

Mateusz HANDZLIK¹, Damian KOLNY², Ewa KACZMAR-KOLNY³

Opiekun naukowy: Sławomir HERMA⁴

RACJONALIZACJA HARMONOGRAMU PRODUKCYJNEGO Z UWZGLĘDNIENIEM SPECYFIKI BRANŻY MOTORYZACYJNEJ METODĄ PODZIAŁU I OGRANICZEŃ

Streszczenie: Jednym z fundamentalnych elementów planowania produkcji jest harmonogramowanie. Często wyzwaniem jest ustalenie kolejności wytwarzania wyrobów tak, aby uzyskać czas jak najkrótszy. Jedną z metod optymalizacji harmonogramowania jest metoda podziału i ograniczeń. W artykule przedstawiono problem harmonogramowania produkcji widełek oraz zamieszczono przykład, związany z praktyką produkcyjną branży motoryzacyjną, wyznaczania harmonogramu optymalnego z zastosowaniem metody podziału i ograniczeń. Analizie poddano proces produkcji wyrobów wytwarzanych na trzech stanowiskach.

Słowa kluczowe: metoda podziału i ograniczeń, harmonogramowanie

DETERMINING THE PRODUCTION SCHEDULE USING BRANCH AND BOUND METHOD ON THE EXAMPLE OF THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

Summary: One of the fundamental elements of production planning is scheduling. It is often a challenge to determine the order in which products are manufactured in order to achieve the shortest possible time. One of the scheduling optimization methods is the branch and bound method. The article presents the problem of production scheduling and includes an example, related to the production practice of the automotive industry, of determining the optimal schedule using the division and constraints method. The production process of products manufactured at three stations was analyzed.

Keywords: branch and bound method, scheduling

¹ inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Inżynieria Zarządzania Przedsiębiorstwem, maiknaad@gmail.com

² mgr inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, email: dkolny@ubb.edu.pl

³ mgr inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, email: ekaczmar@ubb.edu.pl

⁴ dr inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email: sherma@ubb.edu.pl

1. Wprowadzenie

Dzisiejsze funkcjonowanie wielu przedsiębiorstw skupia się na dwóch kluczowych aspektach: konkurencyjności i rozwoju, które są nieodzowne dla pozyskania oraz utrzymania klientów. W tej dynamicznej rzeczywistości firmy starają się zaspokoić rosnące oczekiwania klientów, którzy dążą do zakupu produktów po jak najniższej cenie, ale jednocześnie o jak najwyższej jakości. W dążeniu do zaspokojenia tych potrzeb, przedsiębiorstwa stają w obliczu licznych wyzwań, których rozwiązanie przekłada się na poprawę postrzegania ich przez klientów [11].

Wyzwania te należy mieć na uwadze na wielu etapach tworzenia wyrobu, począwszy od procesu projektowania wyrobu i pozyskiwania materiałów i części o jak najniższych kosztach, ale o jak najwyższej jakości. Dobór odpowiedniej technologii do produkcji wyrobów staje się kluczowym elementem efektywności i konkurencyjności. Dodatkowo optymalizacja procesu produkcji jest niezbędna w celu zmniejszenia strat oraz obniżenia kosztów związanych z produkcją.

Aby sprostać powyższym wyzwaniom, przedsiębiorstwa korzystają z różnych narzędzi i metod takich, jak Lean Management, 5S, Kaizen, Poka Yoke, PDCA, QRM, a także wiele innych. Te narzędzia pomagają firmom w efektywnym zarządzaniu produkcją, redukowaniu marnotrawstwa oraz usprawnianiu procesów produkcyjnych [9].

Należy podkreślić, że jednym z istotnych aspektów w tym kontekście jest harmonogramowanie produkcji w przedsiębiorstwach. Planowanie i organizacja produkcji są kluczowe dla zapewnienia, że produkty są wytwarzane w terminie, co ma znaczący wpływ na zadowolenie klientów oraz rentowność firmy.

W obliczu wyzwań, z którymi przedsiębiorstwa borykają się każdego dnia, skuteczne zarządzanie produkcją oraz wykorzystywanie odpowiednich narzędzi staje się nieodzownym elementem strategii biznesowej. Tylko poprzez skupienie się na konkurencyjności, jakości produktów i optymalizacji procesów produkcji firmy mogą osiągnąć sukces i utrzymać się na rynku.

W artykule przeprowadzono racjonalizację harmonogramowania w przedsiębiorstwie produkcyjnym branży motoryzacyjnej. Artykuł powstał w ramach prac Koła Naukowego VIP – Virtual Industrial Production na Uniwersytecie Bielsko-Bialskim.

2. Istota harmonogramowania

Harmonogramowanie produkcji to proces planowania i organizowania produkcji w sposób efektywny i zgodny z założeniami przedsiębiorstwa. Celem jest osiągnięcie optymalnego wykorzystania zasobów, minimalizacja czasu produkcyjnego, redukcja kosztów oraz zaspokojenie popytu na produkty. Harmonogramowanie produkcji jest kluczowym elementem w środowisku produkcyjnym, szczególnie w firmach, gdzie efektywność produkcji ma bezpośredni wpływ na konkurencyjność na rynku.

Pojęcie „harmonogramowanie produkcji” można rozumieć jako szeregowanie zadań produkcyjnych, z uwzględnieniem odpowiedniej wielkości partii produkcyjnej oraz wszelkich możliwych do wystąpienia ograniczeń. Kolejnym etapem po stworzeniu harmonogramu produkcji, jest przekazanie go do realizacji [13].

Istnieje kilka różnych rodzajów harmonogramów które mogą być tworzone w zależności od potrzeby organizacji. Przykładowo mogą być tworzone

harmonogramy terminowe – które biorą pod uwagę kalendarz i definiują konkretne terminy rozpoczęcia się poszczególnych zadań, uwzględniają one dni robocze i dni wolne, regulaminy pracy itp. Inny rodzaj harmonogramów to tzw. harmonogramy „ślepe”, które uwzględniają jedynie czasy trwania realizacji poszczególnych zadań oraz zależności pomiędzy nimi (kolejność wykonywania) [4].

Inny podział zakłada harmonogramowanie w przód i w tył. Harmonogram w przód sprowadza się do analizy kolejności wykonywania zadań tak, by termin ukończenia zlecenia był jak najszybszy. Tworzenie harmonogramów w tył (wstecz), zakłada pewien znany termin zakończenia przedsięwzięcia i rozplanowanie zadań tak, by kończyły się one w najpóźniejszym dopuszczalnym terminie [4].

Często w procesie harmonogramowania kładziony jest nacisk na jak najszybsze wyprodukowanie założonych partii wyrobów celem zaspokojenia popytu i oczekiwań klientów dotyczących czasu oczekiwania na wyrób. Czas produkcji często zależy od rodzaju wyrobu, przebiegu jego procesu produkcyjnego, dostępności maszyn, urządzeń, materiałów i siły roboczej. Dodatkowo istotnym aspektem jest wybór odpowiedniej metody planowania produkcji [2].

Współcześnie można zaobserwować ciągły rozwój systemów i metod harmonogramowania produkcji, jednakże powstające nowe rozwiązania bazują w większości na znanych algorytmach optymalizacyjnych. Do przykładów metod optymalizacji harmonogramowania można zaliczyć między innymi [2]:

- symulowane wyżarzanie (*ang. Simulated Annealing*) – to algorytm, który stanowi heurystykę, zatem nie daje gwarancji znalezienia optymalnego rozwiązania, ale pozwoli uzyskać bardzo dobre rozwiązanie w relatywnie krótkim czasie [7],
- algorytmy genetyczne (*ang. Genetic Algorithms*) – to algorytmy rozwiązywania problemów optymalizacyjnych (w tym harmonogramowania produkcji), które cechuje prostota przeszukiwań oraz duża uniwersalność i oparte są na mechanizmach dziedziczenia i doboru naturalnego [14],
- algorytm memetyczny (*ang. Memetic Algorithm*) – metoda łącząca algorytm genetyczny i przeszukiwanie lokalne, nazywany również hybrydowym algorytmem ewolucyjnym [12],
- optymalizacja roju cząstek (*ang. Particle Swarm Optimization*) – algorytm, w którym dokonywane jest przeszukiwanie metaheurystyczne w oparciu o konkurencję i współpracę pomiędzy cząstkami reprezentującymi przeszukiwane zmienne [1],
- metoda podziału i ograniczeń (*ang. Branch and Bound method*) – metoda dokładnego przeszukiwania drzewa rozwiązań dopuszczalnych z ciągłym ograniczaniem obszaru poszukiwań [8].

W artykule zastosowane metodę podziału i ograniczeń ze względu na częstość jej stosowania oraz ze względu na możliwość uzyskania rozwiązania w akceptowalnym czasie [8].

3. Identyfikacja procesu i sformułowanie problemu

W artykule przedstawiony przykład optymalizacji harmonogramowania produkcji z zastosowaniem metody podziału i ograniczeń w przedsiębiorstwie branży motoryzacyjnej, zajmującym się produkcją części do układy kierowniczego.

W rozpatrywanym przykładzie, analizie poddana zostanie produkcja pięciu wyrobów – widełek do układów kierowniczych – różniących się zastosowaniem, materiałem wykonania czy czasami obróbki. Wyrób pierwszy - widełka 1 wykorzystywana jest w układzie kierowniczym. Widełka ta została przedstawiona na rysunku 1 po lewej. Kolejnym produktem jest widełka 2 jej budowa różni się gabarytowo względem poprzedniej, jednakże procesy obróbcze pozostają takie same (rys. 1 po prawej). Ponadto jest ona używana w tym samym układzie kierowniczym co widełka 1 dlatego ilości zamówień na oba produkty zawsze są takie same.



Rysunek 1. Widełka 1 (po lewej) i widełka 2 (po prawej)

Inny wariant produktu branego pod uwagę jest widełka 3 (rys. 2). Ta widełka występuje w innym, starszym modelu układu kierowniczego samochodów osobowych. Jednakże przebieg obróbki pozostaje taki sam jak w dwóch poprzednich przypadkach.



Rysunek 2. Widełka 3

Ostatnie widełki brane pod uwagę, czyli widełka 4 oraz widełka 5 to dwa produkty bardzo podobne do siebie, jednakże różniące się materiałem z jakiego są wykonane, co z kolei przekłada się na czasy technologiczne produkcji.

Tak jak zostało zaznaczone poprzednio, wszystkie 5 wyrobów przechodzi taką samą ścieżkę produkcyjną a różnice pozostają jedynie w wymiarach oraz samym kształcie wyrobów. Procesy technologiczne obróbki widełek zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Przebieg procesu technologicznego

| Nr operacji | Nazwa i przebieg operacji |
|-------------|--|
| 10 | GRATOWANIE Półfabrykaty przetwarzane są przez gratownice, gdzie kamienie usuwają ostre krawędzie oraz wióry pozostałe na półprodukcie [3] |
| 20 | WYTACZANIE Z otworów w półwyrobach usuwane są odpowiednie ilości materiału w celu osiągnięcia odpowiedniego wymiaru otworu |
| 30 | FAZOWANIE OTWORU Ostre krawędzi otworów zostają załamane poprzez ściągnięcie niewielkiej ilości materiału |

W zależności od rodzaju widelki czasy przejścia przez operacje różnią się z powodu ich geometrii oraz materiału wykonania. Liczba wyrobów w zamówieniu wynosi 400 sztuk dla wszystkich rodzajów widelki. Czasy wykonania poszczególnych operacji dla 1 sztuki wyrobu zostały przedstawione w tabeli 2, natomiast dla 400 sztuk zostały przedstawione w tabeli 3. Oznaczenia w kolumnie „Maszyna” w tabelach oznaczają kolejno: M1 – Gratownica, M2 – wytaczarka specjalna, M3 – Frezarka CNC. Oznaczenia W1, W2, W3, W4 i W5 odnoszą się do kolejnych rodzajów wideltek.

Tabela 2. Czasy obróbki

| Operacja | Maszyna | t _{jw1} [s] | t _{jw2} [s] | t _{jw3} [s] | t _{jw4} [s] | t _{jw5} [s] | t _{pz} [min] |
|------------------|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Gratowanie | M1 | 2,25 | 27 | 2,25 | 2,7 | 3 | 10 |
| Wytaczanie | M2 | 18 | 18 | 18 | 15 | 21 | 15 |
| Fazowanie otworu | M3 | 11 | 11 | 11 | 10 | 13 | 1 |

Tabela 3. Czasy wykonania wyrobów dla partii 400 sztuk

| Operacja | Maszyna | T _{w1} [min] | T _{w2} [min] | T _{w3} [min] | T _{w4} [min] | T _{w5} [min] |
|------------------|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Gratowanie | M1 | 25 | 14 | 25 | 28 | 30 |
| Wytaczanie | M2 | 132 | 132 | 132 | 115 | 155 |
| Fazowanie otworu | M3 | 75 | 75 | 75 | 68 | 88 |

W tabeli 2 czasy w kolumnach oznaczone t_{jw1}, t_{jw2}, t_{jw3}, t_{jw4}, t_{jw5} określają czas jednostkowy wykonania poszczególnej operacji na danej maszynie dla danego rodzaju widelki. W kolumnie opisanej jako t_{pz} w tabeli 2 przedstawiono czasy przygotowawczo-zakończeniowe dla poszczególnych operacji. W tabeli 3 przedstawiono czasy normatywne poszczególnych operacji dla partii 400 sztuk wyrobów po uwzględnieniu czasów przebrojenia oraz czasów jednostkowych. Celem zastosowania metody podziału i ograniczeń w przygotowaniu harmonogramu produkcji opisanych wyrobów czasy z tabeli 3 przedstawiono w postaci macierzy (1).

$$[p_{wj}] = \begin{matrix} & w_1 & w_2 & w_3 & w_4 & w_5 \\ \begin{bmatrix} 25 & 14 & 25 & 28 & 30 \\ 132 & 132 & 132 & 115 & 155 \\ 75 & 95 & 75 & 68 & 88 \end{bmatrix} & & & & & \end{matrix} \quad (1)$$

Zlecenia od klienta przygotowywane są z dwutygodniowym wyprzedzeniem. Maszyny przetwarzane są po obróbce całej serii produkcyjnej wyrobów. Dodatkowo stanowiska znajdują się w niewielkiej odległości od siebie, co pozwala pominać czasy transportu na następne stanowiska.

4. Wyznaczanie harmonogramu produkcji widełek z zastosowaniem metody podziału i ograniczeń

Kolejność wytwarzania wyrobów zostanie zaplanowane z wykorzystaniem metody podziału i ograniczeń (*ang. Branch and Bound method*). Jest to metoda optymalizacji harmonogramowania należąca do algorytmów dokładnych, która zastosowanie znajduje zwłaszcza w harmonogramowaniu przedsięwzięć z niewielką liczbą zadań. Spowodowane jest to dużym czasem związanym z poszukiwaniem rozwiązania optymalnego [6]. Metoda ta sprowadza się do przeszukiwania zbioru rozwiązań dopuszczalnych problemu optymalizacyjnego. Algorytm metody sprowadza się do stworzenia drzewa rozwiązań i obliczeń dla kolejnych podzbiorów zadań, a tym samym dla kolejnych wierzchołków w ramach drzewa [5],[8]. Podczas wyznaczania algorytmu optymalnego zgodnie z metodą podziału i ograniczeń odrzuca się pewne rozgałęzienia drzewa rozwiązań dopuszczalnych, dzięki czemu zawęża się obszar poszukiwań rozwiązania optymalnego. W tym celu wykorzystuje się ograniczenia funkcji celu – górne lub dolne w zależności od analizowanego problemu [8].

Kalkulacja dolnej granicy ograniczenia przebiega wg algorytmu [10]:

$$LB_1 = q(J_r, 1) + \sum A_i + \min J'_r(B_i + C_i) \quad (2)$$

$$LB_2 = q(J_r, 2) + \sum B_i + \min J'_r(C_i) \quad (3)$$

$$LB_3 = q(J_r, 3) + \sum C_i \quad (4)$$

$$LB = \max \{LB_1, LB_2, LB_3\} \quad (5)$$

gdzie:

LB_1, LB_2, LB_3, LB – dolne granice (najkrótszy czas trwania przedsięwzięcia),

A_i, B_i, C_i – czas przetwarzania wyrobu i na maszynach A, B i C ,

J_r – harmonogram częściowy (czas trwania wcześniejszych zadań),

J'_r – harmonogram pozostałych zadań,

q – czas wykonywania zadania.

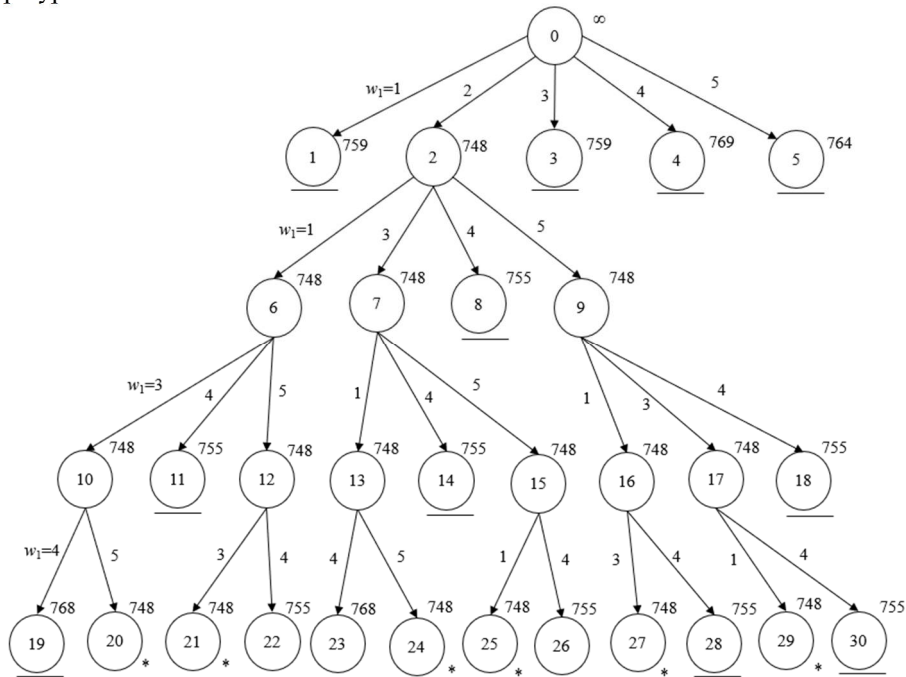
W opracowaniu przyjęto, że wszystkie zlecenia są znane na początku okresu planowania. Operacje produkcji całej partii wyrobów nie mogą być przerywane, a kolejna operacja może się rozpocząć dopiero po zakończeniu poprzedniej. Ze względu na niewielką odległość pomiędzy stanowiskami pominięto czas transportu międzystanowiskowego i ograniczenia międzyoperacyjne.

W metodzie podziału i ograniczeń budowane jest drzewo uszeregowanych częściowych, w którym analizowane są wartości dolnych granic dla kolejnych wierzchołków,

przypisując tym samym kolejne wyroby do harmonogramu. Przykładowo wierzchołek 1 oznaczony jest przez $i=1$, co oznacza, że w jego analizie jako pierwszy wyrób produkowany będzie wyrób widełka 1. Dodatkowo na drzewie znajdują się dolne granice wyznaczone dla każdego z wierzchołków. Dla przykładu dotyczącego produkcji widełek drzewo uszeregować częściowych przedstawiono na rysunku 3. Algorytm metody zakłada przeszukiwanie drzewa rozwiązań, jednakże celem ograniczenia zakresu poszukiwań wyznaczana jest dolna granica pełnego uszeregowania i porównywana z dolną granicą poszczególnego wierzchołka [8]. W przypadku problemu z funkcją celu dążącą do minimum (tak, jak ma to miejsce w harmonogramowaniu) jeśli dolna granica wierzchołka jest większa od dolnej granicy całego uszeregowania – dalsze jego przeszukiwanie jest zaniechane. Przykładowo dolne oszacowanie dla wierzchołka 1, w którym zakłada się wytwarzanie widełki 1 jako pierwszej, zostało wyznaczone na podstawie formuł (2) – (5):

$$LB_1 = \max\{122 + \min(132 + 75; 132 + 75; 115 + 68; 155 + 88); 14 + 66 + \min(75; 75; 68; 88); 25 + 132 + 281\} = 759 \quad (6)$$

Na pierwszym poziomie rozwinięcia wierzchołów 1, 3, 4 i 5 zostały odrzucone z obszaru poszukiwań ze względu na to, że ich dolne oszacowania miały większą wartość niż dolne oszacowanie dla całego uszeregowania – w analizowanym przypadku równe 748.



Rysunek 3. Drzewo uszeregować częściowych dla produkcji widełek

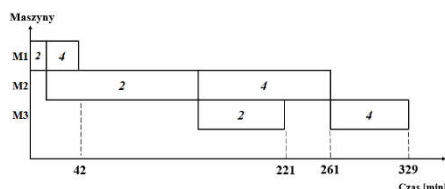
Na drugim poziomie drzewa oszacowań częściowych wyznaczono wartości kolejnych wierzchołków, przykładowo dla wierzchołka 6 dolne oszacowanie wynosi:

$$LB_6 = \max\{122 + \min(132 + 75; 115 + 68; 155 + 88); (14 + 132 + 132) + (132 + 115 + 155) + \min(75; 68; 88); (14 + 132 + 132 + 75) + (75 + 68 + 88)\} = 748 \quad (7)$$

W kalkulacji wierzchołka 6 do harmonogramu częściowego przypisano sekwencję wytwarzania 2-1. Obliczenia dla sekwencji 2-4 w wierzchołku 8 prezentują się następująco:

$$LB_8 = \max\{122 + \min(132 + 75; 132 + 75; 155 + 88); (14 + 132 + 115) + (132 + 132 + 155) + \min(75; 75; 88); (14 + 132 + 115 + 68) + (75 + 75 + 88)\} = 755 \quad (8)$$

Dla wierzchołka 8 stworzono harmonogram częściowy z przypisanymi wyrobami 2 i 4, który przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Uszeregowanie częściowe dla wierzchołka 8 w kolejności 2-4 drzewa uszeregowania z rys. 3

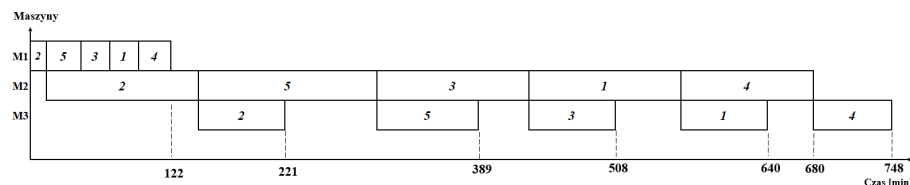
Jednakże rozwinięcie wierzchołka 8 również zostało odrzucone z dalszych poszukiwań rozwiązania ze względu na dolne oszacowanie większe od granicznego równego 748.

Po przeszukaniu rozwiązań dopuszczalnych wyodrębniono kilka rozwiązań optymalnych, co związane jest z tym, że widełka 1 i widełka 3 mają takie same czasy przetwarzania na maszynach, dlatego możliwe jest kilka uszeregowania dających ten sam wynik. Optymalne zaszerogowania to:

- 2-1-3-5-4 (wierzchołek 20),
- 2-1-5-3-4 (wierzchołek 21),
- 2-3-1-5-4 (wierzchołek 24),
- 2-3-5-1-4 (wierzchołek 25),
- 2-5-1-3-4 (wierzchołek 27),
- 2-5-3-1-4 (wierzchołek 29).

Dla każdego z tych wierzchołków dolna granica wynosi 748.

Na podstawie powyższej analizy zaproponowano harmonogram produkcji zbudowany dla wierzchołka 29, który przedstawiony został na rysunku 4.



Rysunek 5. Uszeregowanie optymalne (harmonogram optymalny dla wierzchołka 29, sekwencja 2-5-3-1-4)

Na rysunku 4 przedstawiono również czasy zakończenia produkcji partii poszczególnych wyrobów.

W związku z tym, że analiza dała kilka tożsamyh rozwiązań optymalnych wybór sekwencji produkcji widełek, może być dokonany na podstawie dodatkowych kryteriów, takich jak na przykład kolejność wpłynięcia zlecenia od klienta.

5. Podsumowanie

W związku ze specyfiką branży motoryzacyjnej jednym z głównych wyzwań efektywnego zarządzania produkcją jest jej planowanie w oparciu o harmonogramy. Istnieje wiele różnych metod optymalizacji harmonogramowania różniące się między sobą czasem potrzebnym na poszukiwaniem rozwiązania oraz możliwością pozyskania rozwiązania optymalnego (metody heurystyczne umożliwiają otrzymanie rozwiązania bardzo dobrego, aczkolwiek niekoniecznie optymalnego).

W opracowaniu skupiono się na problemie harmonogramowania produkcji w przedsiębiorstwie zajmującym się produkcją części do układów kierowniczych. Analizie poddano proces planowania produkcji 5 różnych wyrobów obrabianych na 3 stanowiskach. W rozwiązaniu zadania uszeregowania kolejności produkcji wyrobów wykorzystano metodę podziału i ograniczeń. Dzięki takiemu podejściu w tym konkretnym przypadku ze względu na specyfikę danych wejściowych możliwe było uzyskanie kilku rozwiązań optymalnych. W praktyce produkcyjnej przedsiębiorstwo może dokonać wyboru jednego z najlepszych uszeregowan z uwzględnieniem dodatkowych ograniczeń takich jak np. dostępność materiału, wymagania klientów itd.

LITERATURA

1. CHIARADONNA S., GIANDOMENICO D., MURRU N., On enhancing efficiency and accuracy of particle swarm optimization algorithms, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 11, no 4, 2015, 1165-1189. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.06326>
2. CIEPLIŃSKI P., GOLAK S., BLACHNIK M., GAWRYŚ K., KACHEL A., Production Scheduling Methodology, Taking into Account the Influence of the Selection of Production Resources. *Applied Sciences* 12 (2022)5367, 1-20, <https://doi.org/10.3390/app12115367>
3. Gratowanie, <https://farempoland.pl/gratowanie.html>, 24.10.2023.
4. GUNIA G., Wybrane zagadnienia planowania i organizacji produkcji, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2015.
5. HU SH., WANG S., KAO Y., ITO T., SUN X., A Branch and Bound Algorithm for Project Scheduling Problem with Spatial Resource Constraints, "Mathematical Problems in Engineering", vol. 2015, s. 1-9, <https://doi.org/10.1155/2015/628259>
6. KLIMEK M., Algorytmy konstrukcyjne dla problemu harmonogramowania projektu z ograniczonymi zasobami, *Zeszyty Naukowe WWSI*, 15(2016)10, 41-52. <https://doi.org/10.26348/znwwsi.15.41>

7. KLIMEK M., Symulowane wyżarzanie dla problemu harmonogramowania projektu z ograniczonymi zasobami, *Zeszyty Naukowe WWSI*, 15(2016)10, 53-65.
8. KOLNY D., STUGLIK J., PŁONKA S., Wyznaczanie harmonogramów optymalnych metodą podziału i ograniczeń [W:] RYSIŃSKI J. (red.) *Projektowanie, badania i eksploatacja*, Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2022, s. 291-298.
9. LIKER J.K. *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. McGraw-Hill, 2004.
10. MAZDA CH.N., KURNIAWATI D.A., Branch and Bound Method to Overcome Delay Delivery Order in Flow Shop Scheduling Problem, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1003(2020), 1-8, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1003/1/012129>
11. PORTER M.E., *Competitive advantage: Creating and sustaining superior performance*. Free Press, 2008.
12. SADIQ S.S., ABDULAZEEZ A.M., HARON H. Solving multi-objective master production schedule problem using memetic algorithm. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science* (2020)18,938-945. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i2.pp938-945>
13. MUTNICKI CZ., *Algorytmy szeregowania zadań*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
14. SOBASZEK Ł., *Metody harmonogramowania produkcji (Production Scheduling Methods)* [W:] LORENCEWICZ E., ŻAK I.E. (red.) *Współczesne problemy zarządzania i inżynierii produkcji*, Towarzystwo Wydawnictw Naukowych LIBROPOLIS, 2011.
15. WINICZENKO R., Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego* 1/2008, s. 107-110.