

Komputerowe wspomaganie procesu sekwencjonowania – koncepcja Paint Shop 4.0

Computer aided design of sequencing problem – the concept of Paint Shop 4.0

JOLANTA KRYSTEK
SARA ALSZER
SZYMON BYSKO*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.74>

Prezentowano koncepcję pracy lakierni dla przemysłu motoryzacyjnego – Paint Shop 4.0 – opartą na ideach Przemysłu 4.0 i Digital Factory. Opisano nowe podejście do sekwencjonowania karoserii, uwzględniające rzeczywistą strukturę wydziału lakierni z występującymi tam buforami. Stworzono aplikację, w której zostały zaimplementowane autorskie algorytmy sekwencjonowania karoserii.

SŁOWA KLUCZOWE: produkcja samochodów, proces lakierowania, sekwencjonowanie, bufor, Przemysł 4.0, Paint Shop 4.0

Presented is the concept of paint shop operation for the automotive industry – Paint Shop 4.0, based on the ideas of Industry 4.0 and Digital Factory. A new approach to the issue of car body sequencing, taking into account the actual structure of the paint shop department with buffers, has been presented. In the created application, proprietary car body sequencing algorithms were implemented.

KEYWORDS: car production, painting process, sequencing, buffer, Industry 4.0, Paint Shop 4.0

Produkcja samochodów jest procesem skomplikowanym technologicznie i logistycznie. Duży wybór dostępnych opcji wyposażenia, szeroka paleta kolorów nadwozia oraz różnorodne rozwiązania funkcjonalne powodują, że jeden model samochodu może występować w setkach wariantów. Ponadto w fabryce może być jednocześnie produkowanych kilka modeli samochodów. To oznacza, że w przemyśle samochodowym stosuje się planowanie produkcji wieloasortymentowej i wielowariantowej. Dodatkowo, zdecydowana większość samochodów jest produkowana na indywidualne zlecenie klienta (*make to order*). Klient decyduje o modelu, kolorze, wyposażeniu i oczekuje jej realizacji zamówienia w jak najkrótszym czasie.

Charakterystyczne dla produkcji wielowariantowej i wieloasortymentowej jest planowanie produkcji w mniejszych partiach, przez sekwencjonowanie (mieszanie) wariantów produktów w ramach tego samego procesu (*mixed model production*). Problem sekwencjonowania stał się jednym z głównych wyzwań optymalizacji produkcji w branży samochodowej, a w literaturze znany jest jako *car sequencing problem* (CSP) [1]. Naukowcy zaproponowali wiele założeń upraszczających struktury systemów produkcyjnych, ale czas otrzymania rozwiązań z wykorzystaniem proponowanych przez nich algorytmów był tak długi, że podejścia te nie nadawały się do wdrożenia w przemyśle.

Można wyróżnić kilka obszarów badawczych, w których stosowano sekwencjonowanie oceniane różnymi wskaźnikami:

- sekwencjonowanie samochodów na wydziale montażu końcowego [1] – minimalizacja liczby naruszeń ograniczenia przepustowości linii montażu,
- sekwencjonowanie samochodów jednocześnie dla wydziałów lakierni i montażu końcowego [2] – minimalizacja 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 [3],
- sekwencjonowanie i harmonogramowanie samochodów na wydziale montażu końcowego – minimalizacja liczby naruszeń ograniczenia przepustowości linii montażu oraz równomierne obciążenie stanowisk operacjami montażowymi (balansowanie linii montażowej) [4, 5].

Autorzy artykułu rozpatrują rzeczywisty problem sterowania procesem sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni z uwzględnieniem buforów o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Do testowania opracowywanych algorytmów sekwencjonowania wykorzystano dane rzeczywiste. Podczas badań prowadzono też monitoring przepływu karoserii przez bufor w celu wykrycia szczególnych sytuacji zapelnienia bufora, uznanych za niedopuszczalne w warunkach rzeczywistych.

Projekt Paint Shop 4.0 jest realizowany dla jednego z zagranicznych producentów samochodów, we współpracy z gliwicką firmą ProPoint. Ze względu na ochronę niejawnych danych przemysłowych w artykule nie podano miejsca realizacji projektu ani szczegółowych informacji dotyczących implementacji algorytmów.

Problemy sterowania wydziałem lakierni

Problem skutecznego sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni wynika ze specyfiki procesu produkcyjnego oraz ze struktury linii produkcyjnej. Proces lakierniczy jest złożony, wieloetapowy oraz energo- i kosztochłonny [6]. Z perspektywy jego optymalizacji nie ma znaczenia, na jaki kolor zostanie pomalowana karoseria, sekwencja karoserii determinuje jednak liczbę przebrojeń dyszy lakierniczych, które biorą udział w dwóch etapach procesu: malowaniu farbą bazową i podstawową.

Duża liczba stosowanych kolorów znacznie utrudnia planowanie procesu lakierowania karoserii (na przestrzeni lat paleta kolorów rozszerzyła się: od czterech kolorów w latach 1908–1913 do 64 kolorów dostępnych obecnie).

* Dr inż. Jolanta Krystek (jolanta.krystek@polsl.pl), mgr inż. Sara Alszner (sara.alszner@polsl.pl), mgr inż. Szymon Bysko (szymon.bysko@polsl.pl) – Politechnika Śląska

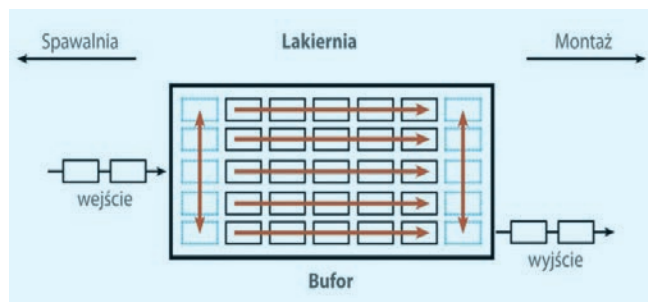
W związku z tym, biorąc pod uwagę cechę pojazdu, jaką jest kolor, należy tak ustalać kolejne sekwencje karoserii, żeby liczba przebiegów dysz lakierniczych była jak najmniejsza.

Aby zapewnić ciągłość produkcji, pomiędzy spawalnią, lakiernią i montażem ulokowane są bufory międzywydzielowe. Dodatkowo, w ramach wydziału lakierni, stosowany jest bufor poprzedzający proces lakierowania karoserii farbą bazową, wykorzystywany do bieżącego sekwencjonowania karoserii. Nasuwa się pytanie: jak za pomocą bufora z sekwencji optymalnej dla wydziału spawalni utworzyć sekwencję optymalną z punktu widzenia kryteriów optymalizacji procesu lakierowania? Problem ten był rozważany przez autorów jako *Car Sequencing Problem with Buffers* [7].

Według wiedzy autorów artykułu w fabrykach samochodów ustalanie sekwencji karoserii kierowanych do lakierowania nie jest zautomatyzowane. Decyzje są podejmowane przez doświadczonego operatora na podstawie informacji pochodzących z różnych źródeł.

Część informacji (plan produkcyjny, aktualny stan bufora, kod QR karoserii na wejściu) jest wyświetlana na kilku monitorach, w aplikacjach, które nie współpracują ze sobą. Informacje dodatkowe (np. awaria sprzętu, brak farby) przekazywane są operatorowi telefonicznie.

W rozwijanej obecnie koncepcji Przemysłu 4.0 człowiek będzie musiał zmienić swoją rolę z operatora na koordynatora-specjalistę [8]. Zautomatyzowanie procesu sterowania wydziałem lakierni jest spójne z wymaganiami Przemysłu 4.0.



Rys. 1. Struktura bufora bez zawracania karoserii

W realizowanym projekcie automatycznego systemu sterowania wydziałem lakierni wykorzystywany jest bufor o strukturze przedstawionej na rys.1. Jest to najtrudniejsza struktura ze względu na konsekwencje podejmowania decyzji.

Planowanie pracy lakierni jest procesem skomplikowanym, a dodatkowym utrudnieniem jest znajomość planu produkcji na okres nie dłuższy niż trzy-cztery godziny. Decyzje podejmowane są każdorazowo na podstawie bieżącej informacji o jednej karoserii na wejściu, trzy-, czterogodzinnego planu produkcji, stanie bufora oraz dostępności zasobów.

Zadaniem systemu jest sekwencjonowanie karoserii z zastosowaniem proponowanych przez autorów algorytmów. Ogólny algorytm postępowania polega na kierowaniu karoserii znajdującej się na wejściu bufora na odpowiednią linię przesyłową i wyprowadzaniu karoserii z bufora w takiej kolejności, by liczba zmian kolorów pomiędzy kolejnymi czyszczeniami okresowymi dyszy była jak najmniejsza. Założenia te wynikają z przesłanek ekonomicznych – każda zmiana koloru wiąże się z koniecznością czyszczenia układu lakierniczego, stratą farby i czasu, co zwiększa koszty produkcji. Dodatkowo, ze względu na konieczność przeprowadzania okresowych czyszczeń

dyszy w celu zapewnienia właściwej jakości procesu lakierowania, dąży się do synchronizacji przebiegów wynikających ze zmiany koloru z tymi czyszczeniami.

Wirtualny rozruch w Przemysle 4.0

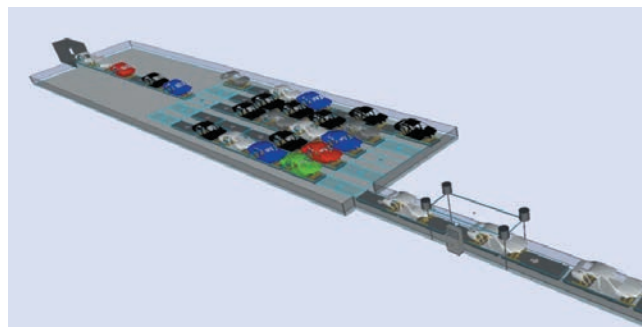
Jednym z najistotniejszych wymagań stawianych systemom współczesnej automatyki przemysłowej jest możliwość skutecznego nadzorowania, gromadzenia i przejrzystego prezentowania danych pochodzących z obiektów technologicznych, co zapewnia funkcjonowanie zintegrowanego systemu zarządzania zasobami produkcyjnymi. Wysoki stopień zaawansowania systemów sterowania przebiegiem procesu technologicznego wiąże się z koniecznością zorganizowania sprawnej i wysoko niezawodnej wymiany informacji pomiędzy urządzeniami i ich operatorami za pośrednictwem przemysłowego Internetu rzeczy (IIoT).

Dane procesowe dostępne są w fabrykach od wielu lat, ale obecnie można je coraz skuteczniej wykorzystać pod warunkiem posiadania sieci przekazującej te informacje w czasie rzeczywistym. W przedsiębiorstwie, w którym realizowany jest proces produkcyjny, niezbędne jest dobranie, wdrożenie i utrzymywanie w sprawności systemów, które powinny realizować wszystkie działania w obszarze sterowania przepływem produkcji. Najważniejsze w procesie wdrożenia tych systemów jest szczegółowe rozpoznanie, analiza i uporządkowanie wszystkich procesów biznesowych zachodzących w danej firmie.

W przedsiębiorstwie współdziałają systemy ERP, APS, MES oraz SCADA, które tworzą hierarchiczną, informacyjno-decyzyjną strukturę planistyczną w zakresie obiegu informacji dotyczących aktualnego stanu systemu produkcyjnego [9].

Jedną z kluczowych innowacji umożliwiających czwartą rewolucję przemysłową jest wykorzystanie technik symulacji funkcjonowania obiektów rzeczywistych w ich wirtualnych reprezentacjach (odzworowaniach) z wykorzystaniem danych procesowych dostarczanych i przetwarzanych w czasie rzeczywistym. Takie podejście pozwala na zaprojektowanie, testowanie i optymalizację konfiguracji procesów produkcyjnych przed ich fizycznym uruchomieniem. W realizowanym projekcie wykorzystano następujące narzędzia:

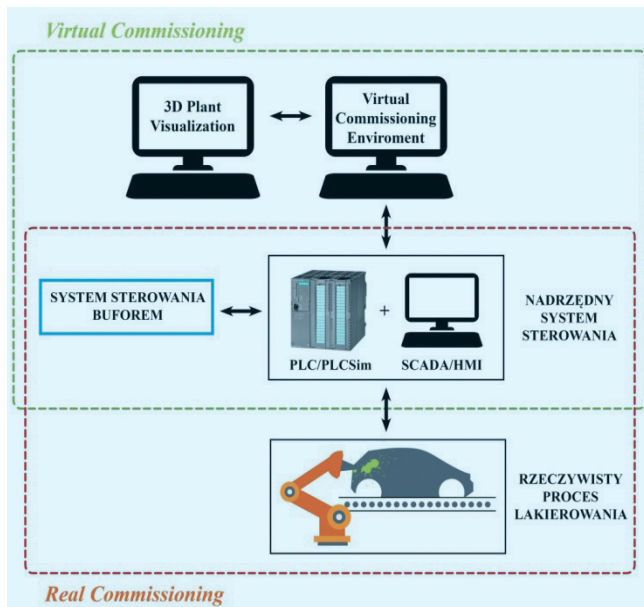
- Virtual Engineering (VE) – modelowanie systemów produkcyjnych z użyciem narzędzi 3D, bez uwzględnienia oprogramowania sterującego (rys. 2), w celu walidacji przebiegu procesów.



Rys. 2. Model bufora bez zawracania karoserii

- Virtual Commissioning (VC) – umożliwia projektowanie i testowanie nowego systemu produkcyjnego bez konieczności wstrzymywania pracy rzeczywistego obiektu. W oparciu o modele systemów produkcyjnych powstałe

w ramach etapu VE przeprowadzana jest weryfikacja oprogramowania systemu sterującego zgodnie z podejściem HiL (*Hardware in the Loop*). VC umożliwia wstępną ocenę, optymalizację i walidację całego systemu produkcyjnego, a zwłaszcza integrację wszystkich zasobów: produktu, procesu, mechanicznych i elektrycznych komponentów oraz oprogramowania [10].

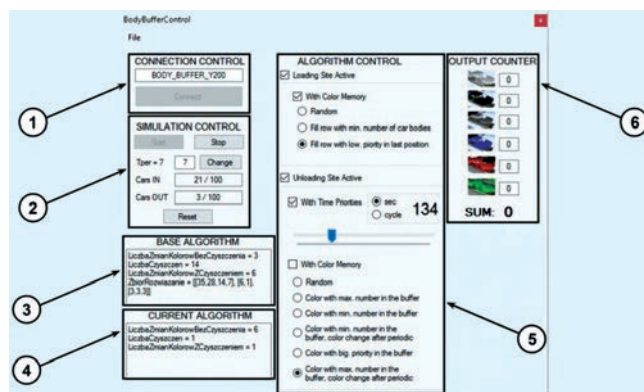


Rys. 3. Konfiguracja systemu sterowania lakiernią

Opis aplikacji systemu sterowania buforem

Aplikacja systemu sterowania buforem składa się z sześciu modułów informacyjno-komunikacyjnych przedstawionych na rys. 4. Są to:

1. Connection Control – moduł odpowiadający za połączenie i przesyłanie danych pomiędzy aplikacją a sterownikiem PLC.
2. Simulation Control – moduł umożliwiający uruchomienie bądź zatrzymanie symulacji, zresetowanie aktualnego stanu symulacji oraz zdefiniowanie parametru Tper, który określa okres czyszczeń periodycznych. W celu monitorowania bieżącego stanu produkcji wyświetlana jest aktualna liczba karoserii, które zostały dostarczone na wydział lakierni (CarIN), oraz liczba karoserii, dla których proces lakierowania został zakończony (CarOUT) w odniesieniu do planu produkcyjnego.
3. Base Algorithm – moduł przedstawiający podstawowe informacje na temat sekwencji optymalnej dla danego planu produkcji.
4. Current Algorithm – moduł przedstawiający aktualną sekwencję optymalną dla danego planu produkcji.
5. Algorithm Control – moduł informujący o wynikach próby optymalizacji sterowania przepływem karoserii za pomocą wybranego algorytmu sekwencjonowania.
6. Output Counter – moduł przeznaczony do wyboru kombinacji opracowanych algorytmów sekwencjonowania spośród trzech heurystyk definiujących sposób zapewnienia bufora (*Loading Site Active*) oraz sześciu heurystyk określających, w jakiej kolejności karoserie opuszczają bufor (*Unloading Site Active*).



Rys. 4. Widok panelu głównego aplikacji (opis w tekście)

4. Current Algorithm – moduł informujący o wynikach próby optymalizacji sterowania przepływem karoserii za pomocą wybranego algorytmu sekwencjonowania.
5. Algorithm Control – moduł przeznaczony do wyboru kombinacji opracowanych algorytmów sekwencjonowania spośród trzech heurystyk definiujących sposób zapewnienia bufora (*Loading Site Active*) oraz sześciu heurystyk określających, w jakiej kolejności karoserie opuszczają bufor (*Unloading Site Active*).
6. Output Counter – moduł do monitorowania aktualnego stanu produkcji.

Podsumowanie

Wśród kluczowych innowacji technicznych umożliwiających czwartą rewolucję przemysłową wymienia się stosowanie technik symulacyjnych i narzędzi środowiska wirtualnego, które w oparciu o rzeczywiste dane pozwalają na testowanie i optymalizowanie konfiguracji procesów przemysłowych przed ich fizycznym uruchomieniem.

W artykule przedstawiono praktyczne zastosowanie narzędzi środowiska wirtualnego dla przemysłu motoryzacyjnego. Analizie poddano rzeczywisty problem sterowania procesem sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni z uwzględnieniem bufora o sztywnej strukturze.

Za pomocą narzędzia do symulacji stworzono model funkcyjny bufora, a następnie z użyciem innowacyjnej metody wirtualnego rozruchu testowano różne algorytmy sekwencjonowania karoserii na wydziale lakierni. Przedstawiono innowacyjną aplikację służącą do automatycznego tworzenia sekwencji karoserii kierowanych do lakierowania. Celem optymalizacji jest minimalizacja liczby zmian kolorów pomiędzy kolejnymi czyszczeniami periodycznymi dysz lakierniczych. Dodatkowo dąży się do synchronizacji przebiegów z tymi czyszczeniami.

Praca finansowana jest z BK-204/RAu1/2017, BKM-508/RAu1/2017 oraz 10/DW/201701/01.

LITERATURA

1. 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.
2. Solnon C., Cung 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): s. 912–927.
3. Benoist T. "Soft car sequencing with colors: Lower bounds and optimality proofs". *European Journal of Operational Research*. 191, 3 (2008): s. 957–971.
4. 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): s. 108–131.
5. 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*. 25, 3 (2015): s. 355–375.
6. Krystek J., Alszer S. "Współczesne problemy sekwencjonowania samochodów na wydziale lakierni". *Mechanik*. 90, 7 (2017): s. 527–529.
7. Alszer S., Krystek J. "The algorithms of buffers handling in car sequencing problem presented on an actual production line". *24th International Conference on Production Research (ICPR)*. DEStech Publications, 2018, s. 277–282.
8. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. "Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group". 2013.
9. Krystek J. "Zintegrowany przepływ informacji w systemie produkcyjnym". *Mechanik*. 89, 7 (2016): s. 721–723, DOI:10.17814/mechanik.2016.7.152.
10. Chi G. Lee, Sang C. Park. "Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems". *Journal of Computational Design and Engineering*. 1, 3 (2014): s. 213–222, DOI: 10.7315/JCDE.2014.021. ■