

HARMONOGRAMOWANIE OPERACJI Z UWZGLĘDNIENIEM WYMAGAŃ WIELOZASOBOWYCH W GRUPACH KOMPETENCJI

Krzysztof KALINOWSKI, Cezary GRABOWIK, Grzegorz ĆWIKŁA,
Aleksander GWIAZDA, Zbigniew MONICA

Streszczenie: W artykule przedstawiono sposób harmonogramowania operacji procesów produkcyjnych, w których wymagany jest udział dwóch lub większej liczby zasobów. W wymaganiach zasobowych operacji wskazywane są tzw. grupy kompetencji, do których przyporządkowywane są dane zasoby równoległe. Przedstawiono klasyfikację zasobów z punktu widzenia planowania procesów produkcyjnych oraz zaproponowano model opisujący zasoby na potrzeby harmonogramowania z uwzględnieniem operacji wielozasobowych. Opisano wybrane parametry operacji zlecenia produkcyjnego, które umożliwiają jednoczesny przydział zasobów z różnych grup kompetencji, wymagany przedział liczebności zasobów w poszczególnych grupach, możliwość zamiany zasobów w trakcie realizacji operacji jak również różny sposób kalkulacji czasu trwania operacji (zużycia jej czasu normatywnego) w zależności od liczby zaangażowanych zasobów. Zaprezentowano również przykłady ilustrujące wykorzystanie wybranych parametrów.

Słowa kluczowe: harmonogramowanie produkcji, operacje wielozasobowe, zasoby dodatkowe, grupy kompetencji

1. Wprowadzenie

Skuteczna organizacja przepływu produkcji, wyznaczanie osiągalnych planów jak i efektywna eksploatacja dostępnych zasobów jest jednym z podstawowych założeń dobrze prosperującego przedsiębiorstwa. Szczegółowe harmonogramowanie procesów produkcyjnych wspomaga koordynację działań w zakresie [7]. Pozwala na ocenę możliwości produkcyjnych przy danych ograniczeniach zasobowych, precyzyjne określenie ilości i terminów realizacji przyjmowanych zleceń itp. Jednak narastający poziom złożoność zagadnień w obszarze planowania i sterowania produkcją oraz dynamika zmian wynikająca z interakcji z otoczeniem w znacznym stopniu utrudniają podejmowanie właściwych decyzji i motywują do stosowania wydajnych metod i narzędzi.

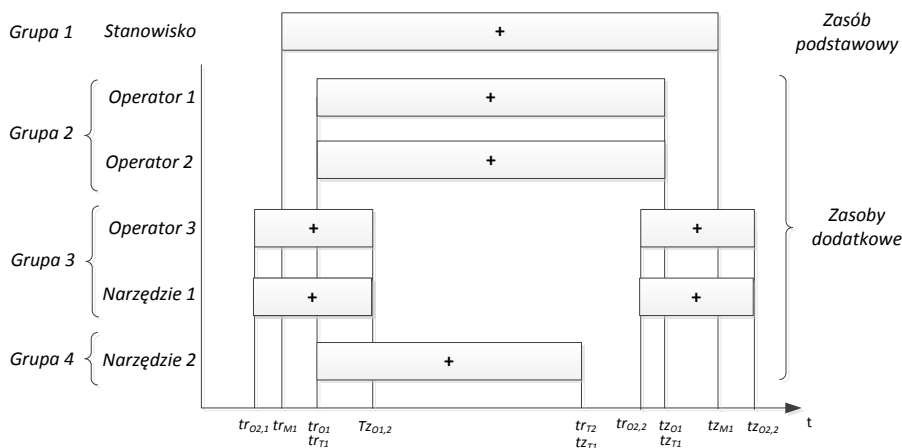
Istnieje wiele metod wspomagających proces harmonogramowania, wśród nich można wyróżnić metody gwarantujące uzyskanie rozwiązania optymalnego jak i metody przybliżone, heurystyczne, które takiej gwarancji nie dają. Metody optymalne, w większości dedykowane są precyzyjnie zdefiniowanej strukturze systemu i zadań, przy ściśle określonych ograniczeniach i kryteriach oceny. Stąd tylko niewielki ich odsetek znajduje praktyczne zastosowanie. Większą atrakcyjność w zastosowaniach praktycznych posiadają algorytmy przybliżone oraz metody stosujące heurystyki i metaheurystyki. Rezygnując z wyznaczania rozwiązań optymalnych na rzecz dopuszczalnych, uzyskuje się akceptowalny czas wyznaczania satysfakcjonującego rozwiązania oraz możliwość analizowania bardziej złożonych modeli. Chociaż na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu

lat powstało wiele prac poświęconych zagadnieniom z zakresu harmonogramowania przełożenie osiągnięć naukowych na praktykę produkcyjną wciąż stanowi dość poważny problem. Wynika on przede wszystkim z poziomu złożoności modeli rzeczywistych systemów i konieczności stosowania uproszczeń przy stosowaniu dostępnych narzędzi a także wpływu nieprzewidzianych w modelu czynników wewnętrznych i zewnętrznych. Powoduje to konieczność nadzoru decydenta nad procesem wyznaczania harmonogramu. Przedstawione w artykule rozwiązanie, stanowi rozwinięcie metodyki harmonogramowania przedstawionej w [5] w zakresie modelowania operacji wielozasobowych.

2. Sformułowanie problemu

Rozważany w pracy problem można ogólnie sformułować w następujący sposób: dane jest zlecenie produkcyjne opisane zbiorem operacji. Wymagania operacji co do zasobów określone są w sposób pośredni, przez tzw. grupy kompetencji. Pod pojęciem grupy kompetencji rozumiany jest zbiór zasobów równoległych umożliwiający wykonanie określonej liczby zabiegów składających się na daną operację. Wymogi odnośnie do liczby grup kompetencji oraz ich liczebności definiowane są oddzielnie w każdej operacji. Żądana liczebność zasobów z danej grupy kompetencji nie musi być stała - może być określona przedziałem minimalnej i maksymalnej ich liczby. Uwzględnienie powyższych parametrów jako ograniczeń w zadaniu harmonogramowania powoduje, że rozwiązanie dopuszczalne wymaga obecności zasobów z wszystkich zdefiniowanych w poszczególnych operacjach grup kompetencji, w liczbie z podanego zakresu.

W wymaganiach dotyczących udziału grup kompetencji mogą być uwzględniane dodatkowe parametry, związane np. z czasem pracy zasobów z danej grupy, czasem jej rozpoczęcia (rys. 1), możliwością zmiany zasobów przy realizacji operacji w ramach tej samej grupy, możliwością łączenia kompetencji czy sposobem zużycia czasu jednostkowego w zależności od liczby zaangażowanych zasobów.



Rys. 1. Przykładowe wymagania operacji w ujęciu grup kompetencji

Przedstawione na rysunku 1 przykładowe wymagania zasobowe dotyczą 4 różnych grup kompetencji: stanowiska, traktowanego jako zasób podstawowy, jak w klasycznym zadaniu harmonogramowania oraz grup zasobów dodatkowych, które reprezentują zasoby ludzkie i

narzędzia. W zależności od wymagań technologicznych czasy jednostkowy i czas przygotowawczo zakończyeniowy mogą się różnić w poszczególnych grupach zasobowych.

Wprowadzenie wybranych cech grup kompetencji, co umożliwi precyzyjniejsze planowanie czasu zajętości zasobów produkcyjnych należących do różnych grup, współuczestniczących w realizacji tej samej operacji. Podjęta tematyka nawiązuje do obszarów badawczych takich jak RCSP (ang. Resource Constrained Scheduling Problem) [1,2,8] oraz RCPSP (ang. Resource Constrained Project Scheduling Problem) [1, 3, 11].

3. Zadanie harmonogramowania

Harmonogramowanie w systemach produkcyjnych jest z reguły procesem wieloetapowym, w którym definiowane są kolejne cząstkowe problemy optymalizacyjne i decyzyjne [2,3]. Jedną z zasadniczych faz tego procesu jest faza modelowania, w której dokonywany jest szczegółowy opis matematyczny, najczęściej w symbolicznej notacji $\alpha|\beta|\gamma$, opisujący przedmiot harmonogramowania, wymagane ograniczenia oraz żądane kryteria i sposób oceny wyznaczanych rozwiązań. Stosowany tu termin *ograniczenie*, przyjmuje znaczenie jakościowej definicji danych wejściowych [2, 3]. Tworząc model, w pierwszej kolejności przeprowadzana jest identyfikacja zasobów do planowania, tj. stanowisk, maszyn, załogi itp. ustalanie wartości ich cech oraz identyfikowane ograniczenia z nimi związanych. Dalej, na bazie zbioru dostępnych zasobów tworzone są procesy opisujące możliwości technologiczne systemu produkcyjnego, ich cechy oraz powiązania – relacje ilościowe i jakościowe np. typu podzespół-część. Na tym etapie identyfikowane są też ograniczenia związane ze stosowaną technologią. Następnie ustalany jest zbiór zleceń produkcyjnych opisujący wymagane ilości i terminy realizacji wybranych produktów, opisanych przez procesy. Utworzony model stanowi podstawę przy określaniu konfiguracji systemu produkcyjnego. Do zarejestrowanych ograniczeń stosuje się podział na bezwzględne, czyli takie, których spełnienie jest wymagane w rozwiązaniu dopuszczalnym i względne, z których tworzone są kryteria oceny rozwiązań.

Ze względu na podjętą w pracy tematykę dotyczącą sposobu harmonogramowania operacji wielozasobowych z wykorzystaniem wybranych parametrów w dalszej części przybliżono wyłącznie charakterystykę zasobów produkcyjnych i uproszczony model zlecenia.

3.1. Zasoby produkcyjne

Do realizacji zleceń w systemie produkcyjnym wykorzystywane są różnego rodzaju zasoby. Podstawowy podział wyróżnia zasoby: odnawialne, nieodnawialne i podwójnie ograniczone. Zasób odnawialny po zakończeniu przydzielonej mu operacji może zostać użyty do realizacji kolejnej. Zasobami odnawialnymi są ludzie, stanowiska produkcyjne, maszyny i urządzenia, narzędzia, oprzyrządowanie itp. Zbiór dostępnych zasobów odnawialnych posiada zwykle ograniczoną tzw. pojemność oraz dostępność. Zasoby nieodnawialne, jak surowce, nakłady finansowe i energia są w operacjach bezpowrotnie zużywane, a przy planowaniu ograniczona jest najczęściej ich ilość globalna. W przypadku zasobów podwójnie ograniczonych, brane pod uwagę jest zarówno użycie, jak i zużycie, tj. ograniczona dostępność w danej chwili i łączne zużycie. Z punktu widzenia podzielności pracy zasoby różnią się zasoby ciągłe i dyskretne. Zasoby ciągłe mogą być rozdzielane w dowolnej ilości z dostępnego przedziału, dyskretne – tylko w określonych przedziałach wartości. Dalej rozpatrywane są wyłącznie zasoby odnawialne i dyskretne.

Zbiór dostępnych zasobów produkcyjnych R określony jest przez:

$$R = \{R_i, i=1, \dots, m\}$$

gdzie: R_i – i -ty zasób, m – liczba wszystkich dostępnych zasobów.

Zasoby w systemie produkcyjnym mogą mieć różny poziom specjalizacji (maszyny i urządzenia), kompetencji i predyspozycji (zasoby ludzkie) oraz możliwości wzajemnego zastępowania się [4, 6, 9, 10]. Zasoby, które mogą wykonać tę samą operację, nazywane są równoległymi. Kontekst konkretnej operacji lub zbioru operacji powoduje, że w zależności od rozpatrywanego zadania te same dwa zasoby mogą być równoległe przy jednej operacji a przy innej nie. Zasoby równoległe klasyfikowane są do jednego z trzech typów: identyczne (ang. *identical*), jednorodne (ang. *uniform*) oraz dowolne (ang. *unrelated*). Podstawą tej klasyfikacji jest parametr uwzględniający wydajność lub inaczej prędkość stanowiska (ang. *speed*). Zasoby, które wykonują daną operację z taką samą wydajnością, mierzoną najczęściej czasem jednostkowym, określane są jako identyczne. Zasoby są jednorodne, jeżeli mają stałą wydajność, określoną np. przez współczynnik wydajności. Współczynnik ten, niezależny od rodzaju przydzielonej operacji, pozwala na obliczenie czasu trwania każdej z operacji na tym zasobie. Najogólniej definiowaną grupę stanowią zasoby równoległe - dowolne. Wydajność zasobów może być różna i nieproporcjonalna w zbiorze operacji.

W systemach, w których rejestrowane są zasoby równoległe, pojawia się dodatkowe zadanie związane z wyborem zasobów ze zbioru równoległych do poszczególnych operacji (ang. *assignment problem*). Problem przydziału zasobów może być rozwiązywany przed zasadniczym harmonogramowaniem, jako osobne stadium, lub na bieżąco w trakcie harmonogramowania kolejnych operacji. Podejmowane działania w tym zakresie koncentrują się na monitorowaniu i równoważeniu obciążenia pomiędzy zasoby równoległe.

W związku z powyższym, na potrzeby planowania definiowane są grupy zasobowe określające podzbiory zasobów równoległych, które mogą wykonywać określoną operację lub grupę operacji:

$$GR_z = \{GR_{z,s}, s = 1, \dots, mg\}, \quad (1)$$

gdzie: GR_z – zbiór grup zasobowych, $GR_{z,s}$ – s -ta grupa zasobowa, mg – liczba zdefiniowanych grup zasobowych.

Zasoby w grupie mogą posiadać preferencje wyboru (stopień kwalifikacji) i -tego zasobu w s -tej grupie zasobów w postaci priorytetu lub wagi. Preferencje te mogą uwzględniać parametry ilościowe i jakościowe, czasowe, kosztowe, stałe i zmienne, i w zależności od tego, mogą być określone arbitralnie lub obliczane niezależnie w każdej sytuacji decyzyjnej. Stosowanie priorytetów w grupach jest przydatne zwłaszcza przy zasobach równoległych dowolnych, gdzie reprezentują możliwości stanowiska przy dostępnym uzbrojeniu, kwalifikacje oraz poziom umiejętności pracowników itp.

Zasób produkcyjny R_i (odnawialny, dyskretny) jest opisany przez:

$$R_i = (c_i, kj_i, LwGR_i, Ka_b), \quad (2)$$

gdzie: c_i – pojemność, kj_i – koszt jednostkowy pracy, $LwGR_i$ – lista przynależności do grup zasobów, Ka_b – b -ty kalendarz czasu pracy.

Pojemność stanowiska c_i określa maksymalną liczbę współbieżnie wykonywanych zadań na zasobie. Zasób z pojemnością większą od 1 to zasób, który może przetwarzać jednocześnie większą liczbę zadań. Koszt jednostkowy pracy zasobu k_{ji} jest parametrem wykorzystywanym przy wyznaczaniu kosztu zlecenia w danej marszrucie. Lista grup zasobów $LwGR_i$ określa zdolność do wykonania danych operacji lub grup operacji wraz z wartością wskaźnika priorytetu, wyrażającą stopień kwalifikacji w danej grupie.

Kalendarz czasu pracy (Ka_b) opisuje dysponowany fundusz czasu pracy i wyznacza przedziały dostępności danego zasobu do wykonywania operacji. Zasoby w systemie produkcyjnym mogą pracować według tego samego lub różnych kalendarzy:

$$\begin{aligned} Ka &= \{Ka_b, b=1, \dots, mk\}, \\ Ka_b &= \{Okr_c, c=1, \dots, mo_b\} \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie: Ka - zbiór kalendarzy, mk - liczba stosowanych kalendarzy, Ka_b - kalendarz czasu pracy, Okr_c - okres dostępności zasobu, mo_b - liczba okresów dostępności w kalendarzu.

3.2. Zlecenie produkcyjne

Zlecenie produkcyjne opisywane są przez parametry o charakterze technologicznym i organizacyjnym. Parametry technologiczne związane są ze stosowaną technologią wytwarzania, możliwościami zasobów, dostępnością narzędzi itp. i reprezentowane są przez proces technologiczny. Organizacyjne parametry zlecenia związane są między innymi z terminami: dyrektywnym (ang. due date), gotowości (ang. ready date), nieprzekraczalnym (ang. deadline), cechami ilościowymi tj. liczba sztuk, sposób podziału na partie, sposób przepływu partii, oraz innymi jak strategia harmonogramowania, waga (lub priorytet) zlecenia itp. Szczegółowy opis przyjętego modelu zlecenia oraz analizowanych struktur przedstawiono w [5]. W obszarze parametrów technologicznych zlecenia za podstawową część procesu przyjęto operację $O_{k,g}$ opisaną przez:

$$O_{k,g} = (Lwz_{k,g}, re_{k,g}), \quad (4)$$

gdzie: $Lwz_{k,g}$ - lista wymagań zasobowych operacji, $re_{k,g}$ - podzielność operacji,

Lista wymagań zasobowych ($Lwz_{k,g}$) określa grupy kompetencji i liczebność zasobów wymaganych do realizacji operacji:

$$\begin{aligned} Lwz_{k,g} &= \{So_{k,g}\}, \\ So_{k,g} &= (tj_{k,g}, tpz_{k,g}, minR_{k,g}, maxR_{k,g}, zam_{k,g}, ztj_{k,g}), \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie: $So_{k,g}$ - w k -ty podzbiór zasobów wymaganych w g -tej operacji, $tj_{k,g}$ - czas trwania operacji (jednostkowy), $tpz_{k,g}$ - czas przygotowawczo-zakończeniowy (lub nr grupy tpz), $minR_{k,g}$ - minimalna liczba zasobów przy operacji, $maxR_{k,g}$ - maksymalna liczba zasobów przy operacji, $zam_{k,g}$ - zamienność zasobów, $ztj_{k,g}$ - sposób zużycia czasu jednostkowego przez zasoby w grupie.

4. Warianty harmonogramowania operacji wielozasobowych

W rozdziale zaprezentowano przykłady harmonogramowania operacji w zależności od przyjętej wartości parametru proporcjonalności czasu trwania operacji do liczby

przydzielonych zasobów oraz harmonogramowania operacji w grupach zasobów. Należy mieć na uwadze, że nie wszystkie kategorie zasobów będą umożliwiały realizację przedstawionych wariantów z uwzględnieniem przyjętych wartości poszczególnych parametrów.

4.1. Zużycie czasu jednostkowego

Rozważany jest system produkcyjny składający się z 3 zasobów, $R1-R3$. Wartości parametrów zasobów systemu produkcyjnego wg zależności (2) zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Opis zasobów systemu produkcyjnego

Nazwa zasobu	R_i	c_i	k_{z_i}	$LwGR$	priority	Ka_b
Zasób 1	R_1	1	1	GR_{z_1}	1	Ka_1
Zasób 2	R_2	1	1	GR_{z_1}	2	Ka_2
Zasób 3	R_3	1	1	GR_{z_1}	3	Ka_3

Zasoby pracują według indywidualnych kalendarzy, wyrażających okresy dostępności w umownych jednostkach czasu:

$$Ka_1 = \{(0,1) (4, \infty)\},$$

$$Ka_2 = \{(0,2) (4,6) (7, \infty)\},$$

$$Ka_3 = \{(0,5) (7,9) (11, \infty)\}.$$

W systemie należy zaplanować jednooperacyjne zlecenie o wartościach parametrów zestawionych w tabeli 2. w wariantach stałego czasu jednostkowego oraz proporcjonalnego do liczby zajętych zasobów.

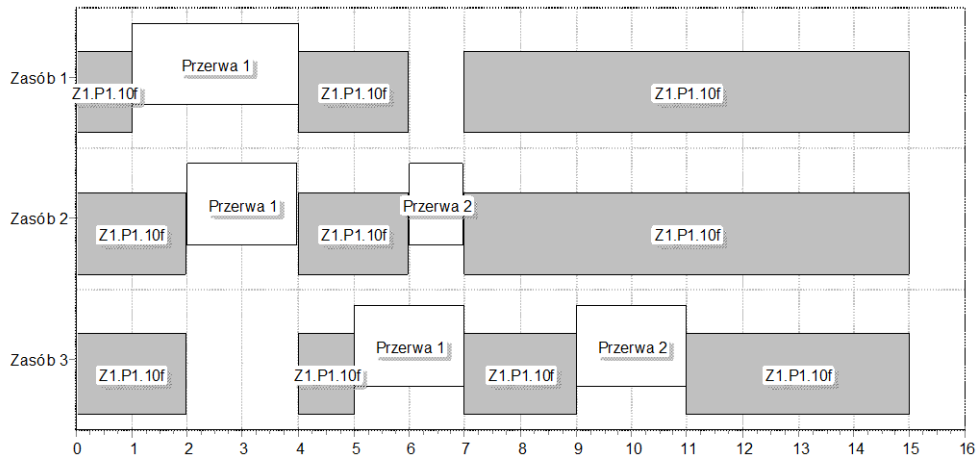
Tab. 2. Opis stałych parametrów zlecenia

Zlecenie	Proces	Operacja	Grupa zasobowa	minR.	maxR.	tj	tpz	zam
$Z1$	$P1$	$O1,1$	GR_{z1}	2	3	12	0	Nie

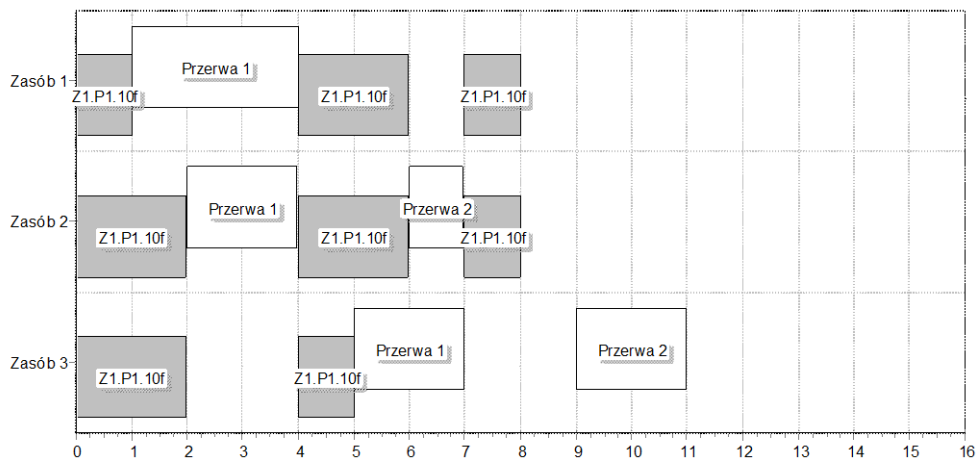
Przydział analizowanej operacji do zasobów z uwzględnieniem stałego czasu jednostkowego operacji ($z_{ij,1,1} = \text{const}$) przedstawiono na rys. 2. Operacja rozpoczyna się z udziałem trzech (maksymalnej liczby) zasobów w przedziale (0-1), następnie w przedziale (1-2) jest kontynuowana przez 2 zasoby. W przedziałach (2-4) i (6-7) operacja jest wstrzymana ze względu na niedostępność minimalnej liczby zasobów. Przerwy te wpłynęły na wydłużenie okresu pobytu zadania w systemie do 15. jednostki czasu.

Na rys. 3. przedstawiono przydział operacji od zasobów z uwzględnieniem proporcjonalnego zużycia czasu jednostkowego do liczby pracujących zasobów (parametr $z_{ij,1,1} = f_{prop}$).

Okres pobytu zlecenia, z uwzględnieniem przerw wynosi 8. Zasób 1 zużył 4 jednostki czasu operacji, zasób 2 – 5 a zasób 3 – 3 jednostki czasu.



Rys. 2. Przydział operacji z czasem jednostkowym stałym



Rys. 3. Przydział operacji z proporcjonalnym zużyciem czasu operacji

4.2. Harmonogramowanie w grupach zasobowych

Rozważany system produkcyjny składa się z 8 zasobów, w trzech rozłącznych grupach kompetencji (zasoby może należeć tylko do jednej grupy kompetencji). Opis zasobów systemu produkcyjnego zestawiono w tabeli 3.

Przedmiotem planowania jest jednooperacyjne zlecenie o wartościach parametrów zestawionych w tabeli 4.

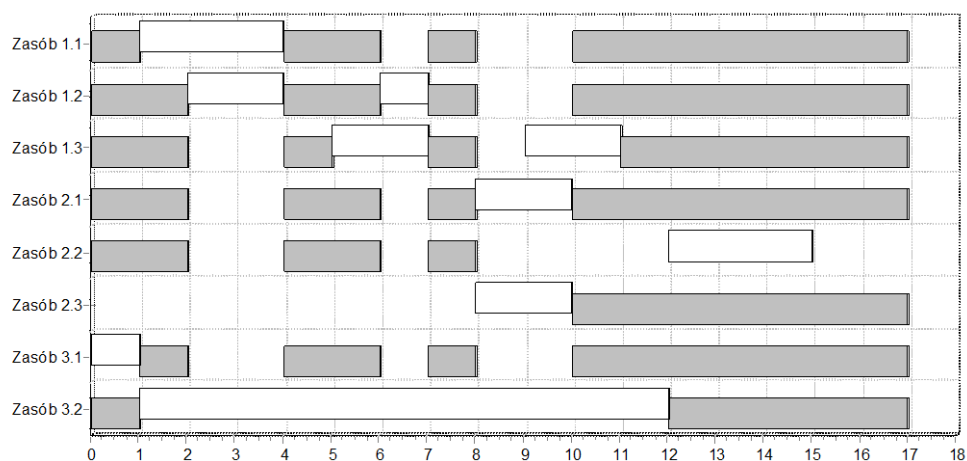
Na rys. 4. przedstawiono rozdział analizowanej operacji na zasobach w poszczególnych grupach kompetencji.

Tab. 3. Parametry zasobów systemu produkcyjnego

Nazwa zasobu	R_i	c_i	k_{z_i}	$LwGR$	priorytet	Ka_b
Zasób 1.1	R_1	1	1	GR_{z1}	1	Ka_1
Zasób 1.2	R_2	1	1	GR_{z1}	2	Ka_2
Zasób 1.3	R_3	1	1	GR_{z1}	3	Ka_3
Zasób 2.1	R_4	1	1	GR_{z2}	1	Ka_4
Zasób 2.2	R_5	1	1	GR_{z2}	2	Ka_5
Zasób 2.3	R_6	1	1	GR_{z2}	3	Ka_6
Zasób 3.1	R_7	1	1	GR_{z3}	1	Ka_7
Zasób 3.2	R_8	1	1	GR_{z3}	2	Ka_8

Tab. 4. Opis parametrów zlecenia

Zlecenie	Proces	Operacja	Grupa	minR.	maxR.	tj	tpz	zam	ztj
Z1	P1	O1,1	GR_{z1}	2	3	12	0	Tak	const
			GR_{z2}	2	2	12	0	Tak	const
			GR_{z3}	1	2	12	0	Tak	const



Rys. 4. Rozplanowanie operacji pomiędzy zasoby w grupach kompetencji 1-3.

Okres pobytu operacji w systemie trwa 18 jednostek czasu. Ma na to wpływ wartość parametru $ztj = const$ oraz przerwy w realizacji operacji wynikające z przyjętego kalendarza oraz z braku minimalnej liczby zasobów. Ustawienie parametru $zam = true$ w przypadku grupy GR_{z2} umożliwia zmianę zasobów w trakcie realizacji operacji (Zasobu 2.2 na Zasób 2.3).

5. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano rozszerzenie modelu zadania harmonogramowania oraz przykłady implementacji związane z rozdziałem operacji na większą liczbę zasobów z uwzględnieniem grup zasobowych (kompetencji). W modelu, w opisie operacji przydział zasobów następuje pośrednio przez grupę kompetencji a przydział konkretnych zasobów z grupy realizowany jest podczas układania harmonogramu. Włączono do opisu operacji

parametry dotyczące wymaganej liczby zasobów z zadanego przedziału, opcjonalną możliwość zamiany zasobów w trakcie trwania operacji w ramach tej samej grupy kompetencji oraz parametr zużycia czasu trwania w zależności od liczebności zaangażowanych zasobów. Zabiegi te wpływają znacząco na zwiększenie elastyczności planowania i umożliwiają lepsze wykorzystanie zasobów. Przedstawione przykłady demonstrują sposoby przydziału grupy zasobów do operacji w zależności od wartości parametru określającego proporcjonalność zużycia czasu operacji w dwóch wariantach: proporcjonalnie do liczby zaangażowanych „jednostek” zasobowych i niezależnie od liczby pracujących zasobów.

Przedstawione rozwiązania znajdują zastosowanie przy harmonogramowaniu procesów produkcyjnych, zarówno obróbkowych jak i montażowych, w których zasoby limitowane, podlegające planowaniu należą do różnych grup kompetencji (np. stanowiska i zasoby ludzkie z różnymi kompetencjami itp.) i wymagają równoczesnego przydziału do danej operacji. Obszar potencjalnych zastosowań proponowanego podejścia jest również przy operacjach, w których obecność zasobów z danych grup kompetencji nie musi pokrywać się z czasem operacji, np. gdy do manipulacji przedmiotem w strefie obróbki wymagany jest dodatkowy pomocnik a przy samej obróbce pozostaje sam operator, przy operacji pracownicy zmieniają się okresowo czy też wydajność pracy w zespole zależy od liczby pracowników.

Zaprezentowane przykłady przygotowano w systemie harmonogramowania produkcji KbRS [12], w którym omawiana metodyka została zaimplementowana.

Proponowane kierunki dalszych prac w tym obszarze dotyczą analizy innych sposobów wyliczania czasu trwania operacji z udziałem wielu zasobów, np. uwzględniających zróżnicowaną wydajność poszczególnych zasobów w danej grupie, jak również nieproporcjonalne skracanie czasu trwania operacji wraz ze wzrostem liczby zaangażowanych zasobów.

Literatura

1. Artigues Ch., Demassez S., Neron E.: *Resource-Constrained Project Scheduling: Models, Algorithms, Extensions and Applications*, John Wiley & Sons, Portland, 2010.
2. Błażewicz J., Ecker K.H., Pesch E., Schmidt G., Węglarz J.: *Scheduling Computer and Manufacturing Processes*, Springer, Berlin, 2007.
3. Brucker P., Knust S.: *Complex Scheduling*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2012.
4. Edis E. B., Oguz C., Ozkarahan I.: Parallel machine scheduling with additional resources: Notation, classification, models and solution methods, *European Journal of Operational Research* 230, 2013, 449–463.
5. Kalinowski K.: *Harmonogramowanie dyskretnych procesów produkcyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2013.
6. Kalinowski K., Grabowik C., Paprocka I., Kempa W.: Production scheduling with discrete and renewable additional resources. *IOP Conference Series; Materials Science and Engineering*; vol. 95 1757-8981, 2015, 1-6.
7. Kalinowski K., Gwiazda A., Ćwikła G.: Problematyka integracji systemu harmonogramowania produkcji z oprogramowaniem klasy ERP. W: *Metody i techniki kształtowania procesów produkcyjnych*. Monografia pod red. Józefa Matuszka. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku Białej. Bielsko-Biała, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, 2016, 141-152.

8. Klein R. Scheduling of Resource-Constrained Projects. Volume 10 of the series Operations Research/Computer Science Interfaces Series, Springer-Science+ Business Media, LLC, 2000.
9. Rattanathamrong P., Fortes J.: Real-time scheduling of mixture-of-experts systems with limited resources, in: Proceedings of the 13th ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control, HSCC 2010, Stockholm, 2010, 71-80.
10. Van den Bergh J., Beliën J., De Bruecker P., Demeulemeester E., De Boeck L.: Personnel scheduling: A literature review, European Journal of Operational Research 226, 2013, 367-385.
11. Weglarz J., Józefowska J., (Eds.) Perspectives in modern project scheduling. Springer, N.Y., 2006. Józefowska J., Just-in-time scheduling (Models and algorithms for computer and manufacturing systems). . Springer, N.Y., 2006.
12. <http://imms.home.pl/kbrs> [dostęp 15.01.2017]

Dr hab. inż. Krzysztof KALINOWSKI

Dr hab. inż. Cezary GRABOWIK

Dr hab. inż. Grzegorz ĆWIKŁA

Dr hab. inż. Aleksander GWIAZDA

Dr inż. Zbigniew MONICA

Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych

i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania

Politechnika Śląska

44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18A

tel./fax: (0-32) 237 24 59/ : (0-32) 237 16 24

e-mail: krzysztof.kalinowski@polsl.pl

Cezary.Grabowik@polsl.pl

[Grzegorz.Ćwikła@polsl.pl](mailto:Grzegorz.Cwikla@polsl.pl)

Aleksander.Gwiazda@polsl.pl

Zbigniew.Monica@polsl.pl