

**Mgr inż. Eryk Szwarc**  
**Dr hab. inż. Grzegorz Bocewicz, prof. PK**  
**Prof. dr hab. inż. Zbigniew Banaszak**

Wydział Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Koszalińska  
ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, Polska  
e-mail: eryk.szwarc@tu.koszalin.pl  
bocewicz@ie.tu.koszalin.pl  
zbigniew.banaszak@tu.koszalin.pl

**Dr inż. Jarosław Wikarek**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki  
Politechnika Świętokrzyska  
Al 1000-lecia Państwa Polskiego, 25-314 Kielce, Polska  
e-mail: j.wikarek@tu.kielce.pl

## **Planowanie przydziału kompetencji odpornego na nieprzewidziane absencje pracowników**

**Słowa kluczowe:** przydział zadań, planowanie odporne, kompetencje pracowników, odporna struktura kompetencji, absencje pracownicze

**Streszczenie:** Funkcjonowanie organizacji w warunkach występowania nieprzewidzianych absencji pracowników i/lub zmieniającego zapotrzebowania na pracowników o określonych kwalifikacjach wymusza działania mające na celu bądź to budowę, odpowiednio przygotowanego zespołu pracowników (dostosowanego do możliwości wystąpienia zidentyfikowanego zakłócenia), bądź też wprowadzania, w trybie online, zmian w przyjętym planie realizacji zadań niwelujących skutki wystąpienia zidentyfikowanego zakłócenia. W pracy rozważane jest pierwsze z ww. działań. Mając na celu opracowanie metody interakcyjnego planowania przydziału zadań przedstawiona została koncepcja struktury kompetencji odpornej na zakłócenia absencji pracowniczej. Wykorzystywany w niej model, umożliwia poszukiwanie struktur kompetencji gwarantujących dostosowanie kompetencji wykonawcy do wymagań danego zadania w sytuacjach występowania zakładanego rodzaju zakłóceń, np. powodowanych absencją pracowników. Z uwagi na fakt, że sprowadzający się do syntezy odpornych struktur kompetencji problem planowania odpornego przydziału kompetencji umożliwiającego substytucję redundantnych kompetencji należy do klasy problemów NP-trudnych, wyznaczane są również warunki wystarczające spełnienie których gwarantuje istnienie jakiegokolwiek poszukiwanej struktury dopuszczalnej. Możliwości praktycznego wykorzystania przedstawianego podejścia zilustrowane zostało na przykładach.

### **1. Wstęp**

Celem planowania potrzeb personalnych wchodzących w zakres planowania zatrudnienia jest określenie profili kompetencyjnych dla pracowników i innych osób zatrudnionych w przedsiębiorstwie. W szczególności dotyczy ono określenia wymogów odnoszących się do wiedzy, umiejętności, zdolności oraz zachowań zatrudnionych osób, ustalenia liczby pracowników w wyodrębnionych kategoriach stanowisk pracy, oraz zakresu realizowanych tam prac. O jakości uzyskiwanych w tym procesie planów zatrudnienia decyduje odporność realizowanego procesu produkcyjnego na zakłócenia implikowane występowaniem nieoczekiwanych zdarzeń, takich jak nieobecność pracowników, awarie maszyn, wypadki przy

pracy itp. Aby poradzić sobie z tymi niepewnościami, organizacje muszą przyjąć działania mające na celu bądź to budowę, odpowiednio przygotowanego zespołu pracowników (charakteryzującego się pewną nadmiarowością oferowanych kompetencji), bądź też wprowadzania, w trybie online, zmian w przyjętym planie realizacji zadań niwelujących skutki wystąpienia zidentyfikowanego zakłócenia. W pracy rozważane jest pierwsze z ww. działań, w którym przez antycypację możliwych zakłóceń budowany jest zespół pracowników o określonych kompetencjach, który będzie odporny na wybrany zbiór zakłóceń.

Należy zauważyć, że decyzje podejmowane w procesie planowania przydziału zadań produkcyjnych (wymagających określonych kompetencji pracowniczych) do zasobów (pracowników o zadanych kompetencjach) podejmowane są w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu organizacji [6], implikującym częste zmiany w zakresie i strukturze celów, zadań i zasobów. Przykładem takich zmian są m.in.: absencje pracowników (zwolnienia lekarskie, wypadki, urlopy macierzyńskie itp.), zmiany liczby zadań, mobilność kadry (częste zmiany zatrudnienia) itp. Większość z nich ma charakter losowy i nie może być przewidziana z odpowiednim wyprzedzeniem. Tego typu zdarzenia nazywane są dalej zakłóceniami [5, 19]. Jeśli skutkiem zakłócenia powodowanego absencją pracownika jest tzw. luka kompetencyjna, to na jej wypełnienie np. poprzez wprowadzenie odpowiednich zmian (szkolenie, zatrudnienie, outsourcing itp.) jest już zwykle za późno. O ile w dostępnej literaturze przedmiotu można spotkać wiele metod z zakresu oceny i wyznaczania struktur kompetencji, o tyle wciąż brakuje prac podejmujących problematykę planowania struktur gwarantujących osiągnięcie celów biznesowych w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu, tzw. struktur odpornych na zakłócenia. Brakuje natomiast możliwości przewidywania zakłóceń i kształtowania struktur kompetencji odpornych na wybrane rodzaje zakłóceń. Przez odporną strukturę kompetencji rozumiana jest taka jej postać, która gwarantuje realizację zleczanych zadań w warunkach występowania określonych rodzajów zakłóceń. Z kolei przez przydział kompetencji rozumie się dalej dostosowanie kompetencji pracownika (wykonawcy) do wymagań realizacji danego zadania, w szczególności uwzględniające występowanie zakładanego rodzaju zakłóceń. Warto zauważyć, że rozważane zagadnienie przydziału pracowników (widzianych przez pryzmat posiadanych przez siebie kompetencji) do poszczególnych czynności (operacji, stanowisk) realizowanego zadania należy do klasy problemów przydziału zadań (ang. task assignment problems). Problemy tego typu występują w wielu obszarach nauki i biznesu, jak np. w zagadnieniach dystrybucji towarów, zarządzania produkcją, telekomunikacji, planowania dyżurów itp. i sprowadzają się do przyporządkowania znanego zbioru zadań do danego zbioru realizujących go agentów (np. pracowników, pojazdów, procesorów, magazynów). W ogólnym przypadku, różne problemy przydziału mogą akcentować różne funkcje celu sprowadzające się np. do minimalizacji czasu ukończenia wszystkich zadań, minimalizacji kosztów, maksymalizacji zysku, minimalizacji sumarycznie przebytych tras, itp.

Badania podejmujące problematykę planowania struktur kompetencji odpornych na zakłócenia, podobnie jak to ma miejsce w przypadku harmonogramowania odpornego, noszą też raczej wstępny, koncepcyjny charakter. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest NP-trudny charakter rozważanej klasy problemów. Wyniki wstępnych badań, mających na celu opracowanie metody syntezy struktur kompetencji odpornych na wybrany zbiór zakłóceń [38, 39] potwierdzają atrakcyjność rozważań wywodzących się z paradygmatu modelowania deklaratywnego. Deklaratywny model problemu przydziału zadań i harmonogramowania ich realizacji umożliwia opracowanie interakcyjnych metod planowania przydziału kompetencji bezpośrednio implementowanych w środowiskach informatycznych takich jak ECLiPSe [46], IBM ILOG CPLEX [47] czy OzMozart [48] bazujących na paradygmacie programowania deklaratywnego.

W kolejnym rozdziale przedstawiono aktualny stan badań z zakresu planowania przydziału zadań w warunkach występowania nieprzewidzianych absencji pracowników. W

rozdziale 3 zaproponowano model referencyjny umożliwiający poszukiwanie struktur kompetencji gwarantujących planowanie przydziału kompetencji odpornego na zbiór przewidywanych rodzajów zakłóceń, np. absencji pojedynczych pracowników. Bazując na opracowanym modelu, w rozdziale 4 przedstawiono propozycję metody postępowania przy ocenie i syntezie struktur kompetencji odpornych na zakłócenia. W rozdziale 5 zaprezentowano eksperymenty obliczeniowe, wykonane w środowisku IBM ILOG CPLEX, ilustrujące możliwości wykorzystania proponowanej metody. Wnioski, a także kierunki dalszych badań przedstawiono w rozdziale 6.

## 2. Przegląd literatury

W literaturze przedmiotu kompetencje definiowane są w różny sposób. W pracy [8] przez kompetencje pracownika rozumiane są jego ogólne zdolności oparte na wiedzy, doświadczeniu, wartościach oraz skłonnościach, nabytych w wyniku oddziaływań edukacyjnych. Kompetencje definiowane są również jako zbiór wiedzy teoretycznej, umiejętności praktycznych oraz zachowania umożliwiającego skuteczną realizację postawionych zadań [24]. Z kolei w pracy [43] traktowane są jako zbiór wzorców zachowania potrzebnych do prawidłowego wykonania zadań lub funkcji. Na potrzeby niniejszej pracy (zgodnie z [24]) przez kompetencje rozumie się zbiór wiedzy, umiejętności, doświadczenia, kwalifikacji, który pozwala zrealizować (przydzielone) zleczone zadania.

Działania ukierunkowane na identyfikowanie, pozyskiwanie, rozwijanie i zatrzymywanie w organizacji takich kompetencji pracowniczych, które umożliwiają realizowanie celów biznesowych [22] wchodzą w zakres procesów zarządzania zasobami ludzkimi, w szczególności zarządzania opartego na kompetencjach. Występujące w tym zakresie problemy obsady stanowisk sprowadzają się w zasadzie do przydziału zadań (rozdziału pracy pomiędzy pracownikami dysponującymi odpowiednimi kompetencjami) oraz harmonogramowania pracy (rozdziału zadań wraz z ustaleniem okien czasowych ich realizacji), ekstremalizujących wybrane kryteria jakości organizacji, np. efektywności produkcji, czasu realizacji zleceń, odporności na zakłócenia itp.

W procesie planowania obsady stanowisk produkcyjnych wyróżnia się etapy: strategicznego (długoterminowego) planowania struktury personelu dotyczącego zapewnienia zdolności/możliwości kadrowych (np. gwarantujących wymagane kompetencje personelu) planowanych zdolności produkcyjnych, taktycznego (średnioterminowego) harmonogramowania/planowania struktury, koncentrującego się na przydziale konkretnych zadań do pracowników (przydział zadań/pracy), operatywnego (krótkoterminowego) planowania przydziału bieżących zadań do dostępnych pracowników (inaczej planów obsady) [1, 7]. W literaturze znanych jest wiele metod i modeli wspierających tego typu decyzje w zakresie oceny kompetencji, identyfikacji luk kompetencyjnych, wariantowania zmian strukturze kompetencji itp. [2, 16, 21, 26, 27, 34]. Funkcjonalności tego typu posiadają niektóre z komercyjnie dostępnych narzędzi IT jak: TETA HR, KARO HRMS, Comarch HRM, Asseco Softlab HRM itp. [44, 45, 49, 50].

Czynnikiem decydującym o jakości generowanych harmonogramów pracy i przydziałów zadań jest ich odporność na zakłócenia powodowane [42] niepewnością wymagań w zakresie realizowanych zadań (ang. uncertainty of demand) i/lub terminów ukończenia zadań (ang. uncertainty of arrival) związaną z nieprzewidywanym obciążeniem pracą (przedłużającym się czasem konserwacji maszyn, nie znaną liczbą pacjentów w szpitalu itp.), niepewnością oceny posiadanych zdolności/możliwości (ang. uncertainty of capacity) spowodowaną np. chorobami pracowników, awariami maszyn itp. Powszechnie stosowane podejścia, wykorzystywane do poprawy odporności przydziałów zadań, implementują bądź to zasadę harmonogramowania reaktywnego (polegającego na modyfikacji realizowanego

harmonogramu, zgodnie ze zidentyfikowanym zakłóceniem), bądź też harmonogramowania proaktywnego (uwzględniającego w wyborze odpornych składów pracowników i/lub harmonogramów różne rodzaje zakłóceń) [12, 20].

Często wykorzystywane podejście umożliwiające poprawę odporności przydziałów zadań, sprowadza się do wprowadzenia buforów czasu lub buforów możliwości (potencjału/zasobów). Bufory czasu (najczęściej rozumiane jako dodatkowe okna czasowe pozwalające na ukończenie opóźnionych zadań) wykorzystywane są w zarządzaniu projektami w sytuacjach związanych z występowaniem niepewnych czasów trwania [17], nieoczekiwanymi opóźnieniami terminów ukończenia zadań [12, 13, 40]. Z kolei tzw. bufory możliwości (rozumiane jako dodatkowe zasoby), nazywane również rezerwami kadrowymi (rezerwy załogi, zasobów itp.) wykorzystywane są często w usługach, np. transporcie pasażerskim, obsłudze szkół, szpitali itp. [10] gdzie często występującymi zakłóceniami są choroby pracowników [10, 29], awarie techniczne [9, 11, 18, 31, 32, 37, 41]. Jednym z przykładów tego typu podejść tzn. zakładających konieczność posiadania nadmiarowych zasobów (finansowych, rzeczowych, ludzkich) jest, przedstawione w pracy [2], rozwiązanie pozwalające wyznaczyć strukturę kompetencji, minimalizującą ryzyko niewykonania realizowanych w niej zadań (ryzyka będącego skutkiem wystąpienia określonego typu zakłócenia).

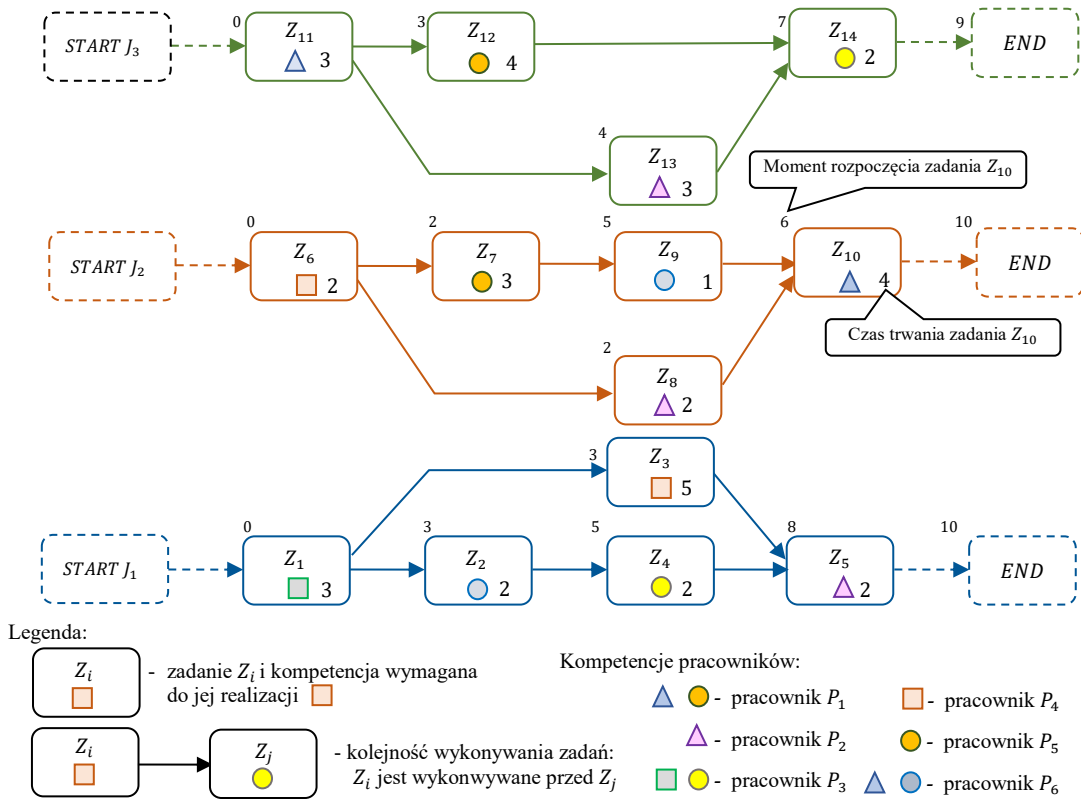
Łatwo zauważyć, że wprowadzenie rozwiązań wykorzystujących koncepcję buforu umożliwi zwiększenie odporności wyznaczanych planów (tak przydziału jak i harmonogramów) wszystko to jednak kosztem zwiększenia nakładów ponoszonych w związku z utrzymaniem niezbędnej redundantnej kadry. W pracach [15, 23, 25, 28] pokazano, że redundancja zasobów wpływa na sprawność organizacji (rozumianą jako zdolność organizacji do realizacji zadań mimo wystąpienia zakłóceń). Autorzy tych prac pomijają jednak ocenę ilościową wpływu kompetencji posiadanej kadry pracowniczej na jakość oraz odporność na zakłócenia procesów realizowanych w organizacji.

### 3. Modelowanie przydziału kompetencji

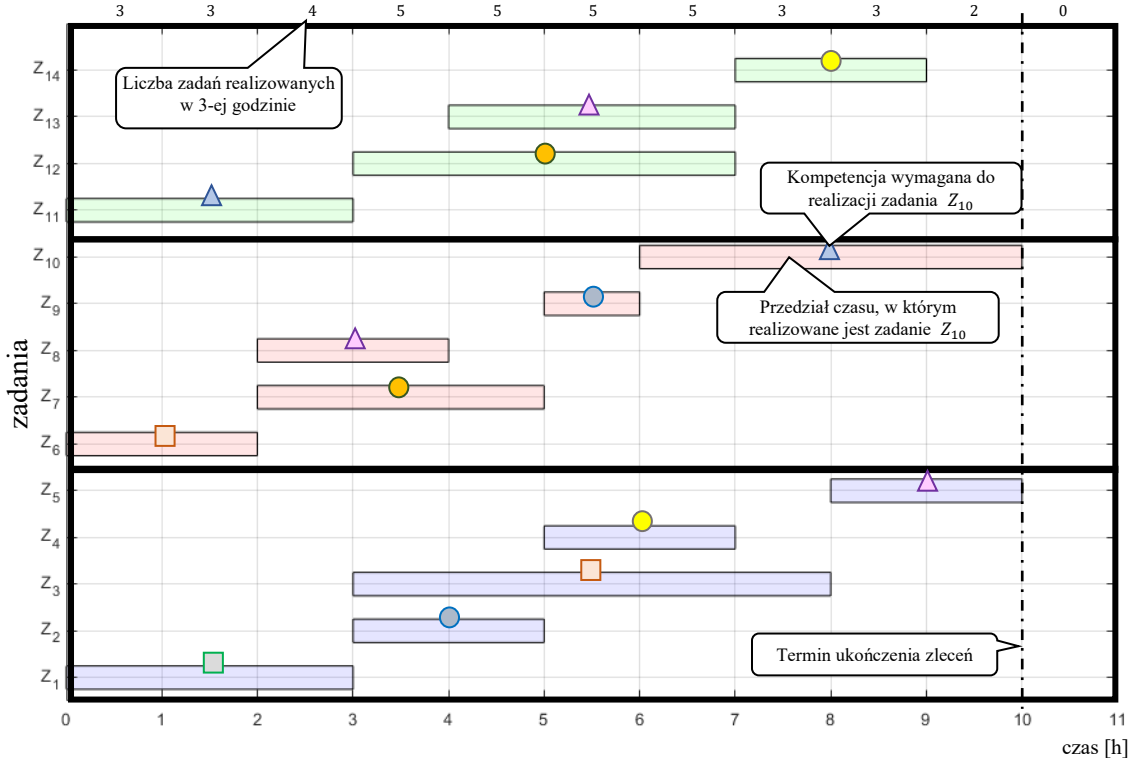
#### 3.1. Przykład motywacyjny

W przedsiębiorstwie realizowana jest cykliczna produkcja wieloasortymentowa, w ramach której dziennie wykonywane są 3 zlecenia produkcyjne:  $\{J_1, J_2, J_3\}$  – Rys. 1. Każde zlecenie obejmuje zbiór zadań  $Z_i$ :  $J_1 = \{Z_1, \dots, Z_5\}$ ,  $J_2 = \{Z_6, \dots, Z_{10}\}$ ,  $J_3 = \{Z_{11}, \dots, Z_{14}\}$ , realizowanych w zadanym porządku technologicznym, czasy trwania  $l_i$  poszczególnych zadań, oraz determinowaną ścieżką krytyczną harmonogram wykonania zadań – Rys. 2. Przykładowo, zadania zlecenia  $J_1$  są wykonywane zgodnie z marszrutą oznaczoną kolorem niebieskim, a ich czasy trwania wynoszą odpowiednio: 3h dla  $Z_1$ , 2h dla  $Z_2$ , 5h dla  $Z_3$ , 2h dla  $Z_4$  oraz 2h dla  $Z_5$ . Przyjęty harmonogram realizacji zleceń zakłada możliwość ich ukończenia w terminie 10h (10h dla  $J_1, J_2$  oraz 9h dla  $J_3$ ).

Każdego dnia do realizacji zadanych zleceń przydzielany jest zespół składający się 6 pracowników:  $\{P_1, \dots, P_6\}$ . Pracownicy posiadają różne kompetencje. Przyjętą strukturę kompetencji  $G$  przedstawia Tabela 1, w której wartości komórek (oznaczonych dalej przez zmienną  $g_{k,i}$ ) określają czy dany pracownik  $P_k$  posiada kompetencje (wartość „1”) do realizacji zadania  $Z_i$ . Przykładowo, pracownik  $P_1$  posiada kompetencje (oznaczone symbolami  $\triangle$   $\circ$ ) konieczne do realizacji zadań  $Z_7, Z_{10}, Z_{11}$  oraz  $Z_{12}$ .



Rys. 1. Struktura zleceń produkcyjnych  $J_1, J_2, J_3$



Rys. 2. Harmonogram realizacji zleceń z Rys. 1

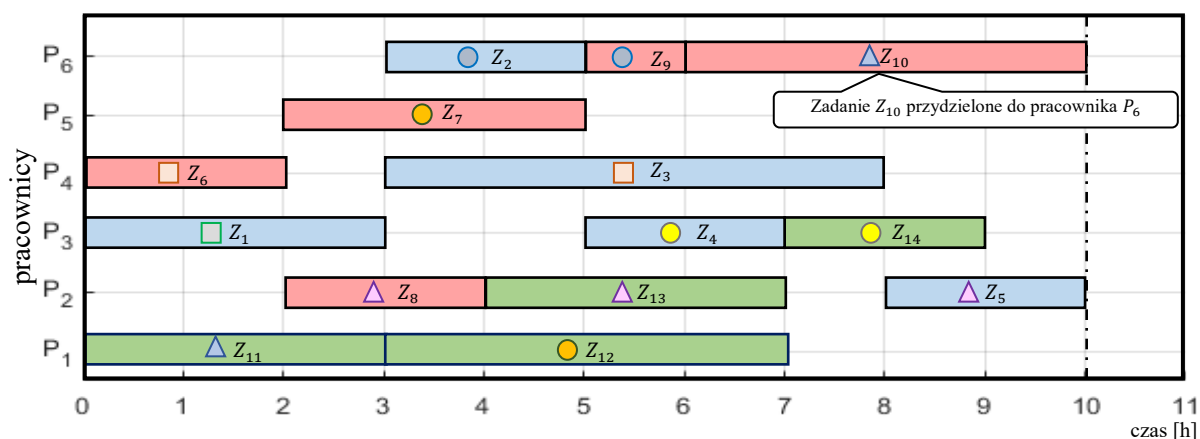
Tabela 1. Struktura kompetencji zespołu pracowników  $P_1, \dots, P_6$ 

$G$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{10}$	$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{13}$	$Z_{14}$
$P_1$ $\triangle \bullet$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
$P_2$ $\triangle$	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
$P_3$ $\square \bullet$	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$P_4$ $\square$	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_5$ $\bullet$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
$P_6$ $\triangle \bullet$	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

Przyjmuje się, że na czas wykonywania zadania  $Z_i$  rezerwowany jest dokładnie jeden pracownik posiadający wymagane do realizacji tego zadania kompetencje. Realizowane zadanie nie może zostać przerwane a pracownik jest zwalniany dopiero po jego ukończeniu. Ponadto zakłada się, że zaangażowanie pracowników na rzecz realizacji zadanych zleceń nie może być mniejsze niż 2h i nie większe niż 8h. W ogólnym przypadku przyjmowane limity czasowo ograniczonego przyporządkowania pracowników do poszczególnych zadań mogą być ustalane w sposób arbitralny lub też mogą wynikać z analizy realizowanych zaleceń np. dolnego progu opłacalności utrzymywania pracownika implikującego jego zaangażowanie w innym projekcie.

W kontekście wyżej przedstawionej specyfikacji rozważmy następujące pytanie: Czy dostępny zespół pracowników  $\{P_1, \dots, P_6\}$  pozwoli na terminową (10h) realizację zadanych zleceń  $\{J_1, J_2, J_3\}$ ?

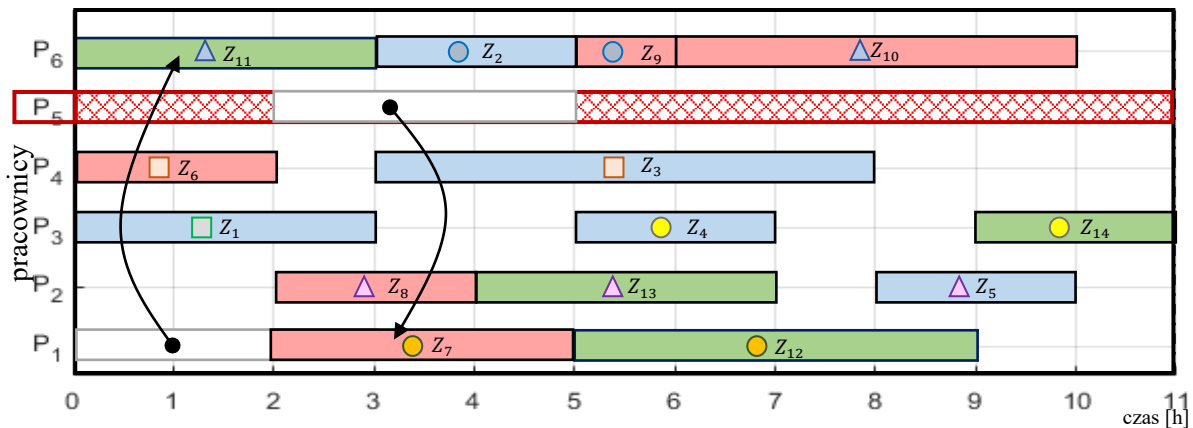
Na Rys. 3. przedstawiony został harmonogram ilustrujący dopuszczalny przydział zadań, gwarantujący ukończenie zadanych zleceń odpowiednio w ciągu 9 i 10 godzin. Przykładowo zadania  $Z_2$ ,  $Z_9$  i  $Z_{10}$  przydzielone zostały pracownikowi  $P_6$ . Obciążenie pracowników w takim rozwiązaniu wynosi od 3h (pracownik  $P_5$ ) do 7h (pozostali pracownicy). Warto zauważyć, że o ile dostępny zespół pracowników jest w pełni wystarczający do realizacji zleceń w warunkach braku zakłóceń, o tyle nie wiadomo czy jest on również wystarczający w sytuacji związanej z absencją jednego (dowolnego) pracownika. Przyjmując, że dalsze rozważania ograniczają się do struktur kompetencji zakłócanych przez jednostkowe (pojedynczo występujące) absencje pracowników przyjmuje się jednocześnie, że zakłócenia te znane są odpowiednio wcześniej np. na początku dziennej zmiany, tzn. na etapie planowania przydziału zadań.



Rys. 3. Przydział kompetencji pracowników do realizowanych zadań (Rys. 2)



W rozważanym przypadku ocena odporności wcześniej przyjętej struktury kompetencji (tab. 1) sprowadza się do odpowiedzi na pytanie: *Czy struktura kompetencji G jest odporna na absencję jednego pracownika?* Inaczej mówiąc: *Czy możliwy jest taki przydział zadań, który pozwoli na realizację zadań zgodnie z harmonogramem z Rys. 2 oraz na zachowanie limitów godzin pracy dla wszystkich pozostających w dyspozycji pracowników?* Przykładowo w przypadku absencji pracownika  $P_5$  stosowny przydział zadań ilustruje Rys. 4.



Rys. 4. Przydział kompetencji pracowników do zadań w sytuacji absencji pracownika  $P_5$

Nieobecność tego pracownika wymusza przejęcie jego obowiązków (realizacja zadania  $Z_7$ ) przez pracownika  $P_1$  (tylko ten pracownik posiada kompetencje do realizacji zadania  $Z_7$ ). Część obowiązków  $P_1$  (zadanie  $Z_{11}$ ) zostaje przejęta przez pracownika  $P_6$ . Taka organizacja przydziału zadań pozwala na ukończenie wszystkich zleceń jednak w terminie przekraczającym 10h (zlecenie  $J_1$  kończy się po 11h) oraz skutkuje zwiększeniem obciążenia pracownika  $P_6$  przekraczającym dopuszczalną wartość 8h. Analogiczna analiza pozostałych przypadków absencji pracowników pokazała, że w każdym z nich dochodzi do przekroczenia terminu 10h. Przekroczenie zadanego terminu dla każdego przypadku absencji pracownika oznacza brak odporności struktury kompetencji  $G$  na tego typu zakłócenie. Inaczej mówiąc w obliczu zagrożenia absencją pojedynczego pracownika, przedsiębiorstwo nie jest w stanie zagwarantować terminowej realizacji zleceń. Warto zauważyć, że przyjęta definicja odporności nie dopuszcza zmian w harmonogramie realizacji zleceń (Rys. 2). W praktyce może okazać się, że niekiedy niewielka zmiana w harmonogramie może umożliwić terminową realizację zleceń nawet w sytuacji absencji pojedynczego pracownika. Przypadki dopuszczające zamiany w przyjętym harmonogramie podobnie jak zmiany powodowane przez inne rodzajów zakłóceń stanowią przedmiot równoległe prowadzonych badań.

Uogólniona wersja wcześniej sformułowanego pytania przyjmuje postać: *Jak powinna wyglądać struktura kompetencji odporna na zakłócenie związane z absencją dowolnego jednego pracownika?* Inaczej mówiąc: *Który pracownik, jakie kompetencje powinien zdobyć aby zagwarantować odporność struktury kompetencji na zadany rodzaj zakłóceń?* Zakłada się przy tym, że każdy pracownik może zdobyć kompetencje umożliwiające realizację każdego z zadań  $Z_1, \dots, Z_{14}$ , to znaczy nie są rozważane tzw. bariery kompetencyjne [22].

Tak postawiony problem syntezy struktur kompetencji odpornych na wybrany zbiór zakłóceń należy do klasy problemów NP-trudnych. Łatwo zauważyć, że przestrzeń przeszukiwań w rozważanym przypadku ( $m = 6$  pracowników,  $n = 14$  zadań i  $c = 18$  ustalonych kompetencji) zawiera  $2^{66}$  potencjalnych wariantów struktur kompetencji. Wysoka złożoność obliczeniowa rozważanego problemu ( $f(m, n, c) = \mathcal{O}(2^{mn-c})$ ) implikuje konieczność stosowania zaawansowanych technik i metod obliczeniowych, umożliwiających

przeszukiwanie dużych struktury danych (jak na przykład techniki programowania deklaratywnego [3, 35]).

W związku z powyższym, rozważany problem syntezy struktur kompetencji odpornych na wybrany zbiór zakłóceń można sformułować następująco. Dana jest organizacja/firma/przedsiębiorstwo produkcyjne dysponująca kapitałem ludzkim reprezentowanym w postaci struktury kompetencji zatrudnionej kadry (pracowników). Znałe są cele biznesowe organizacji oraz zbiór realizowanych zadań. Poszukiwany jest zbiór działań i decyzji w zakresie rozwoju kadry pracowniczej, które należy podjąć aby zagwarantować odporność struktury kompetencji na wybrany rodzaj zakłóceń. Dla tak zdefiniowanego problemu prowadzone są poszukiwania modelu oraz efektywnej czasowo metody syntezy odpornych struktur kompetencji. Innymi słowy rozważany dalej problem badawczy sprowadza się do odpowiedzi na następujące pytanie: *Czy istnieje model i metoda pozwalająca kształtować struktury kompetencji odporne na wybrane zakłócenia powodowane np. absencją pracowników, utratą kwalifikacji itp.?*

### 3.2. Model referencyjny

Do dalszych rozważań, ilustrujących syntezę struktur kompetencji odpornych na absencję jednego pracownika, przyjęto następujący model:

Zbiory:

$Z_i$ : zadań, indeksowany przez  $i = 1, \dots, n$

$P_k$ : pracowników, indeksowany przez  $k = 1, \dots, m$

Parametry:

$l_i$ : liczba godzin  $i$ -tego zadania  $Z_i$

$s_k^j$ : minimalna liczba godzin pracy  $k$ -tego pracownika ( $s_k \in \mathbb{N}$ ), tzw. dolny limit godzin, w sytuacji absencji  $j$ -tego pracownika

$z_k^j$ : maksymalna liczba godzin pracy  $k$ -tego pracownika ( $z_k \in \mathbb{N}$ ), tzw. górny limit godzin, w sytuacji absencji  $j$ -tego pracownika

$w_{a,b}$ : parametr określający czy zadania  $Z_a$  i  $Z_b$  mogą być realizowane przez tego samego pracownika (zadania wzajemnie się wykluczają):

$$w_{a,b} = \begin{cases} 1 & \text{gdy zadanie } Z_a \text{ wyklucza się z zadaniem } Z_b \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

$R^*$  oczekiwana odporność struktury kompetencji,  $R^* \in [0,1]$

Zmienne decyzyjne:

$G$ : struktura kompetencji, definiowana jako  $G = (g_{k,i} | k = 1 \dots m; i = 1 \dots n)$  gdzie  $g_{k,i}$  określa kompetencje pracowników do realizacji zadań;  $g_{k,i} \in \{0, 1\}$ ,  $g_{k,i} = 0$  oznacza brak kompetencji  $k$ -tego pracownika do realizacji  $i$ -tego zadania,  $g_{k,i} = 1$  oznacza posiadanie kompetencji przez  $k$ -tego pracownika do realizacji  $i$ -tego zadania.

$R$ : miara odporności struktury kompetencji  $G$  na absencję jednego pracownika  $R \in [0,1]$ .  $R = 0$  – oznacza **brak odporności**, tzn. każdy przypadek absencji uniemożliwia przydział zadań;  $R = 1$  – oznacza **pełną odporność** tzn. bez względu na to, który pracownik jest nieobecny gwarantowany jest przydział zadań. Przykładowo:

- wartość  $R = 0.25$  oznacza, że struktura kompetencji zapewnia przydział zadań w jednej czwartej możliwych przypadków nieobecności dowolnego pracownika,



- wartość  $R = 0.5$  oznacza, że struktura kompetencji zapewnia przydział zadań w połowie możliwych przypadków nieobecności dowolnego pracownika,
- $G^j$ : struktura kompetencji otrzymana w wyniku absencji  $j$ -tego pracownika  $G^j = (g_{k,i}^j | k = 1 \dots (m-1); i = 1 \dots n)$
- $X^j$ : przydział zadań w sytuacji absencji  $j$ -tego pracownika, definiowana jako  $X^j = (x_{k,i}^j | k = 1 \dots (m-1); i = 1 \dots n)$ , gdzie  $x_{k,i}^j \in \{0,1\}$ :
- $$x_{k,i}^j = \begin{cases} 1 & \text{gdy zadanie } Z_i \text{ przydzielone zostało pracownikowi } P_k \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$
- $c^j$ : zmienna pomocnicza określająca czy przydział  $X^j$  spełnia zadane ograniczenia. Wartość zmiennej  $c^j \in \{0,1\}$  zależy od cząstkowych zmiennych pomocniczych:  $c_{1,i}^j$ ,  $c_{2,k}^j$ ,  $c_{3,k}^j$  określających czy spełnione są ograniczenia (3), (4), (5).

Ograniczenia:

1. Konstrukcja struktur kompetencji odpowiadających sytuacji absencji  $j$ -tego pracownika

$$g_{k,i}^j = \begin{cases} g_{k,i} & \text{gdy } k < j \\ g_{(k+1),i} & \text{gdy } k \geq j \end{cases} \quad (1)$$

2. Zadania mogą być realizowane tylko przez pracowników posiadających odpowiednie kompetencje:

$$x_{k,i}^j = 0, \text{ gdy } g_{k,i}^j = 0, \text{ dla } k = 1 \dots (m-1); i = 1 \dots n; j = 1 \dots m \quad (2)$$

3. Zadanie  $Z_i$  przydzielone jest dokładnie do jednego pracownika:

$$(\sum_{k=1}^{m-1} x_{k,i}^j = 1) \Leftrightarrow (c_{1,i}^j = 1), \text{ dla } i = 1 \dots n; j = 1 \dots m \quad (3)$$

4. Obciążenie  $k$ -tego pracownika powinno być nie mniejsze niż dolny limit godzin  $s_k^j$ :

$$(\sum_{i=1}^n x_{k,i}^j \cdot l_i \geq s_k^j) \Leftrightarrow (c_{2,k}^j = 1), \text{ dla } k = 1 \dots (m-1); j = 1 \dots m \quad (4)$$

5. Obciążenie  $k$ -tego pracownika powinno być nie większe niż górny limit godzin  $z_k^j$ :

$$(\sum_{i=1}^n x_{k,i}^j \cdot l_i \leq z_k^j) \Leftrightarrow (c_{3,k}^j = 1), \text{ dla } k = 1 \dots (m-1); j = 1 \dots m \quad (5)$$

6. Realizacja zadań wzajemnie się wykluczających:

$$x_{k,a}^j + x_{k,b}^j \leq 1, \text{ gdy } w_{a,b} = 0, \text{ dla } k = 1 \dots (m-1); i = 1 \dots n; j = 1 \dots m \quad (6)$$

7. Odporność struktury kompetencji:

$$R = \frac{LP}{m} \quad (7)$$

$$R \geq R^* \quad (8)$$

$$LP = \sum_{j=1}^m c^j \quad (9)$$

$$c^j = \prod_{i=1}^n c_{1,i}^j \prod_{k=1}^m c_{2,k}^j \prod_{k=1}^m c_{3,k}^j \quad (10)$$

Przedstawione pojęcia struktury kompetencji i przydziału zadań, w proponowanym modelu reprezentowane są odpowiednio przez zmienne decyzyjne  $G$ ,  $G^j$  oraz  $X^j$ . Przydział zadań  $X^j$ , który spełnia ograniczenia (2)-(6), jest nazywany przydziałem dopuszczalnym w sytuacji absencji  $j$ -tego pracownika. W tym kontekście pytania rozważane uprzednio można uszczegółowić do postaci: *Czy istnieje, struktura kompetencji  $G$  gwarantująca odporność  $R \geq R^*$  w sytuacji absencji jednego pracownika?*

### 3.3. Sformułowanie problemu

Do poszukiwania odpowiedzi na postawione pytanie wykorzystywane są metody bazujące na przeglądzie zupełnym (np. podziału i ograniczeń). W literaturze istnieją zaawansowane techniki, bazujące na paradygmacie programowania deklaratywnego, które pozwalają zmniejszyć czas obliczeń w stosunku istniejących metod dokładnych. Jedną z takich technik jest programowanie z ograniczeniami (ang. CP/CLP constraint programming/constraint logic programming) [30]. Jest to zbiór technik służących do rozwiązywania problemów kombinatorycznych, jak np. rozważany w pracy problem przydziału oraz wiele innych – problem marszrutyzacji, porcjowania, magazynowania, harmonogramowania pracy pojazdów itp. Istota metod programowania z ograniczeniami sprowadza się do rozwiązywania problemów formułowanych jako problemy spełniania ograniczeń (PSO) [4, 33].

Zagadnienia poszukiwania odpornych struktur kompetencji mogą być modelowane w formalizmie PSO, umożliwiającym bezpośrednią implementację zaproponowanego modelu w komercyjnie dostępnych środowiskach programowania z ograniczeniami tj. IBM ILOG CPLEX, Gurobi, ECLiPS<sup>e</sup>, Oz Mozart itd. (będących podklasą środowisk programowania deklaratywnego). W odróżnieniu od technik modelowania proceduralnego (imperatywnego) przyjęcie podejścia opartego na modelowaniu deklaratywnym pozwala uwzględnić, w ramach wykorzystywanego modelu, szereg indywidualnych potrzeb i specyficznych wymagań składających się na sformułowanie rozważanej wersji problemu. Odnosząc się do sformułowanego w tej pracy PSO jakakolwiek zmiana struktury zleceń, organizacji a także zatrudnianej w niej kadry pracowniczej ograniczona zostanie jedynie do korekty/zmiany zbioru ograniczeń i pozostanie bez wpływu na implementowane mechanizmy propagacji ograniczeń i dystrybucji zmiennych.

Przyjęta struktura zaproponowanego modelu wyróżniająca takie elementy jak zbiór zmiennych decyzyjnych oraz zbiór wiążących je ograniczeń w sposób naturalny pozwala formułować rozważany problem w kategoriach PSO i implementować go w środowiskach programowania z ograniczeniami:

$$PS = ((\mathcal{V}, \mathcal{D}), \mathcal{C}), \quad (11)$$

gdzie:

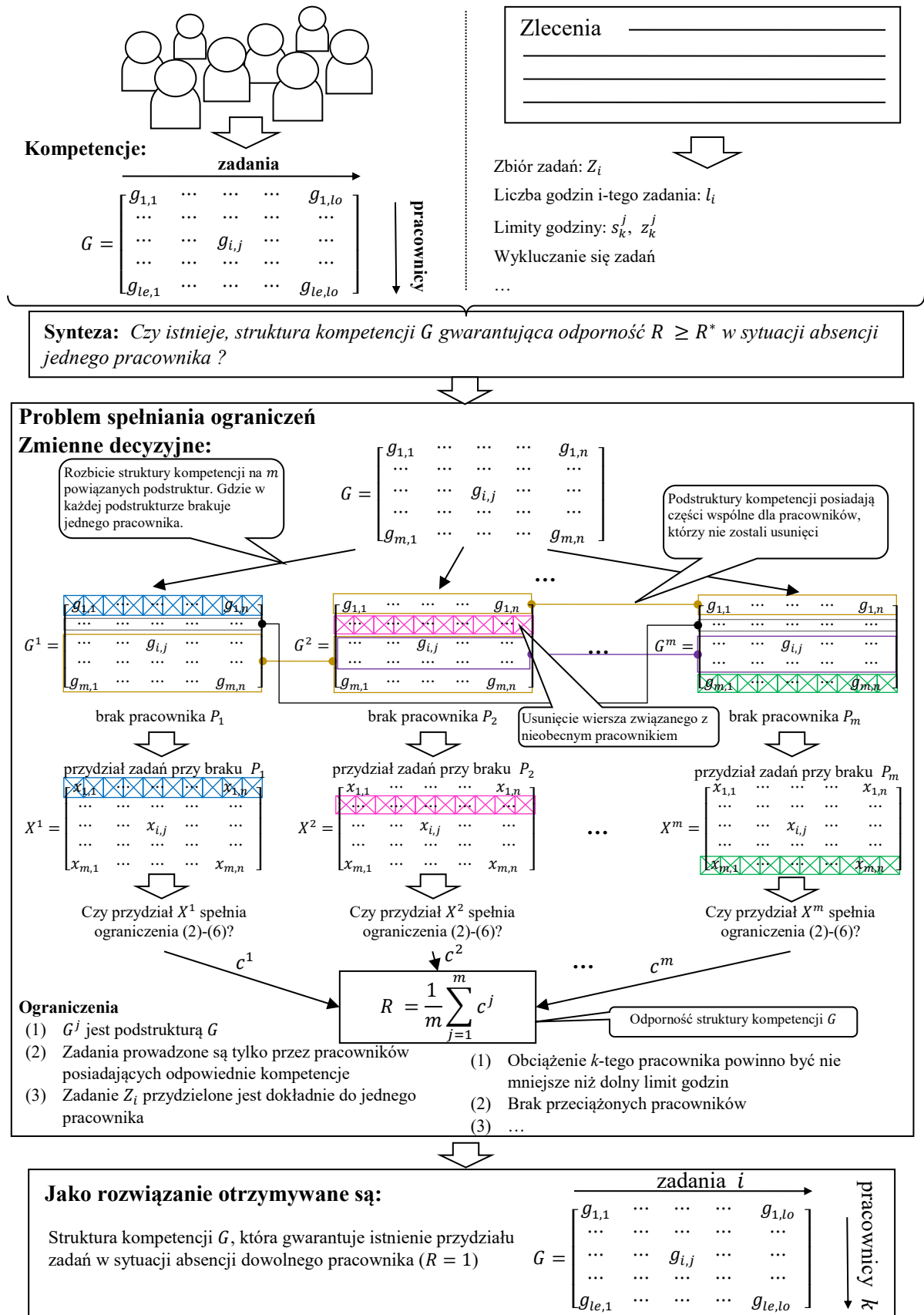
$\mathcal{V} = \{G, G^1, \dots, G^m, X^1, \dots, X^m, R\}$  - zbiór zmiennych decyzyjnych obejmujący: strukturę kompetencji  $G$ , podstrukturę kompetencji  $G^j$  otrzymane w wyniku absencji  $j$ -tego pracownika, odpowiadające im przydziały zadań  $X^j$  oraz odporność  $R$ .

$\mathcal{D}$  – skończony zbiór dziedzin zmiennych decyzyjnych  $\{G, G^1, \dots, G^m, X^1, \dots, X^m, R\}$ ,

$\mathcal{C}$  – zbiór ograniczeń specyfikujących relacje między strukturą kompetencji i jej odpornością (ograniczenia 1-10).

Rozwiązanie problemu  $PS$  (11) sprowadza się do wyznaczenia takich wartości (determinowanych przez dziedziny  $\mathcal{D}$ ) zmiennych decyzyjnych  $G$  (struktury kompetencji zespołu),  $X^j$  (przydziału zadań) oraz  $R$  (odporności na absencje jednego pracownika), dla których spełnione są wszystkie ograniczenia zadane w zbiorze  $\mathcal{C}$ . Innymi słowy poszukiwane jest rozwiązanie które gwarantuje odporność  $R$  na zadanym poziomie  $R^*$ . W ogólności tak zdefiniowany PSO można rozważać w kategoriach problemów optymalizacyjnych. W takich

przypadkach poszukiwania koncentrują się na wyznaczeniu minimalnej struktury kompetencji  $G_{OPT}$  (np. względem kryterium najmniejszej liczby zmian kompetencji).



Rys. 5. Model PS (11) syntezy odpornych struktur kompetencji

Model  $PS$  (11) syntezy odpornych struktur kompetencji przedstawiony na Rys. 5 ilustruje sposób wyznaczania struktury  $G$  zapewniający jej odporność na zadanym poziomie ( $R \geq R^*$ ). Gwarancja ta jest konsekwencją wprowadzenia zmiennych decyzyjnych  $G^1, \dots, G^m$  reprezentujących podstruktury struktury  $G$  dla kolejnych przypadków absencji pracownika. Pełna odporność ( $R = 1$ ) warunkowana jest istnieniem takiej struktury  $G$ , dla której każda podstruktura  $G^j$  gwarantuje istnienie przydziału zadań  $X^j$  spełniającego ograniczenia (2)-(6) ( $c^j = 1$ ). Inaczej mówiąc, rozwiązaniem problemu  $PS$  (11) jest struktura kompetencji  $G$ , która gwarantuje terminową realizację zadań jednocześnie dla wszystkich przypadków jednostkowych absencji pracowników.

#### **4. Komputerowo wspomagane planowanie struktur kompetencji odpornych na zakłócenia absencji pracowniczej**

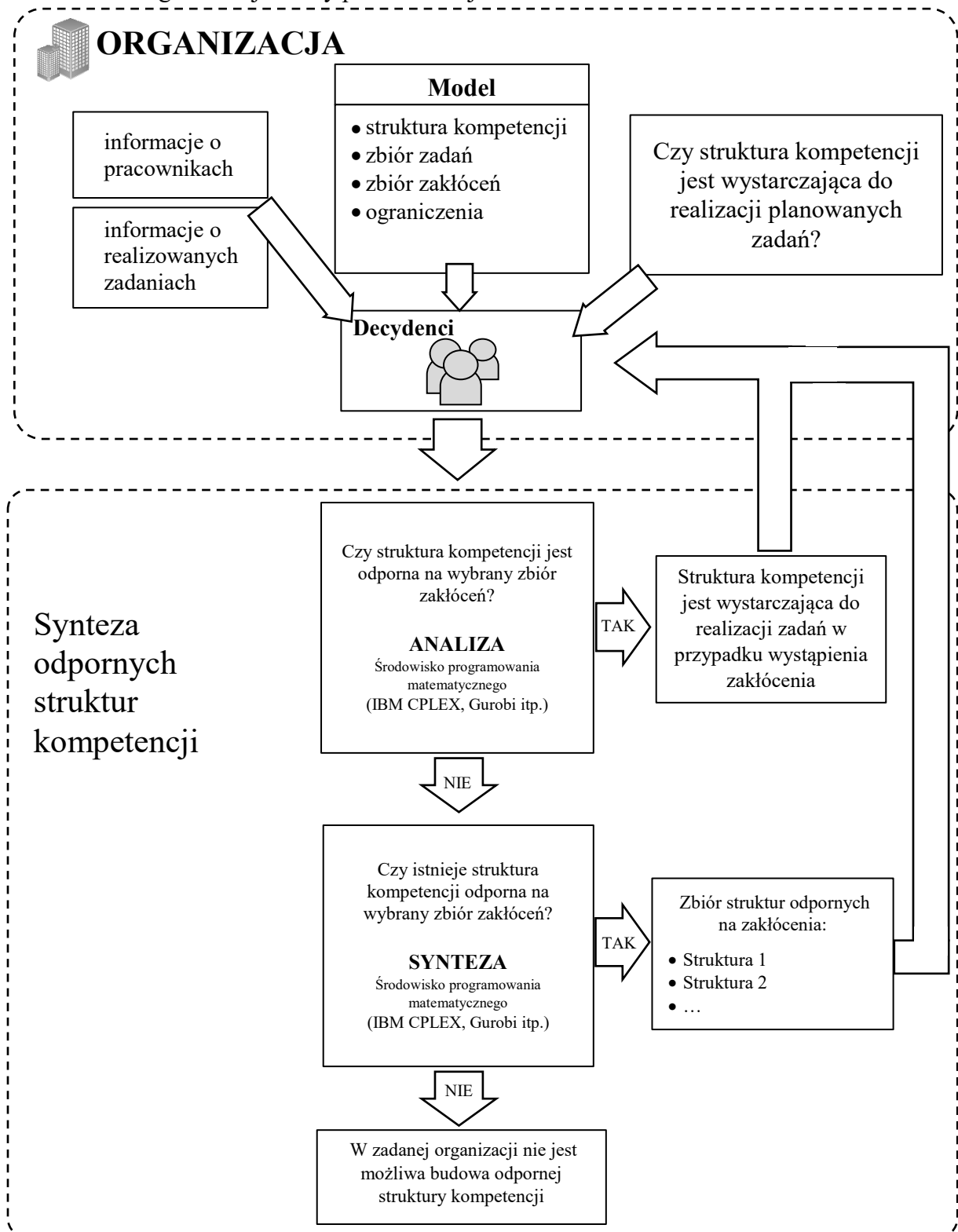
Przedstawiony w poprzednim rozdziale problem spełniania ograniczeń  $PS$  (11) został opracowany na potrzeby syntezy (minimalnych) struktur kompetencji odpornych na absencje jednego pracownika. W ogólności liczba nieobecnych pracowników może być większa jak również rozważane mogą być inne rodzaje zakłóceń. W tym ujęciu odporność struktury kompetencji należy traktować jako parametr zależny od rodzaju zakłócenia a do jej oceny mogą być wykorzystywane różne miary. Przykładowo odporność struktury kompetencji można wyrazić jako:

- miarę odporności na absencję pojedynczych pracowników (7): liczba przypadków absencji, dla których istnieje przydział zadań gwarantujący terminową realizację zleceń względem wszystkich możliwych przypadków absencji,
- miarę odporności na utratę kwalifikacji (kompetencji) pracownika: liczba przypadków utraty kwalifikacji, dla których istnieje przydział zadań gwarantujący terminową realizację zleceń względem, wszystkich możliwych przypadków utraty kwalifikacji,
- miarę odporność na zmiany dokonywane w strukturze zadań (zamiana liczby zadań, marszrut technologicznych itp.): liczba przypadków zmiany struktury zadań, dla których istnieje przydział zadań gwarantujący terminową realizację zleceń, względem wszystkich możliwych przypadków zmiany struktury zadań,
- itp.

Na Rys. 6 zilustrowana została metoda oceny i syntezy struktur kompetencji odpornych na zakłócenia (względem przedstawionych powyżej miar). Zakłada ona, że w organizacji dostępne są informacje o pracownikach (struktura kompetencji) i realizowanych zadaniach oraz ustalone są ograniczenia opisujące wiążące je relacje.

Decydenci mają świadomość możliwości wystąpienia określonego zbioru zakłóceń. Zaproponowane narzędzie wspierające decydentów w podejmowaniu decyzji pozwala przede wszystkim odpowiadać na pytanie dotyczące analizy (oceny) odporności struktury kompetencji na wybrany zbiór zakłóceń. W przypadku pozytywnej odpowiedzi (struktura kompetencji jest wystarczająca do realizacji zadań) zleczone zadania mogą być realizowane bez obawy, że wybrany zbiór zakłóceń uniemożliwi ich realizację. W przypadku negatywnej odpowiedzi (struktura kompetencji nie jest wystarczająca do realizacji zadań) decydent ma możliwość wykorzystywania opracowanej metody do odpowiedzi na pytanie dotyczące syntezy struktury kompetencji (rozwiązanie  $PS$  (11)), w ramach którego akcentowana jest możliwość przeszukiwania dostępnych danych (w tym przypadku struktury kompetencji) w celu zagwarantowania istnienia przydziału zadań spełniającego określone oczekiwania (np. odporność struktury kompetencji na wybrany zbiór zakłóceń). W przypadku pozytywnej odpowiedzi decydent otrzymuje zbiór alternatywnych postaci struktur kompetencji, które gwarantują odporność organizacji na wybrany zbiór zakłóceń. Na podstawie tego zbioru

dopuszczalnych, alternatywnych struktur możliwe jest podjęcie decyzji między innymi w zakresie dalszego rozwoju kadry pracowniczej.



Rys. 6. Synteza odpornych struktur kompetencji [opracowanie własne]

W gestii decydenta pozostaje wybór najkorzystniejszego (wg wybranego przez siebie kryterium) wariantu. W przypadku odpowiedzi negatywnej decydent ma świadomość, że w danej organizacji nie jest możliwa budowa struktury kompetencji odpornej na wybrany zbiór

zakłóceń. W związku z tym może rozważyć jej zmianę (zwiększenie) limitów godzin, zatrudnienie nowych pracowników, poszukiwanie tymczasowych pracowników poprzez outsourcing itp.

Przedstawiona metoda, w której wykorzystano opracowany model  $PS$  (11) oraz mechanizmy środowisk programowania Matlab i Gurobi, została zweryfikowana w serii eksperymentów obliczeniowych opisanych w kolejnym rozdziale.

## 5. Eksperymenty obliczeniowe

Dany jest system produkcyjny z Rys. 1, w którym do realizacji zleceń wykorzystany jest zespół pracowników  $\{P_1, \dots, P_6\}$ . Zlecenia są realizowane zgodnie z harmonogramem z Rys. 2. Konsekwencją przyjętego harmonogramu jest wzajemnie wykluczenie się operacji realizowanych w tym samym przedziale czasu. Informacje, o tym, które operacje wzajemnie się wykluczają (wartości zmiennej  $w_{a,b}$ ) zebrane zostały w tab. 2. Przykładowo, ze względu na to, że zadania  $Z_7$  i  $Z_{12}$  (wymagające kompetencji ●) są realizowane w tym samym przedziale czasu (przedział 3-5 godziny) to muszą być wykonywane przez różnych pracowników.

Tabela 2. Wartości zmiennej  $w_{a,b}$  determinowane przez harmonogram z Rys. 2

$w_{a,b}$	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	z10	z11	z12	z13	z14
z1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0
z2	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
z3	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
z4	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0
z5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
z6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
z7	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0
z8	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
z9	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
z10	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
z11	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
z12	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0
z13	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0
z14	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Jak pokazano na Rys. 4 przyjęta struktura kompetencji  $G$  (tab. 1 nie gwarantuje odporności na absencję jednego pracownika. Opracowana metoda (Rys. 6) może zostać wykorzystana w próbie syntezy struktury kompetencji odpornej na zadany rodzaj zakłócenia tj. odpowiedzi na następujące pytanie: *Czy istnieje, struktura kompetencji  $G$  gwarantująca pełną odporność ( $R = 1$ ) w sytuacji absencji jednego pracownika?*

Odpowiedź na tak postawione pytanie wiąże się z rozwiązaniem problemu  $PS$  (11), zakładającym strukturę kompetencji  $G$  z tab. 1 oraz parametry modelu z Rys. 1. Problem ten został zaimplementowany w środowisku GUROBI (Intel i7-4770, 8GB RAM). Pierwsze rozwiązanie dopuszczalne wyznaczone zostało w czasie  $< 1s$ . Przestrzeń rozwiązań dopuszczalnych została przeszukana pod względem kryterium najmniejszej liczby zmian w strukturze kompetencji:

$$L(G) = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n g_{k,i}, \quad (12)$$



Otrzymaną strukturę minimalną  $G_{OPT}$ , dla której  $R = 1$  ilustruje tab. 3. Wartość  $L(G_{OPT})$  wynosi 29 co oznacza, że pracownicy muszą zwiększyć swoje kwalifikacje w zakresie 8 nowych kompetencji (tab. 3): pracownik  $P_1$  winien zdobyć kompetencję  $\bullet$ ,  $P_2$  kompetencję  $\square$ ,  $P_3$  kompetencje  $\square\triangle\bullet$ ;  $P_4$  kompetencje  $\square\triangle$ ;  $P_5$  kompetencję  $\bullet$ .

Tabela 3. Minimalna struktura kompetencji odporna na absencje jednego pracownika

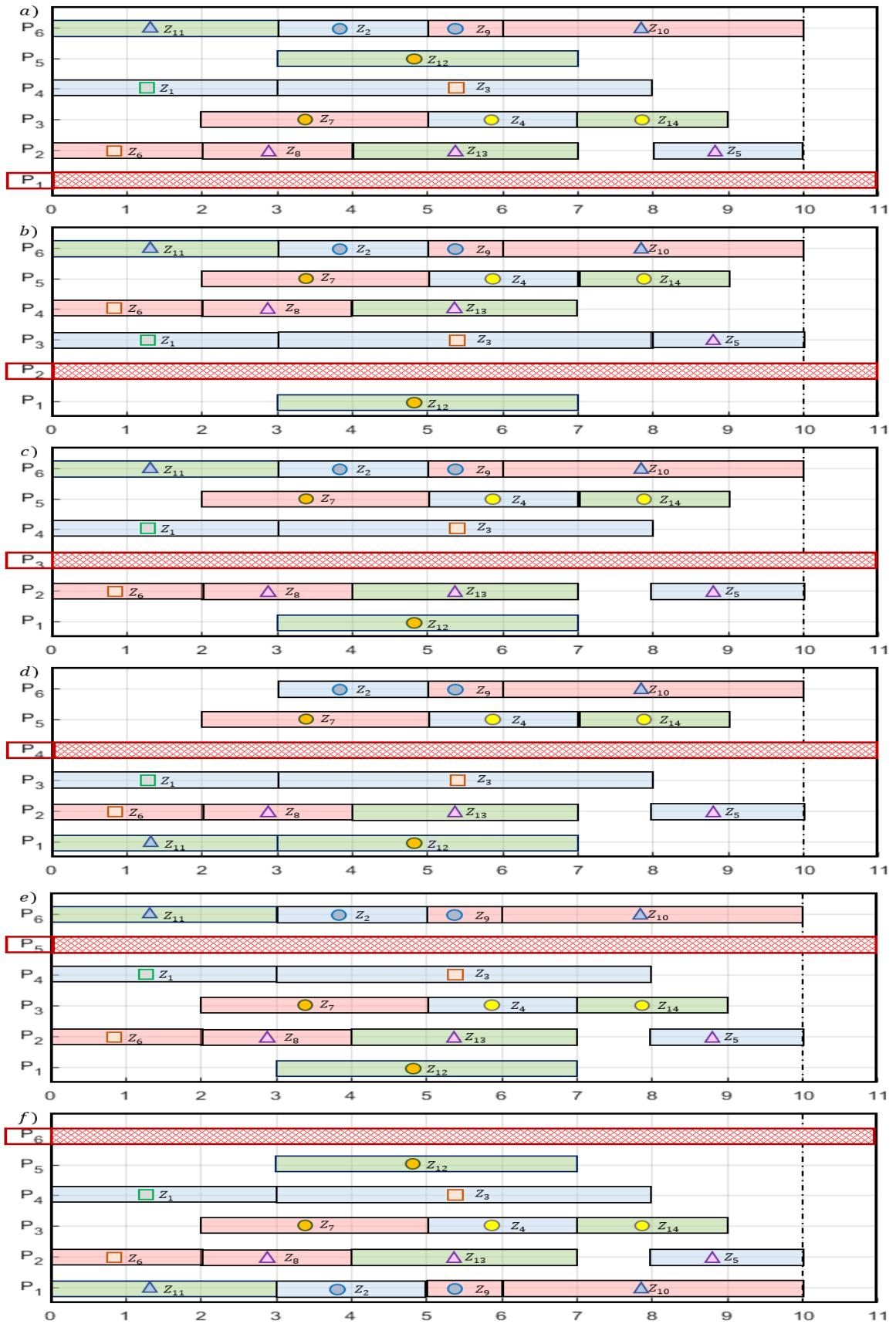
$G_{OPT}$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{10}$	$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{13}$	$Z_{14}$
$P_1$ $\triangle\bullet + \bullet$	0	1*	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0
$P_2$ $\triangle + \square$	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0
$P_3$ $\square\bullet + \square\triangle\bullet$	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
$P_4$ $\square + \square\triangle$	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
$P_5$ $\bullet + \bullet$	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
$P_6$ $\triangle\bullet$	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0

\* - pola oznaczone kolorem określają nowo nabyte (względem struktury z tab. 1) kompetencje

Zdobycie tych kompetencji zagwarantuje pełną ( $R = 1$ ) odporność struktury kompetencji na absencję jednego, dowolnego pracownika zespołu. Na Rys. 7 przedstawiono przydziały zadań, które gwarantują terminową realizację (10h) zleceń bez względu na to, który pracownik jest nieobecny.

Alternatywnym, do szkoleń dostępnej kadry pracowniczej, sposobem poszukiwania struktury kompetencji odpornej na absencję jednego pracownika jest możliwość zatrudnienia dodatkowego personelu. Pytanie związane z takim podejściem dotyczy określania ilu pracowników i o jakich kompetencjach należy zatrudnić? Synteza struktury kompetencji (rozwiązanie odpowiedniego  $PS$  (11)) zakładająca dostępność jednego dodatkowego pracownika  $P_7$  pozwoliła uzyskać rozwiązanie przedstawione w tab. 4 (czas obliczeń  $<1s$ ). Jak łatwo widać pełna odporność ( $R = 1$ ) struktury zostanie zagwarantowana w sytuacji gdy nowy pracownik  $P_7$  będzie posiadał kompetencje do realizacji wszystkich zadań (7 kompetencji).

Przedstawiona metoda została zweryfikowana w szeregu eksperymentów obejmujących różną liczbę pracowników (5-15) i różną liczbę zadań (16-32). Obliczenia zostały wykonane w celu określenia czasu potrzebnego do syntezy struktury kompetencji odpornej ( $R = 1$ ) w sytuacji absencji pojedynczych pracowników. Wyniki przedstawiono w tabeli 5. Łatwo zauważyć, że w przypadkach, w których rozmiary nie przekraczają 10-ciu pracowników i 32-óch zadań, wyznaczenie odpornej struktury kompetencji nie przekracza 1000 sekund. Przyszłe prace będą koncentrowały się na wdrożeniu proponowanego modelu w środowiskach innych pakietów optymalizacyjnych: IBM ILOG CPLEX, OzMozart itp. Opracowany moduł obliczeniowy będzie mógł zostać wykorzystany jako nakładka programowa do komercyjnie dostępnych systemów wspomagania decyzji w zakresie zarządzania zasobami ludzkimi.



Rys. 7. Przydziały zadań w sytuacji absencji jednego z pracowników: absencja pracownika  $P_1$  a), absencja pracownika  $P_2$  b), absencja pracownika  $P_3$  c), absencja pracownika  $P_4$  d), absencja pracownika  $P_5$  e), absencja pracownika  $P_6$  f)

Tabela 4. Minimalna struktura kompetencji w przypadku zatrudniania dodatkowego pracownika  $P_7$ .

$G_{OPT}$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{10}$	$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{13}$	$Z_{14}$
$P_1$ ▲●	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
$P_2$ ▲	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
$P_3$ ■●	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$P_4$ ■	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
$P_5$ ●	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
$P_6$ ▲●	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
$P_7$ ▲●▲■●■●	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 5. Wyniki przeprowadzonego eksperymentu komputerowego \*

	1	2	3	4	5
Pracownicy x Zadania	5x16	5x24	5x28	5x32	5x36
Liczba zmiennych	320	480	560	640	720
Zmienione kompetencje	12	17	19	21	23
Czas wyznaczania odpornej struktury [sek.]	1,14	4,18	6,62	10,46	14,75
	6	7	8	9	10
Pracownicy x Zadania	10x16	10x24	10x28	10x32	10x36
Liczba zmiennych	1440	2160	2550	2880	3240
Zmienione kompetencje	8	11	15	17	19
Czas wyznaczania odpornej struktury [sek.]	129	436	711	1046	>1000
	11	12	13	14	15
Pracownicy x Zadania	15x16	15x24	15x28	15x32	15x36
Liczba zmiennych	3360	5040	5880	6720	7560
Zmienione kompetencje	6	5	brak danych	brak danych	brak danych
Czas wyznaczania odpornej struktury [sek.]	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000

\* parametry komputera: Intel i7-4770, 8GB RAM

## 6. Podsumowanie

Proponowana metoda syntezy struktur kompetencji odpornych na wybrany zbiór zakłóceń umożliwia planowanie przydziału zadań produkcyjnych (wymagających określonych kompetencji pracowniczych) do zasobów (pracowników o zadanych kompetencjach) w sytuacjach występowania zakłóceń powodowanych absencją pracowników. Realizowany w niej przydział kompetencji odporny na nieprzewidziane zakłócenia sprowadza się do wyznaczenia dodatkowych (redundantnych) kompetencji wykonawcy umożliwiających substytucje kompetencji traconych w wyniku absencji. Wprowadzona miara odporności struktur kompetencji umożliwia interakcyjną, w trybie online, syntezę struktur o zadanym poziomie odporności, w szczególności odporności na pojedyncze absencje pracowników (zespołu wykonawców). Implementowane techniki programowania z ograniczeniami pozwalają przenieść i adaptować opracowany model referencyjny na inne obszary decyzji

menadżerskich wspomagających w zakresie controllingu personalnego, a w szczególności kształtowania struktur kompetencji np. kadry uniwersyteckiej, projektowania zespołów eksperckich oceniających wnioski projektowe, wariantowania składu zespołów medycznych itp.

NP-trudny charakter rozważanej klasy problemów implikuje heurystyczny charakter metod wykorzystywanych do ich rozwiązywania, np. implementujących paradygmat programowania deklaratywnego. Wywodzący się z tej koncepcji, model spełnienia ograniczeń *PS* (11) i bazująca na nim metoda syntezy struktur kompetencji odpornych na absencję pojedynczego pracownika wykorzystuje nadmiarową liczbę zmiennych decyzyjnych reprezentujących zubożone postaci struktur kompetencji (struktur powstałych w konsekwencji wystąpienia różnych scenariuszy zakłóceń). Nadmiarowość zbioru zmiennych decyzyjnych z jednej strony przyczynia się do zwiększenia złożoności obliczeniowej problemu z drugiej zaś strony daje możliwość wyznaczania rozwiązań na zadanym poziomie odporności (w szczególnym przypadku struktur kompetencji w pełni odpornych). Przeprowadzone eksperymenty pokazały, że skala instancji problemów, dla których możliwa jest (w trybie online <1000s) synteza odpornych struktur kompetencji odpowiada niewielkiej komórce organizacyjnej (10 pracowników i 32 zadania). Możliwość zwiększenia skali rozwiązywanych problemów upatruje się w metodach hybrydowych [36] dedykowanych dla modeli wykorzystujących rzadkie struktury danych (w rozważanym modelu struktura kompetencji zawiera w większości same „0”). Implementacja tego typu technik będzie stanowić jeden z kierunków prowadzonych dalej badań

Wyniki tych badań zweryfikowane zostaną również na wybranych rozszerzeniach problemu spełnienia ograniczeń uwzględniających inne miary odporności na zakłócenia, jak np. miarę odporności na: utratę kwalifikacji (kompetencji) pracownika, zmiany dokonywane w strukturze zleceń, jednoczesną (i/lub następującą po sobie) absencję kilku pracowników itp. W zależności od uzyskanych rezultatów dalsze prace skoncentrowane zostaną na budowie systemu interakcyjnego planowania struktur kompetencji odpornych na zakłócenia, wykorzystywanego w controllingu zasobów ludzkich. Wdrożenie tego typu funkcjonalności w systemach klasy ERP, umożliwi wczesne wykrywanie potrzeb i szybkie wariantowanie alternatywnych decyzji w zakresie zarządzania kompetencjami zatrudnianej kadry. Rozwiązanie takie pozwoli na podejmowanie decyzji personalnych w trybie online wymuszanych przez absencję i/lub fluktuację personelu, zmiany legislacyjne, zmian zakresu zleceń produkcyjnych itp. Umożliwi również opracowanie innych pochodnych metod zarządzania zasobami ludzkimi, jak np. metod wspomagania organizacji i planowania pracy zespołowej w sytuacjach wymuszanych absencją pracowników i koniecznością wypracowywania rozwiązań umożliwiających ich substytucję.

#### Bibliografia:

1. Abernathy W, Baloff N, Hershey J. A three-stage man power planning and scheduling model - a service sector example. *Operations Research* 1973; 21: 693–711.
2. Antosz K. Maintenance – identification and analysis of the competency gap. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2018; 20(3): 484–494.
3. Banaszak Z, Bocewicz G. Declarative Modeling for Production Order Portfolio Scheduling. *Foundations of Management* 2014; 6(3): 7–24.
4. Bocewicz G, Banaszak Z. *Decision Support Driven Models and Algorithms of Artificial Intelligence*. Warsaw: Warsaw University of Technology, 2011.
5. Bocewicz G, Bzdyra K, Banaszak Z. Robust Scheduling Subject to Multi-project Environment Constraints. In: Szewczyk R., Zieliński C., Kaliczyńska M. (eds.) *Challenges*

- in Automation, Robotics and Measurement Techniques. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 440. Springer, 2016: 115–126.
6. Bombiak E. Human resources risk as an aspect of human resources management in turbulent environments. In: Pînzaru F., Zbucnea A., Brătianu C., Vătămănescu E.M., Mitan A. (eds.) *Shift! Major challenges of today's economy*. Bucharest: Tritonic Publishing House 2017: 121-132
  7. Burke E, De Causmaecker P, Vanden Berghe G, Van Landeghem H. The state of the art of nurse rostering. *Journal of Scheduling* 2004; 7: 441–499.
  8. Coolahan J. *Key competencies. A developing concept in general compulsory education*. Brussels: Eurydice, 2002.
  9. De Causmaecker P, Vanden Berghe G. Relaxation of coverage constraints in hospital personnel rostering. *Lecture Notes in Computer Science* 2003; 2740: 129-147. 10.1007/978-3-540-45157-0\_9
  10. Dillon J, Kontogiorgis S. US Airways optimizes the scheduling of reserve flight crews. *Interfaces* 1999; 29(5): 95–122.
  11. Dowland K, Thompson J. Solving a nurse scheduling problem with knapsacks, networks and tabu search. *Journal of Operational Research Society* 2000; 51(7): 825–833. 10.1057/palgrave.jors.2600970
  12. Dück V, Ionescu L, Kliewer N, Suhl L. Increasing stability of crew and aircraft schedules. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 2012; 20(1): 47–61.
  13. Ehr Gott M, Ryan DM. Constructing robust crew schedules with bi-criteria optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 2002; 11(3): 139–150.
  14. Feldstein E, Patalas-Maliszewska J, Kłos S, Kałasznikow A, Andrzejewski K. The use of Plackett-Burman plans and the analysis of expert opinions, in order to assess the significance of controllable parameters of the plasma cutting process. *Eksploatacja i niezawodność – Maintenance and reliability* 2018; 20(3): 443–449. 10.17531/ein.2018.3.13.
  15. Fonseka M.M., Wang P., Manzoor M.S. Impact of human resource slacks on firm performance: Evidence from a developing country. *Proceedings of Rijeka Faculty of Economics* 2013; 31(2): 279–306.
  16. *Guidelines for Competency Management Systems for Downstream and Petroleum Sites*. Petroleum Industry Association Ltd: Cogent 2017.
  17. Hazir O, Haouari M, Erel E. Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem. *European Journal of Operational Research* 2010; 207(1): 633–643.
  18. Ingels J, Maenhout B. The impact of reserve duties on the robustness of a personnel shift roster: an empirical investigation. *Computers & Operations Research* 2015; 61: 153–169. doi: 10.1016/j.cor.2015.03.010.
  19. Ingels J, Maenhout B. Optimised buffer allocation to construct stable personnel shift rosters. *Omega* 2019; 82: 102–117. doi: 10.1016/j.omega.2017.12.006
  20. Ionescu L, Kliewer N. Increasing flexibility of airline crew schedules. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 2011; 20: 1019–1028.
  21. Korytkowski P. Competences-based performance model of multi-skilled workers with learning and forgetting. *Expert Systems With Applications* 2017; 77: 226–235.
  22. Kupczyk T, Stor M. *Zarządzanie kompetencjami: teoria, badania i praktyka biznesowa*. Wrocław, 2017 (in Polish).
  23. Lecuona J.R., Reitzig M. Knowledge worth having in ‘excess’: The value of tacit and firm-specific human resource slack. *Strategic Management Journal* 2014; 35(7): 954–973.
  24. Levy-Leboyer C. *La gestion des competences (Competence management)*. Paris, 1987.

25. Malen J, Vaaler PM. Organizational slack, national institutions and innovation effort around the world. *Journal of World Business* 2017; 52(6): 782–797. 10.1016/j.jwb.2017.07.001
26. Małachowski B. Competence-based management of knowledge workers in project oriented organizations. In H. Xiong and W.B. Lee (Eds.), *Knowledge science, engineering and management. Lecture notes in computer science* 2011; vol. 7091: 281–292.
27. Małachowski B., Korytkowski P. Competences-based performance model of multi-skilled workers. *Computers & Industrial Engineering* 2016; 91: 165–177.
28. Marlin D, Geiger SW. A reexamination of the organizational slack and innovation relationship. *Journal of Business Research* 2015; 68(12): 2683–2690. 10.1016/j.jbusres.2015.03.047
29. Moudani W, Mora-Camino F. Solving crew reserve in airlines using dynamic programming approach. *International Journal of Optimization: Theory, Methods and Applications* 2010; 2(4): 302–329.
30. Nielsen I, Wójcik R, Bocewicz G, Banaszak Z. Towards constraint programming driven methodology for online multi-project planning and control. *Information Systems Architecture and Technology*, Wroclaw: Wroclaw University of Technology 2014: 65–74.
31. Potthoff D, Huisman D, Desaulniers G. Column generation with dynamic duty selection for railway crew rescheduling. *Transportation Science* 2010; 44(4): 493–505.
32. Rosenberger J, Schaefer A, Goldsman D, Johnson E, Kleywegt A, Nemhauser G. A stochastic model of airline operations. *Transportation Science* 2002; 36(4): 357–377.
33. Schutle H, Smolka G, Wurtz J. *Finite Domain Constraint Programming in Oz – A tutorial*. Saarbrücken: German Research Center for Artificial Intelligence, 1998.
34. Serpell A, Ferrada X. A competency-based model for construction supervisor in developing countries. *Personnel Review* 2007; 36(4): 585–602.
35. Sitek P., Wikarek J., *A Declarative Framework for Constrained Search Problems*. *New Frontiers in Applied Artificial Intelligence, Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Nguyen, NT., et al. (Eds.), Vol. 5027, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2008, pp. 728–737.
36. Sitek P, Wikarek J. A hybrid programming framework for modeling and solving constraint satisfaction and optimization problems. *Scientific Programming* 2016; Hindawi. doi: 10.1155/2016/5102616
37. Sohoni M, Johnson E, Bailey T. Operational airline reserve crew planning. *Journal of Scheduling* 2006; 9(3): 203–221.
38. Szwarc E, Bocewicz G, Bach-Dąbrowska I. Planning a teacher staff competence structure robust to unexpected personnel absence. *Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM)*; Berlin 2019 (in print).
39. Szwarc E., Bach-Dąbrowska I., Bocewicz G. Competence Management in Teacher Assignment Planning, In: Damaševičius R., Vasiljeviene G (eds.) *Information and Software Technologies. ICIST 2018. Communications in Computer and Information Science* 2018, vol. 920, Springer, 449–460.
40. Tam B, Ehrgott M, Ryan DM, Zakeri G. A comparison of stochastic programming and bi-objective optimisation approaches to robust airline crew scheduling. *OR Spectrum* 2011; 33(1): 49–75.
41. Topaloglu S, Selim H. Nurse scheduling using fuzzy modelling approach. *Fuzzy Sets and Systems* 2010; 161(11): 1543–1563. doi: 10.1016/j.fss.2009.10.003
42. Van den Bergh J, Beliën J, De Bruecker P, Demeulemeester E, De Boeck L. Personnel scheduling: a literature review. *European Journal of Operational Research* 2013; 226: 367–385.



43. Woodruffe C. What is meant by competency? In: Boam R., Sparrow P. (Eds.), *Designing and achieving competency*. New York, 1992.
44. <http://comarch.pl>
45. <http://dmz.pl>
46. <http://eclipse.org>
47. <http://ibm.com>
48. <http://mozart.github.io>
49. <http://softlab.com.pl>
50. <http://unit4.com>