

Eryk SZWARC¹, Jakub BILSKI²

¹Politechnika Koszalińska, ²Akademia Pomorska w Słupsku
eryk.szwarz@tu.koszalin.pl, jakub.bilski@apsl.edu.pl

METODA PLANOWANIA STRUKTUR KOMPETENCJI ODPORNYCH NA ZAKŁÓCENIA – STUDIUM PRZYPADKU FIRMY IT

Streszczenie

Zespół kompetentnych pracowników jest jednym z wielu czynników decydujących o powodzeniu projektu. W literaturze opisano wiele podejść, które pomagają decydom w planowaniu struktur kompetencji pozwalających ukończyć portfele projektów. Nieliczne z nich, uwzględniają zakłócenia jakie mogą wystąpić w trakcie realizacji projektu, spowodowane np. absencją pracowników, fluktuacjami pracowniczymi itp. W tym obszarze wciąż brakuje rozwiązań (metod i implementujących je środowisk IT) wspomagających decydom w planowaniu tzw. struktur kompetencji odpornych na zakłócenia, gwarantujących realizację zaplanowanych portfeli projektów w dynamicznie zmieniających się warunkach. Na przykładzie firmy z branży IT zilustrowano możliwość praktycznego zastosowania proponowanej metody.

Słowa kluczowe: zespół projektowy, struktura kompetencji, portfel projektów, zakłócenia, planowanie, odporność, wspomaganie decyzji

1. Wprowadzenie

Osiągnięcie zadanych celów biznesowych organizacji realizującej portfel projektów wiąże się głównie z bilansowaniem zasobów: wymaganych i posiadanych [7]. Obserwowany w ostatnich latach trend wskazuje, że uwagę należy koncentrować na zasobach ludzkich [2, 4, 12, 18, 22, 29]. W szczególności na strukturach kompetencji (w skrócie SK) zespołów projektowych determinujących możliwość realizacji podejmowanych projektów. Literatura przedmiotu jest bogata w opracowania dotyczące wspomaganie decydom w procesach oceny kompetencji, identyfikacji luk kompetencyjnych, wariantowania zmian kompetencji, planowania przydziału pracowników do operacji itp. [1, 11, 24, 31]. Głównym założeniem wypracowanych rozwiązań jest niezmiennosc struktur: portfela

projektów (np. stała liczba operacji, niezmienna kolejność wykonywania operacji itp.) i posiadanej kadry pracowniczej (np. stała liczba pracowników itp.).

Należy zauważyć, że realizacja projektów w dynamicznie zmieniającym się otoczeniu organizacji [6] wymusza przewidywanie zakłóceń takich jak: absencje pracowników (zwolnienia lekarskie, wypadki, urlopy macierzyńskie itp.), utrata kwalifikacji (uprawnienia elektryczne, prawo jazdy, dozór techniczny), zmiany liczby czynności (dodanie nowych zleceń), utrata pracowników (odejścia z pracy) itp. Pominięcie tego rodzaju zdarzeń przy planowaniu portfela projektów, może skutkować przerwaniem lub co najmniej opóźnieniem wykonania planu nominalnego realizowanych projektów (w efekcie stratami finansowymi, wizerunkowymi itp.) [5, 8, 13, 16, 19, 20].

W praktyce decydenci i planiści zazwyczaj nie są w stanie przewidzieć momentu wystąpienia tego typu zakłóceń (np. który pracownik w jakim przedziale czasu będzie nieobecny, w jakim momencie, jaka nowa czynność wystąpi itp.). Przeprowadzone badania literaturowe pokazują, że zagadnienia związane z zabezpieczaniem organizacji przed skutkiem ww. zakłóceń należą do rzadkości [14, 15, 21, 23]. W tym obszarze wyróżnić należy techniki zakładające posiadanie nadmiarowych (redundantnych) zasobów ludzkich (w tym kompetencji pracowników) [10, 17]. Takie podejście wpływa na zwiększenie sprawności organizacji rozumianej jako zdolność do realizacji operacji mimo występowania zakłóceń. W tym obszarze wciąż brakuje jednak rozwiązań (metod i implementujących je środowisk IT) wspomagających decydentów w planowaniu tzw. SK odpornych tj. SK gwarantujących realizację zaplanowanych portfeli projektów w dynamicznie zmieniających się warunkach ich realizacji.

W pracy przedstawiono autorską koncepcję syntezy SK odpornych na zakłócenia [27, 28]. W konsekwencji sformułowano nowy problem planowania SK odpornych na wybrany zbiór zakłóceń w organizacji realizującej portfel projektów. Zbudowano model referencyjny dla problemu planowania SK odpornej na dwa rodzaje zakłóceń: absencje pracownicze i zlecenie dodatkowych operacji.

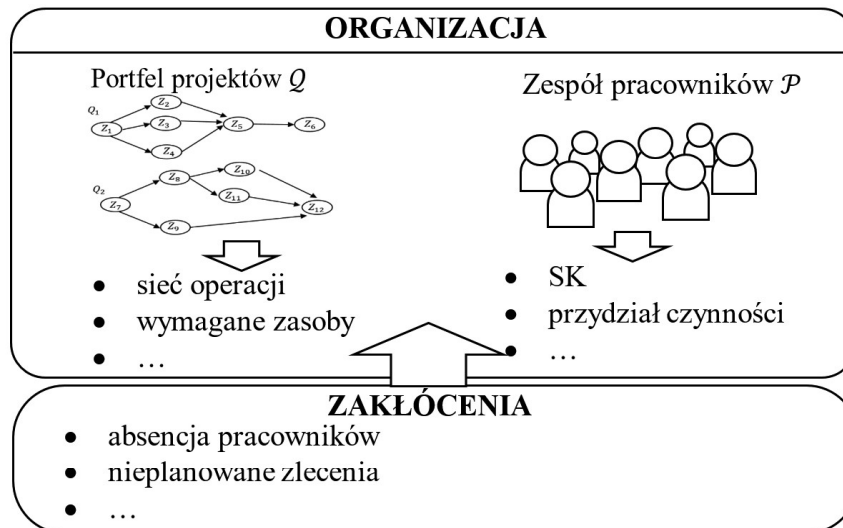
Bazując na opracowanym modelu przedstawiono autorską metodę planowania SK odpornych na zakłócenia oraz wskazano na możliwość jej wykorzystania jako swoistej nakładki programowanej w systemach zarządzania zasobami ludzkimi (np. HRMS/CMS). Efektywność opracowanej metody zweryfikowano w serii eksperymentów wykorzystujących rzeczywiste dane pozyskane z przedsiębiorstwa realizującego projekty IT (Kaliop Poland Sp. z o.o.).

W kolejnym rozdziale przedstawiono model umożliwiający poszukiwanie SK odpornych na zbiór przewidywanych rodzajów zakłóceń: absencję pracowników, zlecenie nieplanowanych czynności. Bazując na opracowanym modelu, w rozdziale 3 przedstawiono propozycję metody postępowania przy ocenie i syntezy SK

odpornych na zakłócenia. W rozdziale 4 zaprezentowano przeprowadzone eksperymenty obliczeniowe, ilustrujące możliwości wykorzystania proponowanej metody. Wnioski, a także kierunki dalszych badań przedstawiono w rozdziale 5.

2. Model

Podjęmowany w pracy obszar wspomagania decyzji przy planowaniu SK w organizacji realizującej projekty koncentruje się wokół zagadnień związanych z rozstrzygnięciem kwestii bilansowania kompetencji posiadanych (możliwości organizacji) z kompetencjami niezbędnymi do realizacji projektów (wymagania związane z realizacją zamówień). Możliwości organizacji i wymagania stawiane przez zlecane przedsięwzięcia (projekty), mogą być reprezentowane w ramach modelu, na który składają się: portfel projektów realizowanych w organizacji oraz zespół pracowników będących w dyspozycji organizacji charakteryzowany poprzez SK i przydział czynności (rys. 1).



Rys. 1. Podstawowe elementy struktury modelu planowania SK [opracowanie własne]

Portfel projektów. Dany jest zbiór projektów Q nazywany dalej portfelem projektów. Przyjmuje się, że obejmuje on projekty, które są realizowane na zamówienie klienta lub są przedsięwzięciami własnymi organizacji (związanymi np. z modernizacją, realizacją procesu dydaktycznego, itp.). Przyjmuje się zapis, w którym $Q = \{Q_1, \dots, Q_j, \dots, Q_{lq}\}$ oznacza portfel projektów, Q_j oznacza j -ty projekt, do ukończenia którego wymagane jest wykonanie zbioru operacji $Z_j \subseteq Z = \{Z_1, \dots, Z_i, \dots, Z_n\}$,

gdzie Z jest zbiorem operacji Z_i , wykonanie których leży w gestii organizacji. Operacja Z_i definiowana jest następująco:

$$Z_i = (q_i, y_i, l_i, w_i, \varphi_i), \quad (1)$$

gdzie:

- q_i : liczba czynności operacji Z_i (wartość q_i określa liczbę odwołań do operacji Z_i związanych z wykonaniem składających się na nią czynności),
- y_i : sekwencja momentów rozpoczęcia czynności operacji Z_i : $y_i = (y_{i,1}, \dots, y_{i,q_i})$, gdzie: $y_{i,j}$ określa moment rozpoczęcia j -tej czynności operacji Z_i ,
- l_i : czas trwania każdej czynności operacji Z_i ,
- w_i : zbiór operacji, wykonanie których wyklucza wykonanie operacji Z_i , $w_i \subseteq Z$. Przez wykluczanie się operacji Z_i z operacją $Z_a \in w_i$ rozumie się sytuację, w której nie mogą być one wykonywane przez tego samego pracownika,
- φ_i : liczba pracowników wymaganych do realizacji każdej czynności operacji Z_i .

Przyjmuje się, że projekt Q_j charakteryzuje sieć operacji w reprezentacji zwanej *operacja-w-węźle*, gdzie operacje Z_i są przyporządkowane węzłom, a ograniczenia kolejnościowe mają postać łuków.

Modelem sieci operacji jest digraf DG_j , w którym dwa węzły są połączone łukiem, gdy odpowiadające im operacje są w relacji kolejnościowej. Oznacza to, że każdy projekt można przedstawić jako $DG_j = (\mathbb{Z}_j, E_j)$, gdzie: \mathbb{Z}_j – zbiór operacji projektu Q_j , $E_j \subseteq \mathbb{Z}_j \times \mathbb{Z}_j$ – zbiór łuków.

Ponadto zakłada się że:

- portfel projektów Q jest zrealizowany (tzn. ukończona ma zostać każda operacja portfela Q) w znanym horyzoncie czasu: $H = \{0, 1, \dots, h\}$,
- operacje są niepodzielne w czasie, tzn. raz rozpoczęta operacja nie może być przerwana do momentu swojego zakończenia.

Zespół pracowników. Do wykonania planowanych operacji przewidziany jest zespół pracowników \mathcal{P} zatrudnionych w organizacji. Zbiór $\mathcal{P} = \{P_1, \dots, P_k, \dots, P_m\}$ definiuje zespół pracowników, gdzie każdemu pracownikowi P_k przypisana jest para Γ_k określająca dopuszczalny wymiar czasu pracy w rozważanym horyzoncie czasu H :

$$\Gamma_k = (s_k, z_k), \quad (2)$$

gdzie:

- s_k : minimalny wymiar czasu pracy k -tego pracownika ($s_k \in \mathbb{N}$),
- z_k : maksymalny wymiar czasu pracy k -tego pracownika ($z_k \in \mathbb{N}$).

Zespołowi pracowników \mathcal{P} odpowiada SK definiowana jako macierz G , której elementy $g_{k,i}$ przyjmują wartość 0 gdy pracownik P_k nie posiada kompetencji do wykonania operacji Z_i , a wartość 1 gdy pracownik P_k posiada kompetencje do wykonania operacji Z_i :

$$G = [g_{k,i}]_{k=1\dots m; i=1\dots n} \quad (3)$$

gdzie: $g_{k,i} \in \{0,1\}$,

$$g_{k,i} = \begin{cases} 1 & \text{gdy pracownik } P_k \text{ posiada kompetencje do wykonania operacji } Z_i \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

Jeżeli pracownik P_k posiada kompetencje do wykonywania operacji Z_i ($g_{k,i} = 1$) to tym samym posiada kompetencje do wykonywania wszystkich czynności na nią składających się. Konsekwencją tego faktu jest przydział X określający sposób alokacji czynności operacji Z do każdego z pracowników zespołu \mathcal{P} w procesie realizacji portfela projektów \mathcal{Q} . Przydział ten jest definiowany jako macierz X , której elementy $x_{k,i}$ przyjmują wartości $\{0,1, \dots, q_i\}$:

$$X = [x_{k,i}]_{k=1\dots m; i=1\dots n} \quad (4)$$

gdzie: $x_{k,i} \in \{0,1, \dots, q_i\}$ określa liczbę czynności operacji Z_i , wykonywanej w toku jej realizacji przez pracownika P_k . Przykładowo, operacja składająca się z trzech czynności ($q_i = 3$), trwających $l_i = 1$ u.j.c., może być wykonywana przez jednego pracownika ($x_{k,i} = 3$ – czynności operacji są wykonywane sekwencyjnie, a czas trwania operacji wynosi 3 u.j.c.) lub przez 3 pracowników (dla każdego z nich $x_{k,i} = 1$ – czynności operacji realizowane są współbieżnie a operacja trwa 1 u.j.c.).

Przyjmuje się ponadto, że:

- czynności operacji Z mogą realizować tylko kompetentni pracownicy,
- w każdym momencie czasu pracownik P_k może realizować maksymalnie jedną czynność danej operacji,
- wykorzystywane zasoby są niewywłaszczalne, tzn. że pracownik realizujący daną czynność nie może jej przerwać w celu podjęcia innej,
- limity czasu pracy pracowników nie mogą być przekroczone.

Zakłócenia i miara odporności struktury kompetencji. Wyróżnia się dwa rodzaje zakłóceń mogących wystąpić w trakcie realizacji projektów portfela \mathcal{Q} przy udziale zespołu pracowników \mathcal{P} :

- limitujące możliwości organizacji (wyrażane przez zmianę SK) absencje pracowników,
- wymuszające zmianę portfela projektów (wyrażane przez zmianę sieci operacji) zlecenia dodatkowych operacji.

Zakłócenie powodowane absencją pracowników charakteryzowane jest przez zbiór ω -elementowych kombinacji zbioru $\{1, \dots, m\}$: $U_\omega = \{\{u_1, \dots, u_i, \dots, u_\omega\} \mid u_i \in \{1, \dots, m\}\}$. U_ω określa więc ω -elementowe warianty nieobecności pracowników. Przykładowo w przypadku absencji 2 pracowników ($\omega = 2$) w zespole $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}$ zbiór U_2 ma postać: $U_2 = \{\{1,2\}, \{1,3\}, \{1,4\}, \{2,3\}, \{2,4\}, \{3,4\}\}$.

Zakłócenie dotyczące zlecenia dodatkowych operacji charakteryzowane jest przez zbiór $Z^\lambda = \{Z_{n+1}, \dots, Z_{n+\lambda}\}$ zawierający λ dodatkowych (nieprzewidzianych w ramach portfela \mathcal{Q}) operacji. Przyjmuje się, że dla każdej operacji $Z_i \in Z^\lambda$ znany jest czas jej trwania l_i oraz zakłada się, że może ona wystąpić w dowolnym momencie horyzontu H ($y_i \in H$). Dodatkowa operacja $Z_i \in Z^\lambda$ może dotyczyć jednego z już zaplanowanych projektów jak również nowego projektu, dołączanego do portfela.

Występowanie zakłóceń ww. typu wymusza poszukiwanie takiego przydziału X , który umożliwi realizację portfela projektów \mathcal{Q} bez przerw i/lub opóźnień. Oznacza to przykładowo, że w przypadku jednostkowej absencji pracowniczey możliwe powinno być przeniesienie obowiązków z pracownika nieobecnego na innego aktualnie będącego w dyspozycji organizacji. Z kolei, w sytuacji zlecenia dodatkowej operacji powinna istnieć możliwość jej przydzielenia do pracownika będącego aktualnie w dyspozycji organizacji, ale nie wykonującego w czasie jej trwania żadnej innej czynności. Realizacja takiego przydziału X nie zawsze jest jednak możliwa. Dla oceny związanych z tym szans wprowadza się pojęcie odporności struktury kompetencji G na zakłócenia zadane przez U_ω i Z^λ . Miarę odporności struktury kompetencji G na absencję ω pracowników i występowanie λ dodatkowych operacji definiuje funkcja $R(U_\omega, Z^\lambda) = R_\omega^\lambda \in [0,1]$, gdzie:

- $R_\omega^\lambda = 0$ – oznacza brak odporności, tzn. dla każdego przypadku absencji (ω -elementowego zespołu pracowników) oraz zlecenia wymuszającego realizację dodatkowych operacji (λ - dodatkowych operacji) nie istnieje przydział X gwarantujący terminową realizację portfela projektów \mathcal{Q} ;
- $R_\omega^\lambda = 1$ – oznacza pełną odporność, tzn. dla każdego przypadku absencji (ω -elementowego zespołu pracowników) oraz zlecenia dodatkowych operacji (λ - dodatkowych operacji) istnieje przydział X gwarantujący terminową realizację portfela projektów \mathcal{Q} .

W ogólności może być ona zdefiniowana na wiele różnych sposobów. W opisywanym modelu przyjmuje się, że wartość funkcji R_ω^λ wyznaczana jest jako stosunek liczby wariantów wystąpienia zakłócenia, dla których struktura kompetencji jest odporna, do wszystkich możliwych wariantów wystąpienia zakłóceń.

Problem planowania SK odpornych na wybrane zakłócenia (określone zbiorami U_ω i Z^λ) sprowadza się, odpowiednio do sekwencyjnie formułowanych i rozwiązywanych problemów analizy i syntezy SK:

Problem analizy SK:

Dane są:

- portfel projektów Q ,
- zespół pracowników \mathcal{P} ,
- struktura kompetencji G ,
- zakłócenia określone zbiorami U_ω i Z^λ .

Pytanie: Jaką odpornością R_ω^λ na zadane zakłócenia charakteryzuje się struktura kompetencji G , zespołu pracowników \mathcal{P} realizujących portfel projektów Q ?

Problem syntezy SK:

Dane są:

- portfel projektów Q ,
- zespół pracowników \mathcal{P} ,
- zakłócenia określone zbiorami U_ω i Z^λ .

Pytanie: Czy istnieje struktura kompetencji G (a jeśli tak to jaka jest jej minimalna postać) zespołu pracowników \mathcal{P} realizujących portfel projektów Q , która gwarantuje zadaną wartość odporności R_ω^λ ($R_\omega^\lambda \geq R^*$) na występowanie zadanych zakłóceń?

Poszukiwanie struktury kompetencji gwarantującej zadaną odporność zwykle związane jest z wyznaczeniem takiej jej postaci, która wymaga najmniejszej liczby zmian względem aktualnej struktury kompetencji zespołu pracowników. Tego typu struktura kompetencji jest nazywana dalej minimalną strukturą kompetencji. Problem syntezy SK traktowany jest dalej jako problem optymalizacyjny, sprowadzający się do wyznaczania tego typu struktur.

Przedstawione problemy nawiązują do zagadnień decyzyjnych (problem analizy) i optymalizacyjnych (problem syntezy) [3, 30] związanych z:

1. Oceną odporności R_ω^λ struktury kompetencji G zespołu pracowników \mathcal{P} realizujących zadany portfel projektów Q na zakłócenia powodowane przez U_ω i Z^λ .
2. Wyznaczaniem (minimalnej) struktury kompetencji G zespołu pracowników \mathcal{P} realizujących portfel projektów Q , gwarantującej zadaną odporność R_ω^λ ($R_\omega^\lambda \geq R^*$) na zakłócenia powodowane przez U_ω i Z^λ .

Model referencyjny

Ze względu na dyskretny charakter stosowanych zmiennych decyzyjnych (struktura kompetencji G , przydział X , itd.) oraz nieliniowy charakter relacji zachodzących między nimi (relacje związane m.in. z przyjętymi założeniami wykluczania i niepodzielności operacji, niewywłaszczalności zasobów, itp.), przyjęto że do formalnego opisu rozważanych problemów analizy i syntezy SK odpornych na zakłócenia wykorzystany zostanie paradygmat modelowania deklaratywnego. W tym celu wprowadza się następujący model referencyjny:

Zbiory:

Z : zbiór operacji realizowanych w ramach portfela projektów Q : $Z = \{Z_1, \dots, Z_n\}$,

Z^λ : zbiór operacji dodatkowych: $Z^\lambda = \{Z_{n+1}, \dots, Z_{n+\lambda}\}$ (zakłócenie portfela projektów),

\mathcal{P} : zbiór pracowników, $\mathcal{P} = \{P_1, \dots, P_m\}$,

U_ω : zbiór ω -elementowych wariantów absencji pracowników:
 $U_\omega = \{\{u_1, \dots, u_i, \dots, u_\omega\} \mid u_i \in \{1, \dots, m\}\}$,

LP_ω : podzbiór zbioru U_ω ($LP_\omega \subseteq U_\omega$) określający przypadki absencji, dla których struktura kompetencji jest odporna na absencję ω pracowników i zlecenie λ dodatkowych czynności.

Θ : pojedynczy wariant absencji ω pracowników, $\Theta \in U_\omega$.

Parametry:

n : liczba operacji realizowanych w portfolio projektów Q ($n \in \mathbb{N}$),

q_i : liczba czynności operacji Z_i ,

m : liczba pracowników zespołu \mathcal{P} ($m \in \mathbb{N}$),

ω : liczba nieobecnych pracowników zespołu \mathcal{P} ($\omega \in \mathbb{N}$), $\omega < m$,

λ : liczba operacji dodatkowych ($\lambda \in \mathbb{N}$), określony w zbiorze Z^λ ,

l_i : czas trwania czynności operacji Z_i ,

y_i : moment rozpoczęcia czynności operacji Z_i ,

φ_i : liczba pracowników wymaganych do realizacji operacji Z_i ,

s_k : minimalny wymiar czasu pracy k -tego pracownika ($s_k \in \mathbb{N}$),

z_k : maksymalny wymiar czasu pracy k -ego pracownika ($z_k \in \mathbb{N}$),

w_i : zbiór operacji, z którymi wyklucza się operacja Z_i , $w_i \subseteq Z$,

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

Zmienne decyzyjne:

G : struktura kompetencji zadana macierzą $G = [g_{k,i}]_{k=1 \dots m; i=1 \dots n+\lambda}$, gdzie:

$g_{k,i} \in \{0,1\}$:

- $g_{k,i} = \begin{cases} 1 & \text{gdy pracownik } P_k \text{ posiada kompetencje do wykonania operacji } Z_i \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$,
- R_ω^λ : miara odporności struktury kompetencji G na zakłócenia określone przez U_ω i Z^λ .
- G^Θ : struktura kompetencji uwzględniająca absencje pracowników określonych w zbiorze Θ : $G^\Theta = [g_{k,i}^\Theta]_{k=1\dots m; i=1\dots n+\lambda}$, gdzie: $g_{k,i}^\Theta \in \{0,1\}$,
- $g_{k,i}^\Theta = \begin{cases} 1 & \text{gdy } k \notin \Theta \text{ i } P_k \text{ posiada kompetencje do wykonania operacji } Z_i \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$,
- X : przydział czynności operacji Z portfela Q do pracowników zespołu \mathcal{P} , $X = [x_{k,i}]_{k=1\dots m; i=1\dots n+\lambda}$, gdzie: $x_{k,i} \in \{0,1, \dots, q_i\}$ określa liczbę czynności operacji Z_i , która jest wykonywana przez pracownika P_k
- X^Θ : przydział w sytuacji absencji pracowników określonych w zbiorze Θ : $X^\Theta = [x_{k,i}^\Theta]_{k=1\dots m; i=1\dots n+\lambda}$, gdzie: $x_{k,i}^\Theta \in \{0,1, \dots, q_i\}$ określa liczbę czynności operacji Z_i , która jest wykonywana przez pracownika P_k w sytuacji absencji pracowników określonych w zbiorze Θ .
- c^Θ : zmienna określająca czy istnieje przydział X^Θ gwarantujący terminową realizację operacji zbioru $Z \cup Z^\lambda$. Wartość zmiennej $c^\Theta \in \{0,1\}$ zależy od cząstkowych zmiennych pomocniczych: $c_{1,i}^\Theta, c_{2,k}^\Theta, c_{3,k}^\Theta$ określających czy spełnione są ograniczenia (5)-(16).

Ograniczenia:

1. Elementy $g_{k,i}^\Theta$ macierzy G^Θ , które charakteryzują absencję pracowników P_k ($k \in \Theta$) przyjmują wartości 0:

$$g_{k,i}^\Theta = \begin{cases} g_{k,i} & \text{gdy } k \notin \Theta \\ 0 & \text{gdy } k \in \Theta \end{cases} \quad (5)$$

2. Czynności operacji Z wykonywane są wyłącznie przez pracowników posiadających odpowiednie kompetencje:

$$x_{k,i}^\Theta \leq q_i \cdot g_{k,i}^\Theta, \text{ dla } k = 1 \dots m; i = 1 \dots n + \lambda; \forall \Theta \in U_\omega. \quad (6)$$

3. W danym momencie pracownik wykonuje co najwyżej jedną czynność:

$$\neg \left((y_{\alpha,a} + l_\alpha \leq y_{\beta,b}) \vee (y_{\beta,b} + l_\beta \leq y_{\alpha,a}) \right) \Rightarrow (x_{k,\alpha}^\Theta \cdot x_{k,\beta}^\Theta = 0),$$

$$\alpha, \beta = 1 \dots n; k = 1 \dots m; a = 1 \dots q_\alpha; b = 1 \dots q_\beta \quad \forall \Theta \in U_\omega \quad (7)$$

4. Operacje Z są wykonywane przez zespoły φ_i kompetentnych pracowników:

$$\left(\sum_{k=1}^m x_{k,i}^\Theta = q_i \cdot \varphi_i \right) \Leftrightarrow (c_{1,i}^\Theta = 1), \text{ dla } i = 1 \dots n; \forall \Theta \in U_\omega, \quad (8)$$

$$\left(\sum_{k=1}^m x_{k,i}^\Theta \geq q_i \cdot \varphi_i \right) \Leftrightarrow (c_{1,i}^\Theta = 1), \text{ dla } i = n \dots n + \lambda; \forall \Theta \in U_\omega, \quad (9)$$

$$\forall \alpha \in H \exists_{k \in \{1 \dots m\}}^{! \varphi_i} (x_{k,i}^\theta = q_i) \wedge \left[\neg \left((\alpha + l_i \leq y_{\beta,b}) \vee (y_{\beta,b} + l_\beta \leq \alpha) \right) \Rightarrow (x_{k,\beta}^\theta = 0) \right],$$

dla $\beta = 1 \dots n$; $i = n \dots n + \lambda$; $b = 1 \dots q_b$; $\forall \theta \in U_\omega$, (10)

gdzie: $\exists^{!a}$ – kwantyfikator egzystencjalny: „istnieje dokładnie a elementów”.

5. Obciążenie k -tego pracownika jest równe lub większe od minimalnego wymiar czasu pracy s_k :

$$\left(\sum_{i=1}^{n+\lambda} x_{k,i}^\theta \cdot l_i \geq s_k \right) \Leftrightarrow (c_{2,k}^\theta = 1), \text{ dla } k = \{1 \dots m\} \setminus \theta; \forall \theta \in U_\omega. \quad (11)$$

6. Obciążenie k -tego pracownika nie jest większe niż maksimum czasu pracy z_k :

$$\left(\sum_{i=1}^{n+\lambda} x_{k,i}^\theta \cdot l_i \leq z_k \right) \Leftrightarrow (c_{3,k}^\theta = 1), \text{ dla } k = \{1 \dots m\} \setminus \theta; \forall \theta \in U_\omega. \quad (12)$$

7. Realizacja czynności wzajemnie się wykluczających:

$$(Z_b \in w_i) \Rightarrow (x_{k,i}^\theta \cdot x_{k,b}^\theta = 1), \text{ dla } i = 1 \dots n + \lambda, k = 1 \dots m; \forall \theta \in U_\omega. \quad (13)$$

8. Odporność R_ω^λ liczona jest jako stosunek liczby wariantów $|LP_\omega|$, dla których struktura kompetencji jest odporna na absencję ω pracowników i zlecenie λ dodatkowych czynności do wszystkich możliwych wariantów zakłóceń ($|U_\omega|$).

$$R_\omega^\lambda = \frac{|LP_\omega|}{|U_\omega|} \geq R^*, \quad (14)$$

$$LP = \sum_{\theta \in U_\omega} c^\theta, \quad (15)$$

$$c^\theta = \prod_{i=1}^{n+\lambda} c_{1,i}^\theta \prod_{k=1}^m c_{2,k}^\theta \prod_{k=1}^m c_{3,k}^\theta. \quad (16)$$

Proponowany wyżej model obejmuje zatem zbiór zmiennych decyzyjnych (opisujących: SK, miarę jej odporności, przydział czynności do pracowników), dyskretne dziedziny zmiennych decyzyjnych, a także zbiór ograniczeń (relacji łączących zmienne decyzyjne) charakteryzujących wymagania w zakresie SK i realizacji planowanych czynności.

Koncepcje SK zespołu pracowników \mathcal{P} jak i przydziału X , w proponowanym modelu reprezentowane są przy pomocy zmiennych decyzyjnych G , G^θ oraz X^θ . Przydział X^θ w sytuacjach absencji pracowniczych określonych zbiorem θ i zleceń dodatkowych czynności Z^λ , spełniających ograniczenia (5)-(16), jest nazywany dalej przydziałem dopuszczalnym.

Z uwagi na sposób specyfikacji modelu, ograniczający się w zasadzie do określenia: zmiennych decyzyjnych, dziedzin zmiennych oraz ograniczeń narzuconych na podzbiory zmiennych, rozważane problemy analizy i syntezy należą do klasy Problemów Spełnienia Ograniczeń (PSO).

Struktura przyjętego modelu, w sposób naturalny pozwala formułować rozważane problemy analizy i syntezy struktury kompetencji G w kategoriach problemu spełniania ograniczeń (PSO) i tym samym implementować je w środowiskach CP.

Problem analizy SK. Problem analizy sformułowany w kategoriach problemu spełniania ograniczeń przyjmuje postać:

$$PS_A = \left((\mathcal{V}_A, \mathcal{D}_A), \mathcal{C}_A \right), \quad (17)$$

gdzie:

$\mathcal{V}_A = \{X^{\Theta \in U_\omega}, R_\omega^\lambda\}$ – zbiór zmiennych decyzyjnych obejmujący przydziały $X^{\Theta \in U_\omega}$ odpowiadające sytuacji jednoczesnej absencji ω pracowników oraz odporność R_ω^λ zadanej struktury kompetencji G ,

\mathcal{D}_A – skończony zbiór dziedzin zmiennych decyzyjnych $\{X^{\Theta \in U_\omega}, R_\omega^\lambda\}$: $x_{k,i}^\Theta \in \{0,1, \dots, q_i\}$, $R_\omega^\lambda \in [0,1]$,

\mathcal{C}_A – zbiór ograniczeń specyfikujących relacje między strukturą kompetencji G zbiorem zleconych operacji $Z \cup Z^\lambda$ i odpornością R_ω^λ (ograniczenia (5)-(16)).

Rozwiązanie problemu PS_A (17) sprowadza się do wyznaczenia takich wartości (determinowanych przez dziedziny \mathcal{D}_A) zmiennych decyzyjnych X^Θ (przydziału) oraz R_ω^λ (odporności na absencje ω pracowników), dla których spełnione są wszystkie ograniczenia zadane w zbiorze \mathcal{C}_A . Innymi słowy w ramach rozwiązania PS_A dokonywana jest ocena odporności R_ω^λ zadanej struktury kompetencji G na wybrany rodzaj zakłóceń.

Problem syntezy SK. Problem syntezy sformułowany w kategoriach problemu spełniania ograniczeń przyjmuje postać:

$$PS_S = \left((\mathcal{V}_S, \mathcal{D}_S), \mathcal{C}_S \right), \quad (18)$$

gdzie:

$\mathcal{V}_S = \{G, G^{\Theta \in U_\omega}, X^{\Theta \in U_\omega}, R_\omega^\lambda\}$ - zbiór zmiennych decyzyjnych obejmujący: strukturę kompetencji G , podstruktury kompetencji $G^{\Theta \in U_\omega}$ odpowiadające sytuacji jednoczesnej absencji ω pracowników, przydziały $X^{\Theta \in U_\omega}$ oraz odporność R_ω^λ ,

\mathcal{D}_S – skończony zbiór dziedzin zmiennych decyzyjnych $\{G, G^{\Theta \in U_\omega}, X^{\Theta \in U_\omega}, R_\omega^\lambda\}$: $g_{k,i} \in \{0,1\}$, $g_{k,i}^\Theta \in \{0,1\}$, $x_{k,i}^\Theta \in \{0,1, \dots, q_i\}$, $R_\omega^\lambda \in [0,1]$,

\mathcal{C}_S – zbiór ograniczeń specyfikujących relacje między strukturą kompetencji G a zbiorem zleconych operacji $Z \cup Z^\lambda$ i odpornością R_ω^λ (ograniczenia (5)-(16)).

Analogicznie jak w przypadku problemu analizy rozwiązanie problemu PS_S (18) sprowadza się do wyznaczenia takich wartości (determinowanych przez dziedziny \mathcal{D}_S) zmiennych decyzyjnych G (struktury kompetencji zespołu), X^Θ (przydziału) oraz R_ω^λ (odporności na absencje ω pracowników), dla których spełnione

są wszystkie ograniczenia zadane w zbiorze \mathcal{C}_S (m.in. ograniczenie $R_\omega^\lambda \geq R^*$). Innymi słowy w ramach rozwiązania PS_S też poszukiwana jest taka postać, struktury kompetencji która gwarantuje odporność R_ω^λ w zadanym stopniu R^* .

W ogólnym przypadku, tak zdefiniowany PS_S można rozważać w kategoriach problemów optymalizacyjnych koncentrujących się na wyznaczeniu minimalnej struktury kompetencji G_{OPT} (np. wymagającej najmniejszej liczby zmian wejściowej (początkowej) struktury kompetencji). Rozszerzenie PSO na problem optymalizacyjny (Constrained Optimization Problem) [25] przedstawia formuła:

$$CO_S = \left((\mathcal{V}_S, \mathcal{D}_S), \mathcal{C}_S, F_S \right), \quad (19)$$

gdzie: $\mathcal{V}_S, \mathcal{D}_S, \mathcal{C}_S$ definiowane jak w (18), F_S – funkcja celu:

$$F_S(G) = \sum_{k=1}^{i=1 \dots n+\lambda} g_{k,i} \quad (20)$$

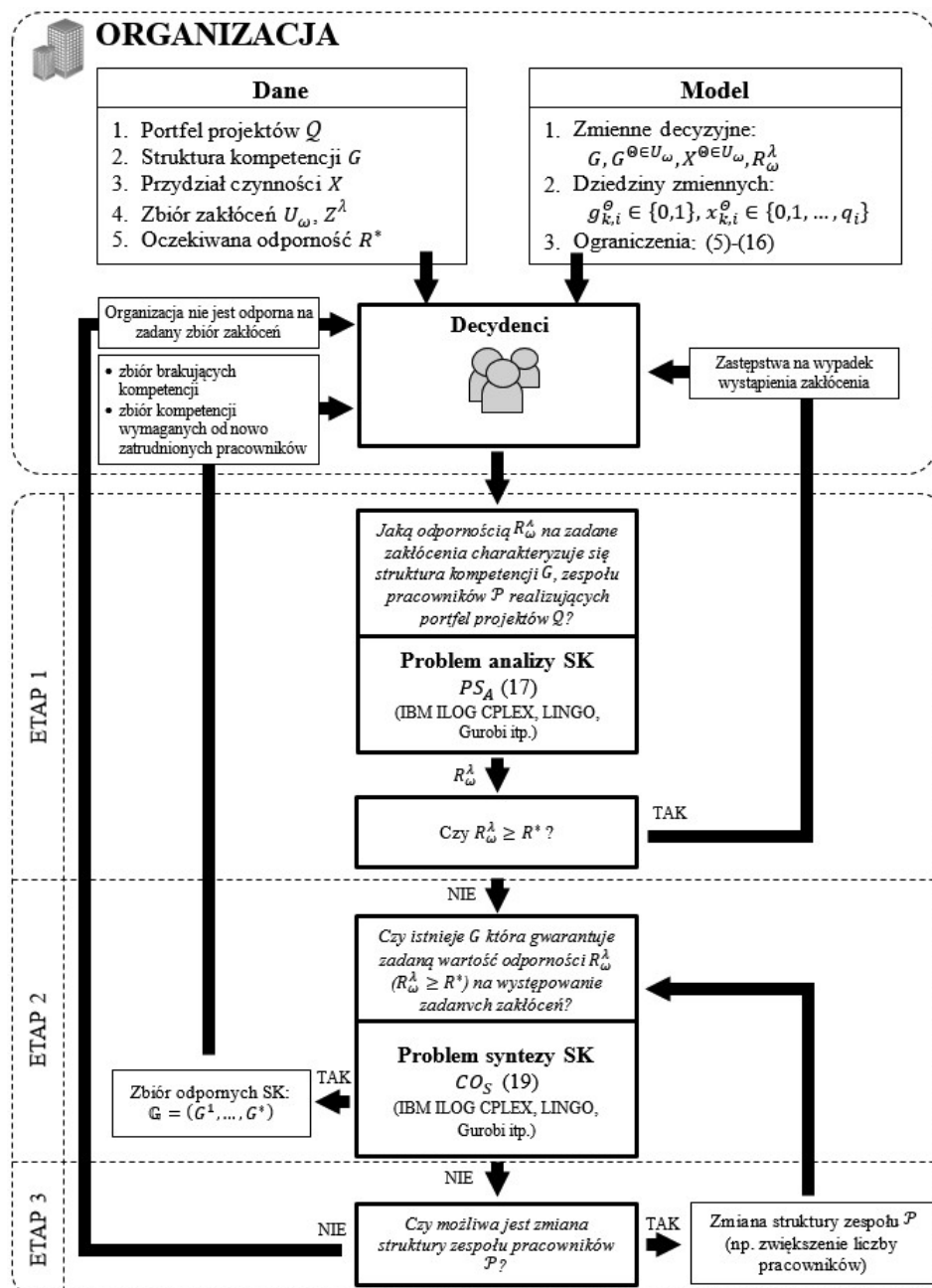
Rozwiązanie problemu CO_S (19) sprowadza się do wyznaczenia takich wartości zmiennych decyzyjnych G_{OPT} , dla których spełnione są wszystkie ograniczenia zadane w zbiorze \mathcal{C} a funkcja F_S osiąga wartość minimalną (wymuszającą minimalną liczbę zmian w początkowej strukturze kompetencji G - inaczej mówiąc, zwracającą minimalną strukturę kompetencji). W ogólności problem spełniania ograniczeń CO_S (19) umożliwia syntezę minimalnych SK odpornych na jednoczesne absencje ω pracowników i wystąpienie λ dodatkowych czynności.

Przyjęcie tak sformułowanych problemów analizy i syntezy PS_A (17) i CO_S (19), implementowanych w środowiskach CP, umożliwia budowę metody wspierającej planowanie struktur kompetencji w zakresie poszukiwania takich ich postaci, które zapewnią ciągłość realizacji zaplanowanego portfela projektów w sytuacjach występowania zadanego zbioru zakłóceń (absencji pracowniczej, niezaplanowanych operacji).

3. Metoda planowania struktur kompetencji odpornych na zakłócenia

Działanie metody PSK zakłada, że w organizacji dostępne są informacje o pracownikach (dany jest zespół pracowników \mathcal{P} jak i charakteryzująca go struktura kompetencji G) i realizowanym portfelu projektów Q (w tym przydział czynności X) oraz ustalone są ograniczenia opisujące wiążące je relacje (5)-(16). Przyjmuje się, że decydent korzystający z tej metody ma świadomość o możliwości wystąpienia określonego zbioru zakłóceń (absencje pracowników U_ω i/lub zlecenia dodatkowych operacji Z^λ) w trakcie realizacji portfela Q . Wykorzystanie opracowanej metody sprowadza się do realizacji trzech etapów (rys. 2):

1. **Oceny odporności R_{ω}^{λ} aktualnie zatrudnionej kadry sprowadzająca się do rozwiązania problemu analizy PS_A (17).** Jeśli uzyskany wynik jest pozytywny (tzn. wartość odporności R_{ω}^{λ} osiąga co najmniej wartość R^*) decydent otrzymuje informację (przydział X) o tym jak w sytuacji wystąpienia zakłócenia typu U_{ω} i/lub Z^{λ} , organizować zastępstwa, tzn. jakie dodatkowe czynności któremu z pracowników należy przydzielić. Jeśli uzyskany wynik jest niesatysfakcjonujący dla decydenta (tzn. wartość odporności R_{ω}^{λ} jest mniejsza niż oczekiwana wartość R^*) ma on możliwość wykorzystania metody PSK do poszukiwania takich zmian kompetencji G u zatrudnionych pracowników, które będą gwarantowały oczekiwaną wartość odporności (patrz etap 2).
2. **Syntezy minimalnej struktury kompetencji (problem CO_S (19)), gwarantującej osiągnięcie odporności R_{ω}^{λ} na oczekiwanym poziomie $R_{\omega}^{\lambda} \geq R^*$.** W przypadku pozytywnej odpowiedzi decydent otrzymuje zbiór alternatywnych postaci SK (G), na podstawie którego ma możliwość podjęcia decyzji o ewentualnym dalszym rozwoju zatrudnionych pracowników. Odpowiednio wczesne uzupełnienie brakujących kompetencji (przeprowadzenie szkoleń, zdobycie uprawnień itp.) pozwala na terminową realizację portfela Q . W przypadku odpowiedzi negatywnej, decydent uzyskuje informację, że dany zespół pracowników, nie jest w stanie rozwinąć posiadanych kompetencji do takiej postaci aby zagwarantować realizację portfela projektów w sytuacji wystąpienia rozważanego rodzaju zakłóceń. Oznacza to, że decydent ma możliwość podjęcia decyzji (etap 3) o zmianie struktury zespołu pracowników (np. w trybie zatrudnienia i/lub outsourcingu nowych pracowników).
3. **Zmiany struktury zespołu pracowników \mathcal{P} .** Synteza nowej struktury kompetencji (problem CO_S (19)) zespołu, uwzględniająca predyspozycje nowo zatrudnionych pracowników, umożliwia określenie niezbędnych kompetencji jakimi powinni się legitymować kandydaci do pracy. Wynikiem realizacji tego etapu jest zbiór kompetencji oczekiwanych od nowo zatrudnionych pracowników, który pozwala uzyskać odporność R_{ω}^{λ} na oczekiwanym poziomie $R_{\omega}^{\lambda} \geq R^*$.



Rys. 2. Metoda PSK [opracowanie własne]

4. Eksperymenty obliczeniowe

W celu weryfikacji poprawności działania metody przeprowadzono eksperyment oparty na danych pozyskanych z przedsiębiorstwa Kaliop Poland Sp. z o.o., które specjalizuje się w realizacji projektów sektora IT. Przeprowadzona weryfikacja polegała na próbie syntezy SK, które zapewniłyby odporność na zaistniałe w historii zakłócenia.

Na potrzeby prowadzonych eksperymentów wykorzystano dane portfela Q składającego się z 7 projektów (realizowanych w okresie styczeń/luty 2020 roku): $Q = \{Q_1, \dots, Q_7\}$. Zbiór Z obejmuje łącznie 108 operacji: $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{108}\}$. Operacje przydzielono do projektów w następujący sposób: $Z_1 = \{Z_1, \dots, Z_{13}\}$, $Z_2 = \{Z_{14}, \dots, Z_{26}\}$, $Z_3 = \{Z_{27}, \dots, Z_{38}\}$, $Z_4 = \{Z_{39}, \dots, Z_{50}\}$, $Z_5 = \{Z_{51}, \dots, Z_{67}\}$, $Z_6 = \{Z_{68}, \dots, Z_{89}\}$, $Z_7 = \{Z_{90}, \dots, Z_{108}\}$.

Dla każdej operacji Z_i określono: liczbę czynności q_i koniecznych do zrealizowania w ramach operacji Z_i , czas trwania l_i każdej czynności [dni], liczbę pracowników φ_i wymaganą do realizacji każdej czynności, momenty rozpoczęcia y_i oraz zbiory wykluczania w_i (tabela 1). Sieci operacji $DG_1 - DG_7$ projektów portfela Q przedstawiono na rys. 3.

Tabela 1. Zbiór operacji Z portfela projektów Q [opracowanie własne]

Z_i	q_i	y_i	l_i [dni]	w_i	φ_i
Z_1	1	0	4	\emptyset	2
Z_2	1	4	2	$\{Z_3, Z_{39}\}$	2
Z_3	1	4	2	$\{Z_2, Z_{39}\}$	2
Z_4	1	6	4	$\{Z_{39}, Z_{40}\}$	3
Z_5	1	10	4	$\{Z_6, Z_7, Z_8, Z_{14}, Z_{40}, Z_{41}, Z_{42}, Z_{43}, Z_{44}\}$	2
...
Z_{50}	1	21	2	$\{Z_{18}, Z_{19}, Z_{20}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{51}, Z_{52}\}$	1
...
Z_{107}	1	37	3	$Z_{29}, Z_{62}, Z_{63}, Z_{77}, Z_{82}, Z_{83}, Z_{106}\}$	2
Z_{108}	1	40	3	$\{Z_{30}, Z_{31}, Z_{32}, Z_{63}, Z_{64}, Z_{78}, Z_{84}, Z_{85}\}$	1

Do realizacji portfela projektów Q zatrudniono łącznie 36 pracowników (programistów, specjalistów baz danych, projektantów, grafików, testerów oprogramowania). Zgodnie z wprowadzoną notacją zespół pracowników opisano zbiorem $\mathcal{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_{36}\}$, którego strukturę kompetencji przedstawiono w tabeli 2. W związku z wymaganiami ochrony danych osobowych, przetwarzane dane

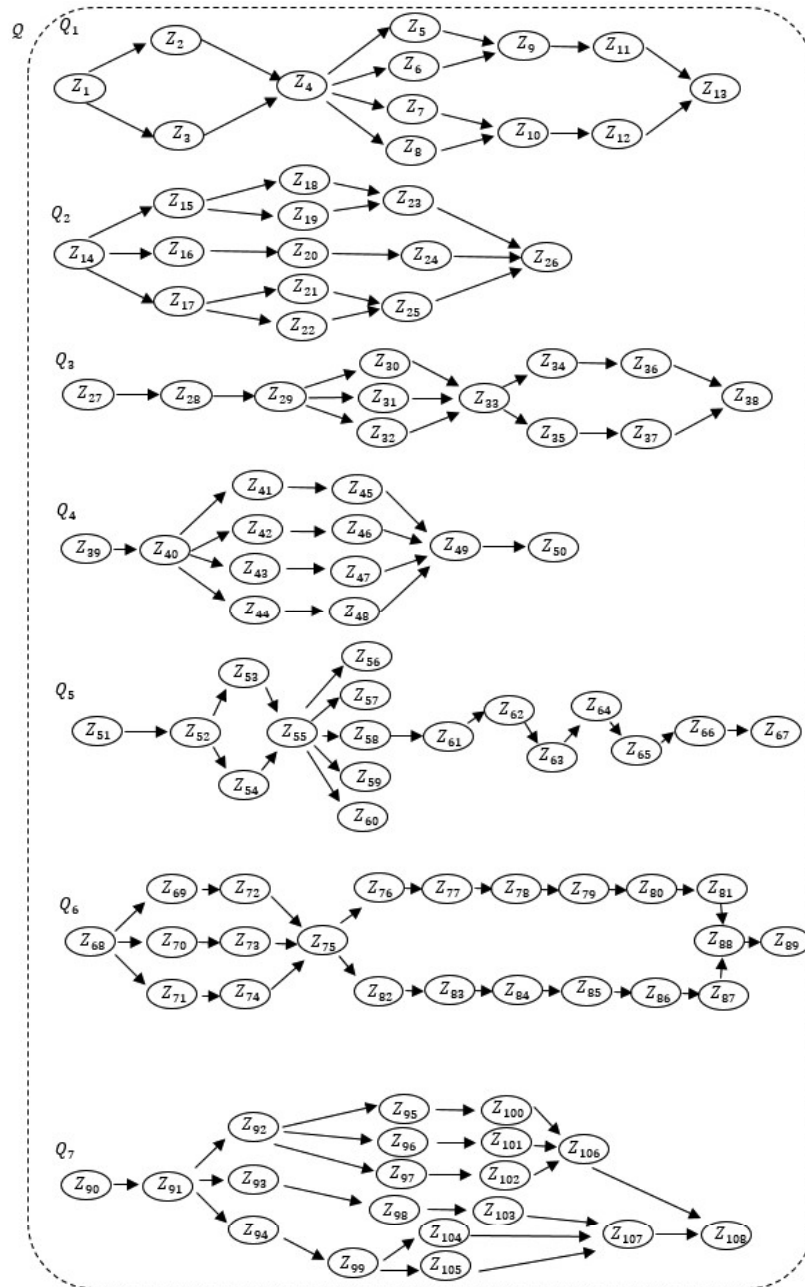
poddano pseudonimizacji. Wartości komórek tabeli 2 określają wartości zmiennych $g_{k,i}$ struktury G i oznaczają:

- 1 – pracownik P_k posiada kompetencje do realizacji operacji Z_i ($g_{k,i} = 1$),
- $\{0,1\}$ – pracownik P_k nie posiada kompetencji do realizacji operacji Z_i ale może je zdobyć ($g_{k,i} \in \{0,1\}$),
- 0 – pracownik P_k nie posiada kompetencji do realizacji operacji Z_i i nie może ich zdobyć ($g_{k,i} = 0$).

Ponadto dla każdego pracownika zbioru \mathcal{P} znany jest dolny (s_k) i górny (z_k) wymiar czasu pracy przeznaczony na rzecz realizowanych projektów (Tabela 3). Przykładowo, okres zaangażowania pracownika P_1 (Krajewski) wynosi od 10 do 53 dni. Przyjmuje się również, że wymiary godzin zajęć poszczególnych pracowników nie zmieniają się w czasie.

Tabela 2. Struktura kompetencji G pracowników Kaliop (plik “G_bazowa.xlsx” na stronie: <https://github.com/erykszw/Kaliop>) [opracowanie własne]

G	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	...	...	Z_{50}	...	...	Z_{107}	Z_{108}
P_1 : Krajewski	0	0	0	1	1	...	...	0	...	...	1	0
P_2 : Świerk	0	1	1	1	0	...	...	1	...	...	$\{0,1\}$	1
P_3 : Seroczyński	1	1	1	0	$\{0,1\}$	...	...	$\{0,1\}$	...	...	0	$\{0,1\}$
P_4 : Figurska	$\{0,1\}$	1	1	0	1	...	...	$\{0,1\}$	...	...	1	$\{0,1\}$
P_5 : Zaniewska	1	0	0	1	0	...	...	$\{0,1\}$	...	...	1	$\{0,1\}$
P_6 : Hoffmann	$\{0,1\}$	1	1	0	$\{0,1\}$	...	...	1	...	...	0	1
...
P_{20} : Malarz	1	1	1	$\{0,1\}$	0	...	...	1	...	...	0	1
...
P_{34} : Żyliński	1	1	1	0	0	...	...	1	...	...	1	1
P_{35} : Radzik	0	$\{0,1\}$	$\{0,1\}$	1	1	...	...	1	...	...	0	1
P_{36} : Stenka	0	0	0	1	1	...	...	0	...	...	1	0



Rys. 3. Sieć operacji dla portfela projektów $Q = \{Q_1, \dots, Q_7\}$ [opracowanie własne]

Tabela 3. Limity czasu pracy pracowników Kaliop [opracowanie własne]

	s_k	z_k		s_k	z_k		s_k	z_k		s_k	z_k
P_1 : Krajewski	10	53	P_{11} : Fatyga	10	25	P_{21} : Wątor	20	53	P_{31} : Karwan	20	53
P_2 : Świerk	20	53	P_{12} : Sawczuk	20	53	P_{22} : Maliński	20	53	P_{32} : Frączyk	20	53
P_3 : Seroczyński	20	53	P_{13} : Fojcik	20	53	P_{23} : Kostecka	20	53	P_{33} : Mucha	20	53
P_4 : Figurska	20	53	P_{14} : Środa	20	53	P_{24} : Szot	20	53	P_{34} : Żyliński	20	53
P_5 : Zaniewska	20	53	P_{15} : Kupis	10	25	P_{25} : Śliwa	10	25	P_{35} : Radzik	10	25
P_6 : Hoffmann	20	53	P_{16} : Bielawa	20	53	P_{26} : Kida	20	53	P_{36} : Stenka	20	53
P_7 : Drelich	10	25	P_{17} : Szal	20	53	P_{27} : Kopacz	10	25		10	25
P_8 : Sroga	10	25	P_{18} : Ozimek	20	53	P_{28} : Poliński	20	53		20	53
P_9 : Lisiecka	20	53	P_{19} : Kulpa	10	25	P_{29} : Uszyńska	20	53		20	53
P_{10} : Bednarski	10	25	P_{20} : Malarz	20	53	P_{30} : Filar	20	53		20	53

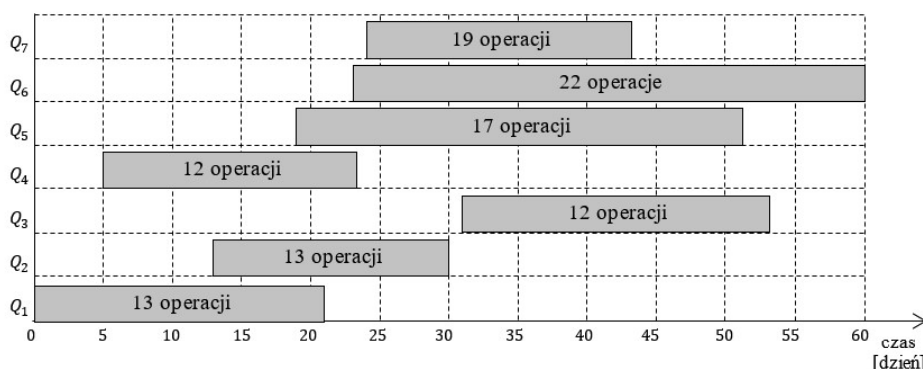
Odpowiadający tym założeniom przydział X , ilustruje tabela 4. Spełnia on następujące wymagania:

- czynności operacji Z_i realizują tylko kompetentni pracownicy,
- limity czasu pracy (s_k, z_k) nie mogą być przekroczone,
- w każdym momencie czasu pracownik P_k może realizować maksymalnie jedną czynność danej operacji,
- wykorzystywane zasoby są niewywłaszczalne, tzn. że pracownik realizujący daną czynność nie może jej przerwać w celu podjęcia innej.

Harmonogram realizacji portfela projektów przedstawia rys. 4. Z harmonogramu widać, że portfel projektów Q powinien zostać ukończony w ciągu 60 dni. Realizacja projektów Q_1, \dots, Q_7 w tym okresie odbywa się równolegle. Okresy realizacji poszczególnych projektów są następujące: $Q_1: 0 - 21$; $Q_2: 13 - 30$; $Q_3: 31 - 53$; $Q_4: 5 - 23$; $Q_5: 19 - 51$; $Q_6: 23 - 60$; $Q_7: 24 - 43$.

Tabela 4. Przydział czynności X dla pracowników Kaliop w ramach realizacji portfela Q [opracowanie własne]

G	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	...	...	Z_{50}	...	...	Z_{107}	Z_{108}
P_1 : Krajewski	0	0	0	0	0	...	...	0	...	...	0	0
P_2 : Świerk	0	0	0	0	0	...	...	0	...	...	0	0
P_3 : Seroczyński	0	0	0	0	0	...	...	0	...	...	0	0
P_4 : Figurska	0	0	0	0	0	...	...	0	...	...	0	0
P_5 : Zaniewska	4	0	0	0	0	...	...	0	...	...	0	0
P_6 : Hoffmann	0	2	0	0	0	...	...	0	...	...	0	3
...
P_{20} : Malarz	0	0	0	0	0	...	...	0	...	...	0	0
...
P_{34} : Żyliński	0	0	0	0	0	...	...	0	...	...	0	0
P_{35} : Radzik	0	0	0	0	0	...	...	0	...	...	0	0
P_{36} : Stenka	0	0	0	0	0	...	...	0	...	...	0	0

**Rys. 4.** Harmonogram realizacji portfela projektów Q [opracowanie własne]

W trakcie realizacji rozważanego portfela projektów Q może dochodzić do zakłóceń związanych z absencjami pracowników i/lub zleceniami dodatkowych czynności, nieplanowanych w ramach portfela Q . W przeprowadzonych eksperymentach podjęto próbę syntezy struktury kompetencji G , zabezpieczającą Kaliop (odporność $R_\omega^\lambda = 1$) przed następstwem jednoczesnej absencji dowolnych $\omega = 1, \dots, 3$ pracowników oraz dodatkowo wprowadzanych zleceń $\lambda = 10$.

4.1. Synteza SK odpornych na jednoczesną absencję ω pracowników

Celem eksperymentów jest wykorzystanie metody PSK do syntezy struktury kompetencji G , zabezpieczającej Kaliop (odporność $R_\omega^\lambda = 1$) przed następstwem jednoczesnej absencji $\omega = 1, \dots, 3$ pracowników. Rozważany problem sprowadza się do poszukiwania odpowiedzi na pytanie:

Czy istnieje struktura kompetencji (jeśli tak to jaka jest jej minimalna postać) G_{OPT} zespołu pracowników zatrudnionych w Kaliop, która gwarantuje odporność $R_\omega^\lambda = 1$ w sytuacji absencji ω pracowników ($\omega = 1, 2, 3$; $\lambda = 0$)?

Wyniki uzyskano w czasie $t = 8,1$ s (przypadek $\omega = 1$), $t = 29,4$ s (przypadek $\omega = 2$), $t = 658$ s (przypadek $\omega = 3$). Odpowiedź jest pozytywna tylko gdy $\omega = 1$. Struktura kompetencji G_{OPT}^1 (indeks górny oznacza wariant absencji $\omega = 1$) gwarantująca odporność R_ω^λ została przedstawiona w pliku "Gopt1.xlsx" znajdującym się na stronie: <https://github.com/erykszw/Kaliop>.

W przypadku jednoczesnej absencji większej liczby pracowników ($\omega = 2, 3$) odpowiedź na powyższe pytanie jest negatywna tzn. nie jest możliwe uzyskanie odporności $R_\omega^\lambda = 1$. Maksymalna wartość odporności dla poszczególnych przypadków zakłóceń $\omega = 2, 3$ wynosi: $R_2^0 = 0,99$, $R_3^0 = 0,76$. Struktury kompetencji G_{OPT}^2 , G_{OPT}^3 (indeks górny oznacza wariant absencji $\omega = 2, 3$) odpowiadające ww. wartościom odporności R_ω^λ zostały przedstawione w Gopt2_Gopt3.xlsx (<https://github.com/erykszw/Kaliop>).

Uzupełnienie kompetencji wskazanych w strukturze G_{OPT}^1 (17 nowych kompetencji) pozwoli zabezpieczyć firmę przed skutkami wszystkich możliwych scenariuszy jednostkowych absencji pracowniczych. Zmiany kompetencji wskazane w strukturze G_{OPT}^2 (39 nowych kompetencji) pozwolą zabezpieczyć Kaliop przed skutkami 99% możliwych scenariuszy jednoczesnych absencji dowolnych dwóch pracowników. Uzyskana wartość $R_2^0 = 0,99$ jest odpornością struktury pełnej GP . Oznacza to, że dalsze działania, mające na celu uzyskanie wartości $R_2^0 = 1$, wiążą się z koniecznością zatrudnienia dodatkowych pracowników, a w szczególności z odpowiedzią na pytanie:

Pracownicy o jakich kompetencjach powinni zostać zatrudnieni aby struktura kompetencji G , gwarantowała odporność $R_\omega^\lambda = 1$ w sytuacji absencji ω pracowników ($\omega = 2, 3$; $\lambda = 0$)?

W rozważanym przypadku odpowiedź na to pytanie uzyskano w czasie $t = 33,8$ s ($\omega = 2$), $t = 694$ s ($\omega = 3$) - Gopt2_Gopt3_R=1.xlsx (<https://github.com/erykszw/Kaliop>). Odporność $R_\omega^\lambda = 1$ ($\omega = 2, 3$) warunkowana jest koniecznością zatrudnienia pracowników posiadających:

- 1 kompetencję umożliwiającą realizację operacji: Z_{27} (przypadek $\omega = 2$),
- 17 kompetencji umożliwiających realizację operacji: $Z_{27}, Z_{56}, Z_{57}, Z_{58}, Z_{59}, Z_{60}, Z_{76}, Z_{77}, Z_{78}, Z_{79}, Z_{80}, Z_{81}, Z_{95}, Z_{96}, Z_{97}, Z_{98}, Z_{99}$ (przypadek $\omega = 3$).

Zatrudnienie pracowników legitymujących się powyższymi kompetencjami pozwoli zabezpieczyć Kaliop przed skutkami wszystkich możliwych scenariuszy absencji pracowników ($\omega = 2, 3$).

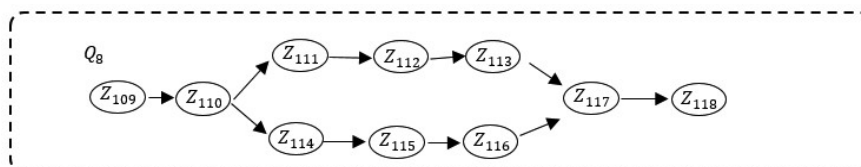
4.2. Synteza SK odpornych na absencję ω pracowników i zlecenie dodatkowych λ operacji

Wykorzystując dane firmy Kaliop przeprowadzono jeszcze jeden eksperyment związany z syntezą SK odpornej na wypadek dodatkowo pojawiających się zleceń (firma doświadcza tego typu zakłóceń kilka razy w roku). Nowy projekt Q_8 (zlecenie rutynowych prac w zakresie przygotowania aplikacji mobilnej dla klienta) rozpoczyna się 42 dnia i składa się z 10 operacji $Z_8 = \{Z_{109}, \dots, Z_{118}\}$. Dane dotyczące nowego projektu zostały zebrane w tabeli 5.

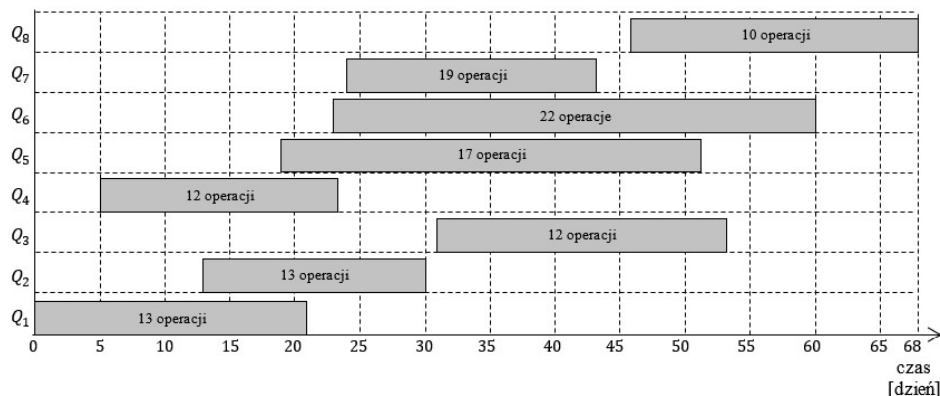
Sieć operacji projektu Q_8 przedstawiono na rys. 5. Harmonogram realizacji portfela projektów Q uzupełniony o nowy projekt przedstawia rys. 6.

Tabela 5. Zbiór dodatkowych λ operacji Z [opracowanie własne]

Z_i	q_i	y_i	l_i [dni]	w_i	φ_i
Z_{109}	1	46	3	$\{Z_{34}, Z_{35}, Z_{36}, Z_{37}, Z_{67}, Z_{80}, Z_{87}\}$	1
Z_{110}	1	49	2	$\{Z_{36}, Z_{37}, Z_{67}, Z_{80}\}$	1
Z_{111}	1	51	4	$\{Z_{38}, Z_{80}, Z_{81}, Z_{114}, Z_{115}\}$	2
Z_{112}	1	55	4	$\{Z_{81}, Z_{88}, Z_{89}, Z_{116}\}$	2
Z_{113}	1	59	4	$\{Z_{89}\}$	2
Z_{114}	1	51	2	$\{Z_{38}, Z_{80}, Z_{81}, Z_{111}\}$	2
Z_{115}	1	53	2	$\{Z_{81}, Z_{111}\}$	2
Z_{116}	1	55	2	$\{Z_{81}, Z_{88}, Z_{112}\}$	2
Z_{117}	1	63	3	\emptyset	1
Z_{118}	1	65	2	\emptyset	1



Rys. 5. Sieć operacji projektu Q_8 [opracowanie własne]



Rys. 6. Harmonogram realizacji portfela projektów Q z dodatkowo zleconym projektem Q_8 [opracowanie własne]

Struktura kompetencji, zawierająca informacje o posiadanych kompetencjach do realizacji nowo zleconych operacji przedstawiono w pliku `G_dodatkowe.xlsx` (<https://github.com/erykszw/Kaliop>).

Wykorzystując metodę PSK poszukiwano odpowiedzi na następujące pytanie:

Czy istnieje struktura kompetencji (jeśli tak to jaka jest jej minimalna postać) G_{OPT} zespołu pracowników zatrudnionych w Kaliop, która gwarantuje odporność $R_\omega^\lambda = 1$ w sytuacji absencji ω pracowników i zlecenia dodatkowych λ operacji ($\omega = 1, 2, 3$; $\lambda = 10$)?

Wyniki uzyskano w czasie $t = 9,3$ s (przypadek $\omega = 1$), $t = 32,1$ s (przypadek $\omega = 2$), $t = 675$ s (przypadek $\omega = 3$). Pozytywną odpowiedź otrzymano tylko w sytuacji gdy $\omega = 1$. Struktura kompetencji G_{OPT}^1 (indeks górny oznacza wariant absencji $\omega = 1$) gwarantująca odporność R_ω^λ została przedstawiona w pliku “`Gopt1_dodatkowe.xlsx`”, <https://github.com/erykszw/Kaliop>.

W przypadku jednoczesnej absencji większej liczby pracowników ($\omega = 2, 3$) odpowiedź na powyższe pytanie jest negatywna tzn. nie jest możliwe uzyskanie odporności $R_\omega^\lambda = 1$. Maksymalna wartość odporności dla poszczególnych przypadków rozważanych zakłóceń $\omega = 2, 3$ wynosi: $R_2^{10} = 0,95$, $R_3^{10} = 0,70$. Struktury kompetencji G_{OPT}^2 , G_{OPT}^3 (indeks górny oznacza wariant absencji $\omega = 2, 3$) odpowiadające ww. wartościom odporności R_ω^λ zostały przedstawione w `Gopt2_Gopt3_dodatkowe.xlsx` (<https://github.com/erykszw/Kaliop>).

Uzupełnienie kompetencji zgodnie z wyznaczoną strukturą G_{OPT}^1 (19 nowych kompetencji) pozwoli zabezpieczyć firmę przed skutkami jednostkowej absencji pracowniczej przy założeniu realizacji dodatkowego projektu Q_8 . Z kolei uzupeł-

nienie kompetencji zgodnie z G_{OPT}^2 (43 nowych kompetencji) pozwoli zabezpieczyć Kaliop przed skutkami 95% możliwych scenariuszy jednoczesnych absencji dowolnych dwóch pracowników. Dalsze zmiany w strukturze kompetencji nie przyniosą poprawy jej odporności. Uzyskanie wartości $R_2^0 = 1$ wiąże się z koniecznością zatrudnienia dodatkowych pracowników, a w szczególności z odpowiedzią na pytanie:

Pracownicy o jakich kompetencjach powinni zostać zatrudnieni aby struktura kompetencji G , gwarantowała odporność $R_\omega^\lambda = 1$ w sytuacji absencji ω pracowników i zlecenia dodatkowych λ operacji ($\omega = 2, 3; \lambda = 10$)?

W rozważanym przypadku odpowiedź uzyskano w czasie $t = 36,9$ s (przypadek $\omega = 2; \lambda = 10$), $t = 707$ s (przypadek $\omega = 3; \lambda = 10$) - plik "Gopt2_Gopt3_R=1_dodatkowe.xlsx", <https://github.com/erykszw/Kaliop>). Odporność $R_\omega^{10} = 1$ ($\omega = 2, 3$) warunkowana jest koniecznością zatrudnienia pracowników posiadających:

- 3 kompetencje do realizacji operacji: Z_{27}, Z_{62}, Z_{90} (przypadek $\omega = 2; \lambda = 10$),
- 21 kompetencji do realizacji operacji:
 $Z_{27}, Z_{56}, Z_{57}, Z_{58}, Z_{59}, Z_{60}, Z_{62}, Z_{68}, Z_{76}, Z_{77}, Z_{78}, Z_{79},$
 $Z_{80}, Z_{81}, Z_{90}, Z_{95}, Z_{96}, Z_{97}, Z_{98}, Z_{99}, Z_{113}$ (przypadek $\omega = 3; \lambda = 10$).

Uwzględnienie zakłócenia powodowanego nieprzewidzianym wprowadzeniem dodatkowego projektu Q_8 sprawia, że uzyskanie odporności $R_\omega^{10} = 1$ ($\omega = 2, 3$) wymaga zatrudnienia pracowników posiadających odpowiednio o 2 (dla $\omega = 2; \lambda = 10$), i 5 kompetencji więcej (przypadek $\omega = 2; \lambda = 10$) niż miało to miejsce w sytuacji uwzględniającej tylko absencję pracowniczą.

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu demonstrują możliwość wykorzystania metody w planowaniu kompetencji pracowników, rozwoju zawodowego posiadanej kadry, a przede wszystkim planowania kadr w warunkach ciągłych zmian, biorącym pod uwagę nieplanowane zdarzenia (absencje, zlecenie dodatkowych czynności itp.). Zaprezentowany przykład projektów realizowanych w przedsiębiorstwie branży IT może służyć jako punkt wyjścia do dalszych badań opracowanego rozwiązania w innych branżach. W tym kontekście przyszłe prace będą koncentrować się na opracowaniu modułu obliczeniowego, który może być używany jako nakładka programowa dla dostępnych na rynku komercyjnych Systemów Wspomagania Decyzji (SWD) wykorzystywanych w zarządzaniu zasobami ludzkimi.

5. Wnioski i kierunki dalszych prac

Poszukiwanie struktur kompetencji gwarantujących wykonanie zaplanowanych czynności sprowadza się do poszukiwania (syntezy) alternatywnych struktur kompetencji, które są odporne na dany (znany a priori) zbiór zakłóceń.

Wyniki eksperymentów pokazują, że proponowane podejście można wdrożyć w systemach wspomagania decyzji (SWD) wykorzystywanych do przydzielania czynności. W tym kontekście nasze przyszłe prace będą koncentrować się na opracowaniu modułu obliczeniowego, który może posłużyć jako nakładka oprogramowania dla dostępnych na rynku systemów wspomagania decyzji wykorzystywanych w zarządzaniu zasobami ludzkimi. Omówione funkcjonalności można potraktować jako rozwiązania wchodzące w zakres controllingu zasobów ludzkich [9], których celem jest efektywne zarządzanie personelem przy tworzeniu przejrzystych zasad i procedur planowania, monitorowania i kontroli. Wdrożenie tego typu funkcjonalności w systemach klasy HRMS/CMS umożliwi wcześnie wykrywanie potrzeb i szybkie wariantowanie alternatywnych decyzji w zakresie zarządzania kompetencjami zatrudnianej kadry. Rozwiązanie takie pozwoli na podejmowanie decyzji personalnych wymuszanych przez absencję i/lub fluktuację personelu, zmiany legislacyjne, modyfikacje zakresu zleceń, zmiany wymagań klientów itp.

W przyszłej pracy planujemy skupić się na odporności struktur kompetencji na inne zakłócenia, takie jak zmiana czasu trwania zadań itp. Planowane jest również wykorzystanie różnych wariantów podejścia hybrydowego do wdrażania proponowanych modeli [26].

Wątkiem wartym podjęcia w zakresie przyszłej modyfikacji modelu jest ocena kosztów - i czasochłonności zmian w strukturze kompetencji. Przedstawiany model zakłada, że koszt/czas każdej nabytej kompetencji jest taki sam. Wprowadzając odpowiednie parametry kosztu i czasu możliwym stanie się poszukiwanie takich wariantów struktur kompetencji, które będą mogły znaleźć również swoje ekonomiczne uzasadnienie.

Sfinansowano ze środków „Narodowego Centrum Nauki”, w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2019/33/N/HS4/00379

Bibliografia:

1. Antosz K.: Utrzymanie ruchu – identyfikacja i analiza luki kompetencyjnej, Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 20(3), 2018.
2. Appelbaum E.: Manufacturing advantage: Why high-performance work systems pay off. Cornell University Press, 2000.

3. Banaszak Z.: Modele i algorytmy sztucznej inteligencji. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009.
4. Becker B., Huselid M.: Strategic Human Resources Management: Where Do We Go From Here? *Journal of Management* 32(6), 2006, 898-925.
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., Vătmănescu E.M., Mitan A. (eds.) *Shift! Major challenges of today's economy*. Bucharest: Tritonic Publishing House, 2017, 121-132.
7. Bugaj J.: Bilansowanie kompetencji nauczycieli akademickich – rekomendacja dla procesu. *Zarządzanie kapitałem ludzkim w warunkach niestabilności otoczenia*, (Red.) J. Kardas, Wydawnictwo Studio Emkasm 2014, 197-206.
8. Czop K.: Zdolność organizacji do zmian i jej wpływ na proces zarządzania zmianą. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej Zarządzanie* Nr 24, t. 2, 2016, 69-81.
9. Dugelova M., Strenitzerova M.: How to select appropriate human resource controlling indicators. *CBU International Conference On Innovation, Technology Transfer And Education*, Prague 2015.
10. Dück V., Ionescu L., Kliewer N., Suhl L.: Increasing stability of crew and aircraft schedules. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 20(1), 2012, 47-61.
11. Furman J.: Poprawa skuteczności utrzymania maszyn w przedsiębiorstwie produkcyjnym – studium przypadku. *Komputerowe zintegrowane zarządzanie*, 2016, 548-557.
12. Gangani N., McLean G., Braden R.: A competency-based human resources development strategy. *Performance Improvement Quarterly* 19(1), 2006, 127-139.
13. Gashi-Uciecha A.: Zakłócenia w procesach logistycznych przedsiębiorstw produkcyjnych – badania literaturowe, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i Zarządzanie*, z. 78., 2015, 131-141.
14. Hazir O., Haouari M., Erel E.: Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem. *European Journal of Operational Research* 207(1), 2010, 633-643.
15. Ingels J., Maenhout B.: The impact of reserve duties on the robustness of a personnel shift roster: an empirical investigation. *Computers & Operations Research* 61, 2015, 153-169

16. Ingels J., Maenhout B.: Optimised buffer allocation to construct stable personnel shift rosters. *Omega* 82, 2019, 102-117.
17. Ionescu L., Kliewer N.: Increasing flexibility of airline crew schedules. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 20, 2011, 1019-1028.
18. Kalmi P., Kauhanen A.: Workplace Innovations and Employee Outcomes: Evidence from Finland. *Industrial Relations* 47(3), 2008, 430-459.
19. Klimek M.: Predyktyno-reaktywne harmonogramowanie produkcji z ograniczoną dostępnością zasobów. Rozprawa doktorska. Kraków 2010.
20. Kramarz W.: Modelowanie przepływów materiałowych w sieciowych łańcuchach dostaw. Odporność sieciowego łańcucha dostaw wyrobów hutniczych. Difin, Warszawa 2013.
21. Krupski R.: Redundancje zasobów i procedur jako panaceum na niepewność otoczenia. *Organizacja i Zarządzanie*, Nr 2/2012 (151), 2012, 11-21.
22. Kupczyk T.: Competencies of management staff in the knowledge-based economy, Wyższa Szkoła Handlowa we Wrocławiu, Wrocław 2014.
23. Malen J., Vaaler P.M.: Organizational Slack, National Institutions and Innovation Effort around the World. *Journal of World Business* 52, 2017, 782-797.
24. Misiurek B.: Metodyka standaryzacji autonomicznych działań eksploatacyjnych zorientowana na poprawę efektywności maszyn zautomatyzowanych. Praca doktorska, Uniwersytet Technologiczny we Wrocławiu, Wrocław 2015.
25. Sitek P., Wikarek J.: A Hybrid Programming Framework for Modeling and Solving Constraint Satisfaction and Optimization Problems. *Scientific Programming* 2016.
26. Sitek P., Wikarek J.: A multi-level approach to ubiquitous modeling and solving constraints in combinatorial optimization problems in production and distribution. *Applied Intelligence* 48, 2018, 1344-1367.
27. Szwarc E., Bocewicz G., Banaszak Z., Wikarek J.: Competence allocation planning robust to unexpected staff absenteeism. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 21(3), 2019, 440-450.
28. Szwarc E., Wikarek J. Proactive planning of project team members' competences. *Foundations of Management* 12(1), 2020, 71-84.
29. Teodorescu T.: Competence versus competency. What is the difference? *Performance Improvement* 4 (10), 2006, 27-30.
30. Wierzbicki A.P.: Teoria i praktyka wspomaganie decyzji. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2018.
31. Wojtas-Klima M.: Istota tworzenia modeli kompetencji w przeprowadzeniu efektywnej rekrutacji i selekcji pracowników. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Organizacja i Zarządzanie*, z. 72, Nr kol. 1918, 2014, 197-207.