierni i montażu końcowego (ROADEF Challenge 2005 [10]) – minimalizacja liczby naruszeń ograniczenia przepustowości linii montażu i liczby zmian kolorów;
- sekwencjonowanie karoserii w lakierni – minimalizacja liczby zmian kolorów oraz zużycia lakieru i czynnika stosowanego do czyszczenia dyszy lakierniczych [2];
- sekwencjonowanie i harmonogramowanie samochodów na wydziale montażu końcowego – minimalizacja liczby naruszeń ograniczenia przepustowości linii montażu oraz równomierne dla wszystkich operatorów obciążenie stanowisk operacjami montażowymi (balansowanie linii montażowej) [5, 8].

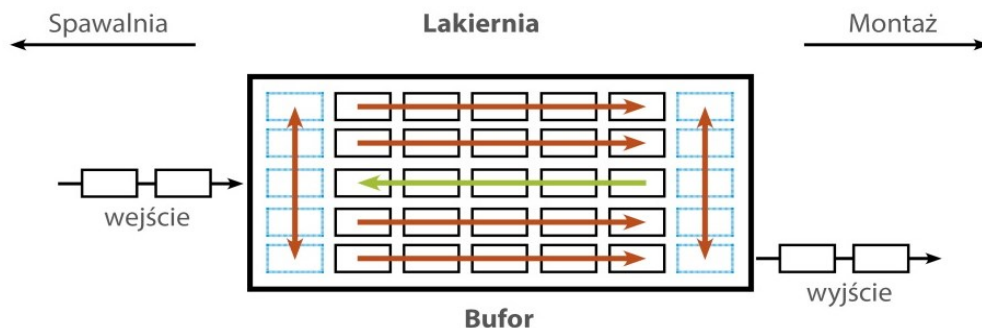
Może się wydawać, że problem sekwencjonowania karoserii w fabrykach samochodów został już rozwiązany. Niestety, w ramach różnych prac badawczych wprowadzano wiele założeń upraszczających strukturę linii produkcyjnej, a czas otrzymania rozwiązań przy wykorzystaniu proponowanych algorytmów był na tyle

długi, że podejścia te nie nadawały się do wdrożenia w przemyśle. Problem ten jest determinowany przez strukturę magazynu, dlatego różni się od klasycznego problemu sekwencjonowania samochodów (tzw. *Car Sequencing Problem, CSP*)

Obecnie, w większości fabryk w procesie sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni, decyzje podejmowane są przez operatora, a ich jakość zależy od jego doświadczenia. Struktura bufora (a zwłaszcza brak możliwości zawracania karoserii) ma duży wpływ na konsekwencje podejmowania decyzji. Decyzje są podejmowane każdorazowo na podstawie bieżących informacji o karoseriach znajdujących się na wejściu bufora, aktualizowanego na bieżąco planu produkcji z horyzontem czasowym na 4 godziny, bieżącego stanu bufora oraz dostępności zasobów. Autorzy artykułu, w swoich pracach, analizowali bufory o odmiennych strukturach oraz podjęli próbę stworzenia automatycznego systemu sterowania wydziałem lakierni.

3. Fabryka A – studium przypadku

Bufor o konstrukcji przedstawionej na rysunku 3, wykorzystywany jest w pewnej fabryce samochodów, działającej na terenie Polski (na potrzeby tej pracy nazywanej Fabryką A). Analizowany bufor jest buforem z linią zawracającą. Posiada on łącznie 5 linii, a na każdej z nich znajduje się 5 miejsc na karoserie. Opcjonalnie, linia nr 1 traktowana jest w niektórych algorytmach jako linia przesyłowa i wówczas jej pojemność wynosi 1. Linia nr 3 jest linią zawracającą i pozwala na przemieszczenie karoserii z ostatniego miejsca w dowolnej linii na pierwsze wolne w dowolnej linii. Na linii nr 3 można również umieścić do 5 karoserii.



Rys. 3. Struktura bufora z linią „zawracającą”. Źródło: opracowanie własne

Sekwencjonowanie karoserii odbywa się w tym przypadku za pomocą algorytmów przedstawionych w tabeli 1 [3].

Tabela 1

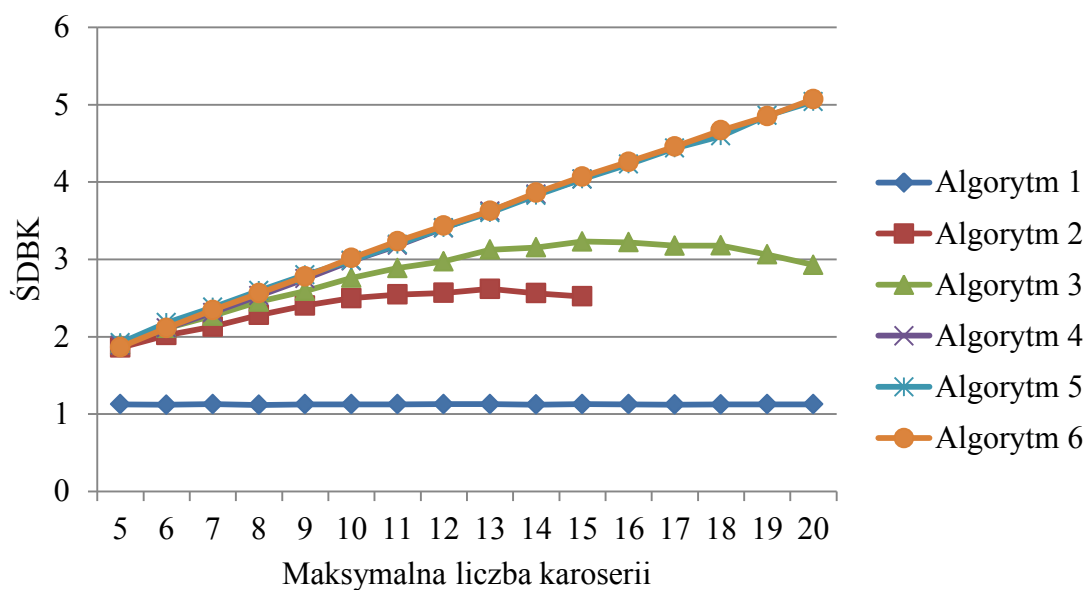
Kombinacje algorytmów wejścia/wyjścia

Lp.	Algorytm wprowadzania karoserii	Algorytm wyprowadzania karoserii
Algorytm 1	losowy	losowy
Algorytm 2	z linią przesyłową	sprawdzający długość bloku koloru
Algorytm 3	bez linii przesyłowej	sprawdzający długość bloku koloru
Algorytm 4	z linią przesyłową	z możliwością tasowania
Algorytm 5	bez linii przesyłowej	z możliwością tasowania
Algorytm 6	losowy	z możliwością tasowania

Przetestowano 6 kombinacji algorytmów wprowadzania i wyprowadzania karoserii. Dla każdego z nich sprawdzono również ich działanie w zależności od maksymalnej możliwej liczby karoserii w buforze (5÷15 dla algorytmów wykorzystujących linię przesyłową oraz 5÷20 dla niewykorzystujących linii przesyłowej). Każdy z algorytmów korzystał z zestawu 9 możliwych kolorów karoserii. Testy zostały zakończone w chwili osiągnięcia limitu 999 sekwencji kolorów.

Do oceny jakości zaproponowanych algorytmów użyto przede wszystkim wskaźnika Średniej Długości Bloku Koloru (ŚDBK), który określa średnią długość sekwencji karoserii lakierowanych na ten sam kolor oraz dodatkowo Średniej Długości Czasu Przebywania Karoserii w Buforze (ŚDCPKwB), która mówi o tym, jak długo karoseria musi czekać w buforze, zanim zostanie polakierowana [3]. 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:

$$\text{ŚDBK} = \frac{\text{liczba_karoserii}}{\text{liczba_zmian_koloru} + 1} \quad 1$$



Rys. 4. Wykres zależności ŚDBK od maksymalnej liczby karoserii dla poszczególnych algorytmów. Źródło: [3]

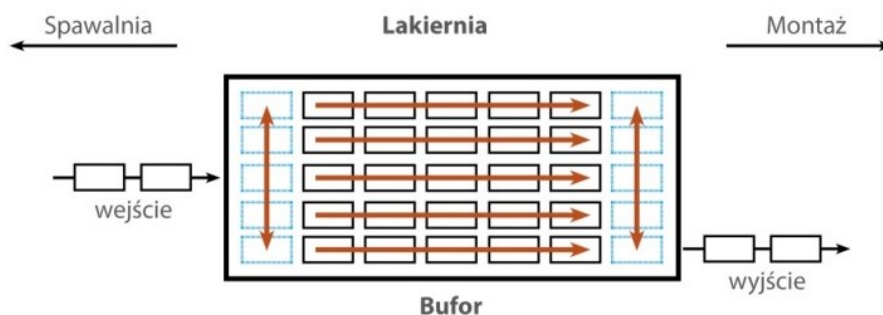
Algorytm 1 daje bardzo niską ŚDBK, na poziomie około 1,13, bez względu na parametr maksymalnej liczby karoserii w buforze. Oznacza to, że zazwyczaj kolejne wjeżdżające do kabiny karoserie są różnego koloru, więc nie znajdzie on zastosowania w rzeczywistym procesie.

Z porównania algorytmów 2 i 3 wynika, że korzystniej jest nie używać linii 1 jako przesyłowej. Dla algorytmu 3 najlepszy wynik osiągnięty został dla maksymalnej liczby karoserii równej 15 i wyniósł 3,23, a dla algorytmu 2 dla maksymalnej liczby karoserii równej 13 i wyniósł 2,62. Jest to duża różnica, biorąc pod uwagę podobieństwo obu algorytmów.

Dla algorytmów 4, 5 oraz 6 można zauważyć liniową zależność pomiędzy ŚDBK a maksymalną liczbą karoserii. Z tego też powodu również tu nie opłaca się stosować linii przesyłowej, gdyż ogranicza ona maksymalną liczbę karoserii do 15. Algorytmy 5 oraz 6 dają bardzo podobne wyniki dla każdej z wartości maksymalnej liczby karoserii, więc dla algorytmu wyprowadzania karoserii z możliwością tasowania bez linii przesyłowej nie ma znaczenia wykorzystany algorytm wprowadzania karoserii. Porównując algorytm 3 oraz 5 dużo lepsze wyniki daje algorytm 5, zarówno pod względem ŚDBK, jak i ŚDCPKwB. Dla tak postawionego problemu oraz warunków badawczych jest więc on najlepszy.

4. Fabryka B – studium przypadku

Autorki niniejszego artykułu rozpatrują rzeczywisty problem sterowania procesem sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni z uwzględnieniem bufora o strukturze „równoległej”, pokazanej na rysunku 4. Jest to najtrudniejsza struktura ze względu na konsekwencje podejmowania decyzji. Ogólny algorytm postępowania polega na kierowaniu karoserii znajdującej się na wejściu bufora na odpowiednią linię przesyłową w buforze i wypuszczeniu z bufora karoserii we właściwej kolejności tak, by liczba zmian kolorów odbywająca się pomiędzy planowymi czyszczeniami periodycznymi dyszy lakierniczej była jak najmniejsza. Harmonogram czyszczeń periodycznych jest określony w nadrzędnym harmonogramie produkcji. Dodatkowo, dąży się do synchronizacji przebrożeń wynikających ze zmiany koloru z tymi czyszczeniami okresowymi.

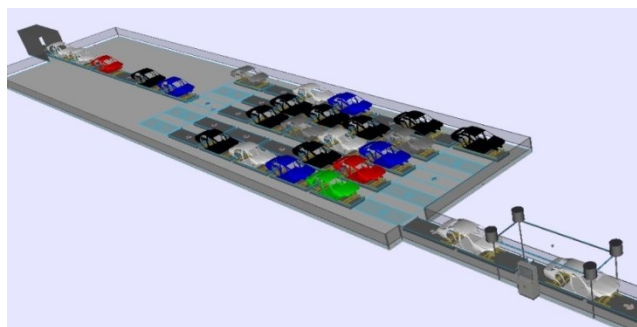


Rys. 4. Bufor o strukturze „równoległej”. Źródło: opracowanie własne

Karoserie transportowane z wydziału spawalni na wydział lakierni tworzą ciąg karoserii w czasie rzeczywistym. Kolor karoserii nie jest znany, dopóki karoseria nie dotrze do wejścia bufora, gdzie następuje odczyt kodu QR. Oznacza to, że kolejność wejściowa karoserii wprowadzanych do bufora nie jest znana *a priori*. Dostępny jest wyłącznie plan produkcyjny ustalany dla pewnego horyzontu czasowego. Zasadniczo, każda procedura sekwencjonowania musi więc działać w oparciu o ograniczone informacje, to znaczy w danym momencie znane są tylko następujące dane:

- 1) Kolor karoserii znajdującej się na przenośniku załadowniczym.
- 2) Kolor karoserii znajdującej się na wejściu do bufora.
- 3) Kolory i pozycje wszystkich karoserii znajdujących się w buforze.
- 4) Kolory wszystkich karoserii, które opuściły bufor.

W związku z tym, rozważany problem sekwencjonowania można zaliczyć do problemu *online* [4]. Polega on na podejmowaniu w czasie rzeczywistym dwóch decyzji. W momencie pojawienia się karoserii na wejściu bufora należy określić linię transportową, na którą karoseria ma zostać skierowana. Z kolei po stronie rozładowniczej bufora należy zdecydować, którą z karoserii skierować do stacji lakierniczej. Podjęcie decyzji musi się zakończyć w ciągu jednego cyklu operacji lakierowania, co ponownie potwierdza, że wymagania stawiane przez przemysł samochodowy muszą zostać spełnione w czasie rzeczywistym. Jeden cykl to czas potrzebny na danej stacji lakierniczej do wykonania operacji lakierowania jednej karoserii. W przemyśle samochodowym czas cyklu waha się zwykle od 30s do 3÷4 minut [11].



Rys. 5. Model bufora bez zawracania karoserii. Źródło: opracowanie własne

DEFINICJA. Problem *Car Sequencing Problem 4.0* definiuje się jako krotkę $(V, C, NoRowBuff, NoColBuff, TPerClean)$, gdzie:

- $V = \{v_1, \dots, v_N\}$ – zbiór karoserii, które mają być wyprodukowane (plan produkcji);
- $C = \{c_1, \dots, c_D\}$ – zbiór dostępnych kolorów oraz funkcja $c: V \rightarrow C$, która każdej karoserii v_i przypisuje kolor c_i ;
- *NoRowBuff*, *NoColBuff* – rozmiar bufora określony przez liczbę wierszy oraz liczbę kolumn;
- *TPerClean* – okres czyszczenia periodycznego.

Rozwiązaniem problemu sekwencjonowania samochodów CSP 4.0 jest kolejność, w jakiej karoserie dostarczane są do stacji lakierniczej. Sekwencja generowana jest w czasie rzeczywistym, dlatego rozwiązanie znane jest dopiero po zrealizowaniu bieżącego planu produkcji. Oznacza to dużą trudność w przewidywaniu konsekwencji podejmowanych na bieżąco decyzji.

Projekt nazwany *Car Sequencing Problem 4.0* jest realizowany dla jednego z zagranicznych producentów samochodów we współpracy z firmą ProPoint Sp. z o.o. Sp. k. Do testowania opracowywanych algorytmów sekwencjonowania wykorzystywane są dane rzeczywiste dostarczone przez zleceniodawcę. Za pomocą narzędzia do symulacji, stworzono model funkcyjny bufora, a następnie przy użyciu innowacyjnej metody wirtualnego rozruchu testowano algorytmy sekwencjonowania. Podczas badań prowadzono także monitoring przepływu karoserii przez bufor, który miał na celu wykrycie szczególnych sytuacji zapełnienia bufora uznanych za niedopuszczalne w warunkach rzeczywistych. Ze względu na ochronę niejawnych danych przemysłowych w artykule nie podaje się miejsca realizacji projektu oraz szczegółowych informacji dotyczących implementacji algorytmów.

4.1. Proponowane algorytmy priorytetowe

Klasyczny algorytm priorytetowy jest jednoprzebiegowy, co oznacza, że tworzy jedno rozwiązanie na podstawie danej reguły priorytetowej [6]. Podejście bazujące na zestawie reguł priorytetowych jest najczęściej stosowaną metodą podejmowania decyzji w rzeczywistych fabrykach. W odniesieniu do problemu sekwencjonowania, istota omawianego podejścia polega na nadawaniu liniom transportowym priorytetów określonych na podstawie zdefiniowanych reguł. Do załadunku i rozładunku karoserii wyznaczane są linie transportowe o najwyższym priorytecie. Zaproponowane zostały dwie reguły załadunku, pięć reguł rozładunku oraz dwie reguły opcjonalne.

Proces załadunku jest obsługiwany przez następujące algorytmy:

- najmniejsza zajętość linii (ang. *Smallest Line Occupancy*, SLOcc) – kolejność ładowania według rosnącej zajętości linii, czyli wybierana jest ta linia, na której znajduje się najmniej karoserii;
- najniższy priorytet koloru (ang. *Lowest Color Priority*, LCPrio) – kolejność ładowania według rosnącego priorytetu koloru, czyli wybierana jest ta linia, która zakończona jest karoserią w kolorze o najniższym priorytecie. Priorytet koloru zdefiniowany jest na podstawie planu produkcyjnego i pozostaje stały do momentu wyznaczenia nowego planu.

Dla procesu rozładunku zaproponowano następujące algorytmy:

- najmniejsza liczebność koloru w buforze (ang. *Smallest Number of Color in Buffer*, SNCB) – kolejność rozładowywania według rosnącej liczebności koloru w buforze, czyli wybierana jest ta linia, która w kolumnie rozładowczej zawiera karoserię w kolorze o najmniejszej liczebności w buforze;
- największa liczebność koloru w buforze (ang. *Largest Number of Color in Buffer*, LNCB) – kolejność rozładowywania według malejącej liczebności koloru w buforze, czyli wybierana jest ta linia, która w kolumnie rozładowczej zawiera karoserię w kolorze o najmniejszej liczebności w buforze;
- najwyższy priorytet koloru (ang. *Highest Color Priority*, HCPrio) – kolejność rozładowywania według malejącego priorytetu koloru, czyli wybierana jest ta linia, która w kolumnie rozładowczej zawiera karoserię w kolorze o najwyższym priorytecie;

Reguły opcjonalne:

- reguła wymuszenia zmiany koloru po czyszczeniu periodycznym (*Forced Color Change after Periodic Cleaning*, FCCaPC) – kolejność rozładowywania według zaproponowanych reguł za wyjątkiem momentu wystąpienia czyszczenia periodycznego. Kolory karoserii bezpośrednio przed i po wystąpieniu czyszczenia periodycznego muszą być inne, o ile istnieje taka możliwość.
- reguła pamięci koloru (*Color Memory*, CM) – reguła ta może zostać zastosowana zarówno po stronie załadowczej, jak i rozładowczej bufora. Zastosowanie tej reguły po stronie załadowczej bufora oznacza, że w pierwszej kolejności karoseria w kolorze *cIn* znajdująca się na przenośniku załadowczym kierowana jest na linię transportową zakończoną blokiem w tym samym kolorze (*cIn*). Kolejno stosowana jest jedna z zaproponowanych reguł załadowczych. Z kolei po stronie

rozładowniczej bufora reguła CM warunkuje, że w pierwszej kolejności z kolumny rozładowniczej usuwana jest karoseria w kolorze *cOut*, czyli w kolorze karoserii aktualnie lakierowanej, następnie stosowana jest jeden z zaproponowanych algorytmów rozładowniczych.

4.2. Badania symulacyjne

Badania zostały przeprowadzone dla bufora o strukturze równoległej (5x5). Sekwencjonowaniu poddano 100 karoserii pojawiających się na wejściu do bufora w 5 różnych sekwencjach (Seq_01÷Seq_05), 6 różnych kolorów, okres czyszczenia periodycznego wynosił 7. Wyniki badań określające liczbę przebrojeń uzyskaną dla różnych kombinacji algorytmów wejścia/wyjścia przedstawiono w tabeli 1.

Zastosowana nomenklatura:

- Conf_A_X – kombinacja reguły wejściowej A i wyjściowej X
X – reguły wyjściowe z tabelki (dla zdefiniowanej reguły wejściowej były testowane różne reguły wyjściowe)
- 0 – reguła CM nie jest stosowana
- CM – reguła CM jest stosowana
- najlepsze i najgorsze wyniki, dla poszczególnych danych wejściowych, zostały wyróżnione (szary – najlepsze, podkreślenie – najgorsze).

Tabela 2

Liczba przebrojeń dla różnych kombinacji algorytmów wejścia/wyjścia

Conf_0SLOcc_0X

No.	LNCB	SNCB	SNCB+FCCaPC	HCPrio	LNCB+FCCaPC
Seq_01	64	61	64	63	<u>68</u>
Seq_02	<u>71</u>	66	62	64	70
Seq_03	<u>69</u>	58	62	58	66
Seq_04	66	63	55	64	<u>69</u>
Seq_05	60	62	62	<u>65</u>	<u>65</u>

Conf_0LCPrio_0X

No.	LNCB	SNCB	SNCB+FCCaPC	HCPrio	LNCB+FCCaPC
Seq_01	<u>72</u>	58	58	61	62
Seq_02	<u>73</u>	66	65	68	69
Seq_03	<u>70</u>	55	58	63	59
Seq_04	<u>70</u>	58	61	66	64
Seq_05	62	58	62	56	<u>65</u>

Conf_0SLOcc_CMX

No.	LNCB	SNCB	SNCB+FCCaPC	HCPrio	LNCB+FCCaPC
Seq_01	38	34	35	<u>44</u>	37
Seq_02	47	36	42	<u>55</u>	42
Seq_03	42	39	36	<u>53</u>	43
Seq_04	34	31	33	<u>48</u>	45
Seq_05	38	40	38	39	<u>43</u>

Conf_0LCPrio_CMX

No.	LNCB	SNCB	SNCB+FCCaPC	HCPrio	LNCB+FCCaPC
Seq_01	<u>45</u>	33	33	<u>44</u>	<u>41</u>
Seq_02	<u>46</u>	<u>38</u>	37	<u>50</u>	<u>40</u>
Seq_03	<u>45</u>	<u>40</u>	33	<u>48</u>	<u>39</u>
Seq_04	<u>38</u>	<u>40</u>	31	<u>52</u>	<u>43</u>
Seq_05	<u>41</u>	33	<u>40</u>	<u>38</u>	<u>42</u>

Conf_CMSLOcc_0X

No.	LNCB	SNCB	SNCB+FCCaPC	HCPrio	LNCB+FCCaPC
Seq_01	<u>59</u>	<u>45</u>	<u>47</u>	41	<u>53</u>
Seq_02	<u>55</u>	<u>59</u>	<u>53</u>	48	<u>60</u>
Seq_03	<u>62</u>	<u>46</u>	<u>47</u>	38	<u>57</u>
Seq_04	<u>60</u>	<u>51</u>	<u>55</u>	47	<u>56</u>
Seq_05	<u>63</u>	<u>46</u>	<u>54</u>	42	<u>59</u>

Conf_CMLCPrio_0X

No.	LNCB	SNCB	SNCB+FCCaPC	HCPrio	LNCB+FCCaPC
Seq_01	<u>57</u>	46	<u>52</u>	<u>45</u>	<u>52</u>
Seq_02	<u>62</u>	<u>60</u>	<u>55</u>	48	<u>59</u>
Seq_03	<u>59</u>	42	<u>51</u>	<u>48</u>	<u>58</u>
Seq_04	<u>65</u>	<u>51</u>	<u>53</u>	48	<u>61</u>
Seq_05	<u>64</u>	<u>50</u>	<u>52</u>	47	<u>51</u>

Conf_CMSLOcc_CMX

No.	LNCB	SNCB	SNCB+FCCaPC	HCPrio	LNCB+FCCaPC
Seq_01	<u>30</u>	<u>30</u>	22	<u>38</u>	<u>25</u>
Seq_02	26	<u>33</u>	<u>38</u>	<u>44</u>	<u>29</u>
Seq_03	25	<u>27</u>	<u>37</u>	<u>33</u>	25
Seq_04	27	27	<u>30</u>	<u>30</u>	<u>28</u>
Seq_05	23	<u>28</u>	<u>34</u>	<u>29</u>	<u>28</u>

Conf_CMLCPrio_CMX

No.	LNCB	SNCB	SNCB+FCCaPC	HCPrio	LNCB+FCCaPC
Seq_01	<u>26</u>	<u>27</u>	<u>34</u>	<u>32</u>	26
Seq_02	<u>27</u>	<u>34</u>	<u>33</u>	<u>37</u>	26
Seq_03	28	<u>32</u>	<u>36</u>	<u>30</u>	<u>29</u>
Seq_04	26	26	<u>32</u>	<u>32</u>	<u>30</u>
Seq_05	<u>32</u>	27	<u>38</u>	<u>42</u>	25

5. Podsumowanie

Na rynku światowym obserwuje się obecnie tendencję do odchodzenia od produkcji na magazyn (ang. *Make to Stock*) na rzecz produkcji na zlecenie (ang. *Make to Order*). Wynika to z dużej różnorodności zamówień składanych przez klientów. Produkcja samochodów jest przykładem wielowersyjnej i wieloasortymentowej produkcji na zlecenie. Maszyny i urządzenia wykorzystywane w produkcji powinny wykazywać zdolność do przetrzymywania się w zależności od wykonywanego zamówienia. W przeciwnym wypadku prowadzenie produkcji wielowersyjnej czy

wielosortymentowej jest utrudnione. Powstaje więc pytanie, w jaki sposób zorganizować produkcję i w jakiej kolejności realizować zlecenia, by liczba koniecznych przebrojeń, przekładająca się bezpośrednio na czas i koszty produkcji, była jak najmniejsza. Rozważany problem, określany jako problem sekwencjonowania zleceń produkcyjnych, rozpatrywany był szeroko w literaturze w oparciu o specyfikę produkcji samochodów osobowych. Przykład ten, rozbudowany o nowoczesne aspekty i problematykę zwłaszcza wydziału lakierni został poddany analizie w ramach niniejszego artykułu. Skuteczne sekwencjonowanie karoserii przeznaczonych do lakierowania jest uzasadnione względami ekonomicznymi. Głównym celem badań jest minimalizacja kosztownych przebrojeń wynikających ze zmiany kolorów. Każda zmiana koloru związana jest z koniecznością czyszczenia układu lakierniczego, stratą farby i przebrojeniem dyszy, co zwiększa koszty produkcji. Okresowe, wymuszone czyszczenia dysz, wykonywane są w celu zapewnienia właściwej jakości procesu lakierowania oraz minimalizacji czasu cyklu linii lakierniczej.

Partie pojazdów (sekwencje), grupowane według cechy jaką jest kolor, są z bufora transportowane do lakierni, o ile taki bufor występuje w systemie. Należy ponadto zauważyć, że planowanie procesu lakierowania karoserii znacznie utrudnia duża liczba stosowanych kolorów. Na przestrzeni lat paleta kolorów zmieniała się: od 4 kolorów w latach 1908-1913 do 64 kolorów dostępnych obecnie. Ponadto, popularność kolorów nie jest rozłożona równomiernie, najczęściej wybieranym przez klientów kolorem jest kolor biały, a najrzadziej zielony, beżowy i pomarańczowy. Rosnąca liczba dostępnych kolorów spowodowała konieczność zmiany organizacji procesu lakierowania. W przypadku, gdy liczba dostępnych kolorów jest mała, rozsądne i uzasadnione jest użycie adekwatnej liczby dyszy lakierniczych – każda dysza przeznaczona jest do dozowania innego koloru farby. Zastosowanie takiego rozwiązania jest niemożliwe, gdy paleta kolorów jest rozległa, między innymi ze względu na ograniczoną przestrzeń roboczą i liczbę zasobów oraz wysokie koszty dodatkowe. Najpopularniejszym rozwiązaniem jest wówczas zastosowanie złożonego systemu lakierniczego, takiego jak zrobotyzowane cele. Z jednej strony elastyczność i efektywność takiego systemu jest zdecydowanie większa w porównaniu z rozwiązaniami tradycyjnymi, ale z drugiej strony, roboty lakiernicze, jak zostało wspomniane, muszą się przeobrazić za każdym razem, gdy zmienia się kolor. Ewolucja w strategii procesu lakierniczego zapoczątkowała problem minimalizacji liczby przebrojeń i powiązanych z nimi kosztów.

*Praca finansowana ze środków przewidzianych na BK-213/RAu1/2016 oraz
BKM/506/RAu1/2016, temat 18*

LITERATURA

1. Alszer S., Krystek J.: The algorithms of buffers handling in Car Sequencing Problem presented on an actual production line. [in:] 24th International Conference On Production Research. Book of Abstracts, Poznań 2017, p. 51. Poznań
2. Benoist T.: Soft car sequencing with colors: Lower bounds and optimality proofs. European Journal of Operational Research 191 (3), 2008, p. 957-971.

3. Domin Ł.: Optymalizacja LOTTO kolorystycznego na wydziale lakierni. Praca magisterska (niepublikowana), Gliwice 2018.
4. Fiat A., Woeginger G.: *Online Algorithms – The State of the Art*. Berlin: Springer. 1998.
5. Fong-Yuen D., Zhu J., Sun H.: Comparing two weighted approaches for sequencing mixed-model assembly lines with multiple objectives. *International Journal Production Economics* 102 (1), 2006, p. 108-131.
6. Klimek M., Łebkowski P.: Heurystyka z regułami priorytetowymi dla problemu harmonogramowania projektu z ograniczonymi zasobami. [w:] *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Knosala R. (red.) Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją. Opole 2016, s. 589-600.
7. Krystek J., Alszer S.: Nowoczesne aspekty problemu sekwencjonowania samochodów na wydziale lakierni. *Mechanik* 7/2017, s. 527-529.
doi: 10.17814/mechanik.2017.7.67.
8. Mazur M., Niederliński A.: A Two-stage for an optimum solution for the car assembly scheduling problem Part 1 & Part 2. *Archives of Control Science* vol. 25 (3), 2015, p. 355-375.
9. Parello B. D., Kabat W. C., Vos L.: Job-shop scheduling using automated reasoning: a case study of the car sequencing problem. *Journal of Automated Reasoning* 2 (1), 1986, p. 1-42.
10. Solnon C., Cung V D., 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, p. 912-927.
11. Spieckermann S., Gutenschwager K., Voss S.: A sequential ordering problem in automotive paint shops. *International Journal of Production Research* 42(9), 2004, p.1865-1878