

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Transportu

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Konrad Lewczuk

**Metoda projektowania obiektów logistycznych w aspekcie
harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego**

**Promotor
prof. dr hab. Tomasz Ambroziak**

Warszawa 2010

Streszczenie

Rozprawa poświęcona jest problematyce projektowania obiektów logistycznych takich jak magazyny, centra dystrybucji, terminale przeładunkowe i inne, dla których transport wewnętrzny jest podstawą funkcjonowania. W rozprawie przedstawiono metodę projektowania obiektów logistycznych oraz wskazano teoretyczne i praktyczne aspekty jej stosowania. Metoda projektowania obiektów logistycznych została rozszerzona o zagadnienie harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego (PTW) i jego wpływ na parametry technologiczne i kosztowe projektu. Sformułowano zadanie optymalizacyjne harmonogramowania PTW, a następnie zaproponowano algorytm rozwiązania tego zadania, który umożliwia uzyskanie harmonogramu racjonalnego, tj. spełniającego wymagania praktyki.

W rozdziale pierwszym rozprawy przedstawiono obiekty logistyczne jako elementy systemów logistycznych lub łańcuchów transportowo-magazynowych. Pozwoliło to na określenie zewnętrznych uwarunkowań wpływających na procesy wewnętrzne zachodzące w obiektach logistycznych. Dokonano identyfikacji i wyodrębnienia obszaru badawczego w drodze przeglądu literatury z zakresu projektowania obiektów logistycznych i z zakresu szeregowania zadań (harmonogramowania). Wskazane zostały elementy procedur opisywane przez różnych autorów oraz wykazano, że proponowane podejście do harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego nie jest obecne w literaturze przedmiotu.

W rozdziale drugim rozprawy przedstawiono proponowaną metodę projektową, wraz z jej najważniejszymi elementami, tj. formułowaniem zadania logistycznego, kształtowaniem i wymiarowaniem procesu transportu wewnętrznego w obiekcie logistycznym oraz oceną rozwiązań projektowych. Treści rozdziału trzeciego dotyczące technicznych i aplikacyjnych aspektów harmonogramowania PTW pozwoliły na umiejscowienie tego zagadnienia w procedurze projektowej.

Rozdział czwarty zawiera sformułowanie zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW wraz z określeniem zbiorów danych, zmiennych decyzyjnych, ograniczeń i funkcji celu. Algorytm przybliżony rozwiązania zadania został przedstawiony w rozdziale piątym.

Rozdziały szósty i siódmy zawierają opis autorskiej aplikacji komputerowej SCHED wraz z odpowiednimi przykładami jej zastosowania. Aplikacja jest implementacją kroków projektowych proponowanej metody projektowania obiektów logistycznych oraz realizuje algorytm interaktywny rozwiązania zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW. Aplikacja jest narzędziem wspomagającym pracę projektanta.

The method of designing logistics facilities in terms of scheduling internal transport processes

Abstract

Dissertation is devoted to the problems of designing logistics facilities such as warehouses, distribution centers, cargo handling terminals and other for which internal transport is the basis of functioning. The dissertation presents a method of designing logistics facilities and identifies theoretical and practical aspects of its use. The method of designing logistics objects has been enlarged to include the question of scheduling internal transport processes (PTW) and its impact on technological and cost parameters of the project. Optimization task of scheduling internal transport process was formulated and solution algorithm allowing to get rational schedule meeting the requirements of practice was proposed.

The First Chapter presents logistic facilities as elements of logistics systems or supply chains. This allowed determining the external conditions affecting the internal transport processes taking place in logistics facilities. The research area was identified and isolated by reviewing the literature within a range of designing logistic facilities and task scheduling. Elements of the designing procedures described by other authors were indicated. Literature review reveals that proposed approach to the scheduling of internal transport process is not present in the literature.

The Second Chapter presents proposed designing method including its key elements; logistics tasks formulation, conceptualizing and sizing internal transport process in logistics facility and evaluation of designing alternatives. The Third Chapter contents concerning technical and application aspects of PTW scheduling problem allow location of this problem within a designing procedure.

The Fourth Chapter contains the formulation of scheduling PTW optimization task with identification of input data, decision variables, constraints and objective functions. Algorithm for the approximate solution of the problem was presented in Chapter Five.

Sixth and Seventh Chapters describe a computer application SCHED with relevant examples of usage. The application is an implementation of design steps of the proposed method of designing logistics facilities and includes an interactive solution algorithm for scheduling PTW optimization task. The application is a tool to assist the work of the designer.

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń.....	7
WSTĘP	9
1. IDENTYFIKACJA OBSZARU BADAWCZEGO	12
1.1. Obiekt logistyczny jako element systemu logistycznego.....	12
1.2. Problem badawczy.....	13
1.3. Projektowanie obiektów logistycznych w literaturze.....	15
1.4. Problematyka harmonogramowania procesów w literaturze.....	23
1.5. Metody harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego.....	25
1.6. Wspomaganie projektowania obiektów logistycznych.....	27
1.7. Teza badawcza i jej uzasadnienie.....	27
2. METODA PROJEKTOWANIA OBIEKTÓW LOGISTYCZNYCH	29
2.1. Wprowadzenie do metody.....	29
2.2. Zadanie logistyczne.....	32
2.3. Kształtowanie obiektów logistycznych.....	41
2.4. Wymiarowanie obiektów logistycznych.....	52
2.5. Ocena rozwiązań projektowych.....	64
3. HARMONOGRAMOWANIE PROCESU TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO	69
3.1. Proces transportu wewnętrznego.....	69
3.2. Proces transportu wewnętrznego jako przedmiot harmonogramowania.....	73
3.3. Konstruowanie harmonogramu PTW.....	76
3.4. Buforowanie przepływu materiałów a harmonogram PTW.....	83
3.5. Harmonogram PTW a projekt obiektu logistycznego.....	86
4. OPTIMALIZACJA HARMONOGRAMOWANIA PROCESU TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO	90
4.1. Dane i zmienne decyzyjne problemu harmonogramowania PTW.....	90
4.2. Układy ograniczeń problemu harmonogramowania PTW.....	93
4.3. Funkcje celu zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW.....	98
5. METODY ROZWIĄZANIA ZAGADNIENIA HARMONOGRAMOWANIA PROCESU TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO	102
5.1. Metody dokładne rozwiązania problemu harmonogramowania PTW.....	102
5.2. Programowanie matematyczne a zagadnienie harmonogramowania PTW.....	104
5.3. Algorytm aproksymacyjny rozwiązania zagadnienia harmonogramowania PTW.....	107
6. KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA OBIEKTÓW LOGISTYCZNYCH W ASPEKTCIE HARMONOGRAMOWANIA PROCESU TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO	119
6.1. Wspomaganie komputerowe projektowania obiektów logistycznych.....	119
6.2. Program SCHED.....	119
6.3. Implementacja metody projektowania obiektów logistycznych.....	123
6.4. Możliwości oraz ograniczenia programu SCHED.....	133

7. APLIKACJA METODY	134
7.1. Przykład obliczeniowy – projekt technologiczny obiektu logistycznego – magazynu dystrybucyjnego z komisjonowaniem.....	134
7.2. Odzwierciedlenie PTW i wprowadzanie danych do programu SCHED.....	142
7.3. Praca interaktywna z harmonogramem PTW.....	144
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	155
Literatura	158
Spis rysunków	162
Spis tabel	164
Załączniki	165
Załącznik 1 – Plik danych programu SCHED	165
Załącznik 3 – Plik wynikowy programu SCHED dla rozwiązania nr 4 przykładu	167

Wykaz ważniejszych skrótów i oznaczeń

jk	– jednostka kartonowa,
jłp	– jednostka ładunkowa paletowa,
jłpj	– jednostka ładunkowa paletowa jednorodna,
jłpk	– jednostka ładunkowa paletowa skompletowana,
oj	– opakowanie jednostkowe,
oz	– opakowanie zbiorcze,
PTW	– proces transportu wewnętrznego,
TW	– transport wewnętrzny,
ZL	– zadanie logistyczne,
σ	– współczynnik spiętrzeń strumienia materiałów,
$\lambda^{m/max}$	– wielkość miarodajna/maksymalna przepływów materiałów,
$\lambda_{WE/WY}^D$	– przeładunek dobowy na wejściu/wyjściu do/z obiektu logistycznego,
η	– stopień przetwarzania,
τ	– stopień komisjonowania,
ρ	– stopień wypełnienia jednostki komisjonowanej,
d_r	– liczba dni roboczych w ciągu roku,
$\lambda_{WE/WY}^R$	– przeładunek roczny na wejściu/wyjściu obiektu logistycznego,
$\sigma_{WE/WY}$	– współczynnik spiętrzeń strumienia materiałów na wejściu/wyjściu do/z obiektu logistycznego,
$I/I/i$	– zbiór numerów zadań / liczba zadań / numer zadania procesu transportu wewnętrznego,
$U/U/u$	– zbiór typów urządzeń / liczba typów urządzeń / typ urządzenia transportu wewnętrznego,
$C/C/c$	– zbiór numerów kategorii / liczba kategorii / numer kategorii pracy ludzkiej,
$P/P/p$	– zbiór typów / liczba typów / typ zasobu pracy,
$T/T/t$	– zbiór numerów odcinków czasu / liczba odcinków czasu / numer odcinka czasu na harmonogramie PTW,
$B/B/b$	– zbiór numerów buforów / liczba buforów / numer bufora transportu wewnętrznego,
XRD	– zbiór numerów rozwiązań dopuszczalnych harmonogramowania PTW,
D	– liczba rozwiązań dopuszczalnych problemu harmonogramowania PTW,
d	– numer rozwiązania dopuszczalnego problemu harmonogramowania PTW,
H/h	– (w indeksie górnym) „godzinowy”,
D	– (w indeksie górnym) „dobowy”,
R	– (w indeksie górnym) „roczny”,
LC	– (w indeksie dolnym) „dotyczy pracy ludzkiej”,
LU	– (w indeksie dolnym) „dotyczy pracy urządzeń”,
E	– (w indeksie dolnym) „eksploatacyjne”,
E_{upr}	– (w indeksie dolnym) „eksploatacyjne uproszczone”,
$I^{p/u/c}$	– zbiór numerów zadań wykonywanych przez p -ty typ zasobu / u -te urządzenie / c -tą kategorię pracy ludzkiej,
Γ^b	– pojemność b -tego bufora transportu wewnętrznego,
S^b	– liczba jednostek znajdująca się w b -tym buforze przed rozpoczęciem pracy,
Z^b	– zbiór par zadań pozostających ze sobą w zależności buforowania dla b -tego bufora,
$\lambda_i^{Dp/u/c}$	– dobowa liczba powtórzeń i -tego zadania przez p -ty zasób / u -te urządzenie / c -tą kategorię pracy ludzkiej,
t_i	– czas wykonania jednego powtórzenia i -tego zadania (czas cyklu),

-
- $t_i^{p/u/c}$ – czas wykonania jednego powtórzenia i -tego zadania (czas cyklu) przez p -ty zasób / u -te urządzenie / pracownika c -tej kategorii pracy ludzkiej,
 $L_i^{Dp/u/c}$ – dobowa rzeczywista pracochłonność realizacji i -tego zadania przez p -ty zasób / u -te urządzenie / c -tą kategorię pracy ludzkiej,
 $\tilde{L}_i^{Dp/u/c}$ – dobowa sprowadzona pracochłonność realizacji i -tego zadania przez p -ty zasób / u -te urządzenie / c -tą kategorię pracy ludzkiej,
 t_{dbr}^i – czas dysponowany brutto realizacji i -tego zadania,
 $t_{dbr}^{i/u}$ – czas dysponowany pracy urządzenia u -tego typu wykonującego i -te zadanie,
 $k^{p/u/c}$ – koszt godziny pracy p -tego zasobu / u -tego urządzenia / c -tej kat. pracy ludzkiej,
 k^b – koszt bazowy godziny pracy,
 $n_i^{p/u/c}$ – liczba zasobów p -tych / u -tych urządzeń / pracowników c -tej kategorii pracy ludzkiej, realizujących i -te zadanie,
 $n^{p/u/c}$ – liczba zasobów p -tych / u -tych urządzeń / pracowników c -tej kat. pracy ludzkiej,
 ω – współczynnik redukujący wykorzystania czasu pracy przez urządzenia i kategorie pracy ludzkiej,
 $l \cdot l_z$ – iloczyn liczby i długości zmiany roboczych na dobę,
 E – nakłady,
 K – koszty,
 $K_{LC/LU}^R$ – roczne koszty pracy ludzkiej / utrzymania urządzeń i infrastruktury,
 K^{Ro} – roczne koszty operacyjne,
 $K_{LU/LC}^{Ro}$ – roczne koszty operacyjne pracy urządzeń / pracy ludzi,
 K_{Eupr}^{Rd} – roczny koszt eksploatacyjny uproszczony dla d -tego rozwiązania dopuszczalnego problemu harmonogramowania PTW,
 κ – współczynnik amortyzacji,
 θ_{oz} – wskaźnik organizacyjny,
 $\theta_{oz}^{p/u/c}$ – wskaźnik równomierności wykorzystania p -tych zasobów / u -tych urządzeń / c -tych kategorii pracy ludzkiej,
 $x_i^{p,t}$ – binarna zmienna decyzyjna, przyjmująca wartość 1 jeżeli i -te zadanie ma być wykonywane przez p -ty zasób w t -tym odcinku czasu,
 r_i – minimalna długość odcinka czasu dysponowanego i -tego zadania,
 \mathbf{X}_d – d -te rozwiązanie dopuszczalne problemu harmonogramowania PTW,
 \mathbf{X}_n – dowolne n -te rozwiązanie problemu harmonogramowania PTW,
 O_{1-9} – ograniczenia problemu harmonogramowania PTW,
 w – wagi funkcji celu problemu harmonogramowania PTW,
 h_d – wskaźnik oceny jakości d -tego rozwiązania dopuszczalnego problemu harmonogramowania PTW,
 $F_{1a/1b/1c/2a/3a/3b/3c/4}(\mathbf{X}_d)$ – wartości funkcji celu dla d -tego rozwiązania dopuszczalnego.

Oznaczenia w rozprawie:

- Macierze / wektory – duże litery, pogrubione, np.: **B**
 Zbiory – duże litery, pogrubione, pochyle, np.: **B**
 Liczności zbiorów – duże litery, pochyle, np.: **B**
 Elementy zbiorów – małe litery, pochyle, np.: **b**.

WSTĘP

Projektowanie obiektu logistycznego jest interdyscyplinarnym i wieloetapowym zadaniem wymagającym uwzględnienia szeregu uwarunkowań i założeń technologicznych. Na każdym etapie projektowania podejmowane są decyzje wpływające na efektywności technologiczną i ekonomiczną inwestycji. Decyzje te muszą więc być wynikiem przemyślanego, sformalizowanego procesu decyzyjnego zwiększającego szansę uzyskania rozwiązań optymalnych lub do nich zbliżonych.

Projektowanie obiektów logistycznych takich jak magazyny, wykazuje cechy etapowości i powtarzalności. Możliwe jest wyróżnienie zasadniczych etapów wraz z charakterystycznymi dla nich typami danych wejściowych, rodzajami podejmowanych decyzji oraz wynikami. Etapy te, sformalizowane i ułożone w sekwencję, mogą być przekształcone w ogólną procedurę projektowania obiektów logistycznych. Taka procedura ułatwia podejmowanie decyzji oraz ocenę i wybór rozwiązania racjonalnego, usprawnia więc proces projektowy.

W rozprawie określono etapy składające się na metodę (procedurę) projektowania obiektów logistycznych oraz ich wzajemne powiązania. Składowe procedury zostały scharakteryzowane i opisane, a następnie uszeregowane w sposób umożliwiający wykorzystanie do projektowania różnego rodzaju obiektów logistycznych.

Przedłożona w rozprawie metoda jest metodą uniwersalną. Oferuje ona narzędzie projektowe systematyzujące pracę i wspomagające działania podejmowane w kolejnych etapach realizacji projektu. Zaprezentowano uniwersalne wzory do obliczeń wybranych wskaźników i parametrów rozwiązań projektowych. Nakreślone zostały też zagadnienia dodatkowe wpływające na jakość projektu. Każdy projekt posiada silne cechy indywidualne, tak więc stosowanie metody będzie wymagało od projektanta wiedzy i umiejętności z zakresu projektowania systemów logistycznych.

Drugim problemem podjętym w rozprawie jest harmonogramowanie procesów transportu wewnętrznego będące składową procedury projektowania obiektów logistycznych. Proces transportu wewnętrznego – zdefiniowany w rozprawie – jest realizowany wszędzie tam, gdzie ma miejsce przepływ materiałów w rozumieniu definicji logistyki stosowanej.

Postawiono tezę, że organizacja tego procesu poprzez harmonogramowanie jest drogą do poprawienia jego wydajności, a tym samym zmniejszenia kosztów jego realizacji. Należy więc wypracować metody konstruowania harmonogramów racjonalnych, czego efektem będzie ulepszenie procedury projektowania obiektów logistycznych. Kluczowym celem rozprawy jest wykazanie, że procedura harmonogramowania ma niezwykle duże znaczenie jako determinanta kosztów i nakładów inwestycyjnych. Opracowanie metodyki konstruowania takich harmonogramów poświęcona jest znaczna część rozprawy.

Harmonogramowanie jest zagadnieniem szeroko rozpoznanym i opisanym w literaturze przedmiotu. Znane są liczne zastosowania harmonogramowania jako narzędzia do organizacji pracy, na co podano odpowiednie przykłady. Jednakże harmonogramowanie procesów transportu wewnętrznego obecne jest w literaturze jedynie w bardzo nielicznych pozycjach, i jak wskazuje na to przegląd literatury nie zostały rozpoznane wszystkie jego aspekty.

W związku z powyższym w rozprawie problem harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego sprowadzono do postaci zadania optymalizacyjnego i zaproponowano sposób rozwiązania tego zadania oparty na algorytmie aproksymacyjnym. Przedstawiono powiązania harmonogramowania z pozostałymi elementami procedury projektowej.

Zarówno metoda projektowania obiektów logistycznych jak i zadanie harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego zostały zaimplementowane w postaci autorskiej aplikacji komputerowej SCHED. Narzędzie to ma za zadanie wspomaganie pracy projektanta w całym procesie projektowym, a szczególnie na etapie harmonogramowania. Aplikacja SCHED umożliwia odwzorowanie struktury obiektu logistycznego, przepływów materiałowych i operacji dokonywanych na materiałach. Następnie, po realizacji etapu harmonogramowania pozwala na ocenę uzyskanego rozwiązania ze względu na zaproponowane w rozprawie kryteria.

W pierwszym rozdziale rozprawy nakreślony został obszar, którego dotyczą podejmowane kwestie. Przedstawiono definicję i rolę obiektu logistycznego jako elementu systemu logistycznego oraz podano przykłady takich obiektów. W rozdziale drugim dokonano identyfikacji obszaru badawczego rozprawy poprzez przegląd literatury przedmiotu w zakresie projektowania obiektów logistycznych oraz harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego. Następnie sformułowano i uzasadniono tezę rozprawy.

W rozdziale trzecim przedstawiono proponowaną procedurę projektowania obiektów logistycznych podzieloną na etapy: formułowanie zadania logistycznego, kształtowanie, wymiarowanie i ocena rozwiązań projektowych. Każdy z etapów został scharakteryzowany

poprzez opis podejmowanych działań projektowych, formuły matematyczne, dane potrzebne do realizacji danego etapu i wynik jego realizacji. Omówione zostały także podstawowe punkty decyzyjne na każdym etapie i konsekwencje przyjętych decyzji.

W rozdziale czwartym opisano problem harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego w aspekcie projektowania obiektów logistycznych. Przedstawiono założenia dotyczące konstruowania harmonogramów, znaczenia harmonogramów i ich wpływ na realizację procedury projektowania obiektów logistycznych. W rozdziale piątym zaprezentowano zadanie optymalizacyjne harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego, z jego ograniczeniami i funkcjami celu, zaś rozdział szósty przedstawia metody rozwiązania tego zadania. Rozważone zostały metody dokładne rozwiązania oraz zaproponowano algorytm aproksymacyjny rozwiązania.

Rozdziały siódmy i ósmy poświęcone zostały aplikacji komputerowej SCHED wspomagającej pracę projektanta i zawierającej zaimplementowaną proponowaną procedurę projektowania i mechanizm konstruowania harmonogramu PTW. Za pomocą aplikacji zrealizowano przykładowe projekty.

Proponowane w rozprawie podejście do projektowania obiektów logistycznych jest próbą usystematyzowania i sformalizowania metod cząstkowych, tym bardziej, że niewiele jest opracowań mówiących o kompletnej procedurze projektowej. Próba ta ma na celu wypracowanie metody ogólnej, znajdującej zastosowanie przy projektowaniu różnych obiektów logistycznych. Problem harmonogramowania PTW podejmowany w pracy nie jest obecny w literaturze w stopniu odpowiadającym wadze tego zagadnienia. Nie często również zdarza się, że jest brany pod uwagę w trakcie realizacji rzeczywistych obiektów logistycznych.

1. IDENTYFIKACJA OBSZARU BADAWCZEGO

1.1. Obiekt logistyczny jako element systemu logistycznego

Przez *system logistyczny* rozumie się „zbiór środków technicznych i organizacyjnych oraz ludzi zdolnych projektować, a następnie planować i realizować przepływy, buforowanie i rozdział materiałów (...) w sposób zapewniający efektywną realizację podstawowych funkcji systemu, którymi mogą być produkcja bądź dystrybucja. System logistyczny (...) ma na celu realizowanie zadania logistycznego” [27]. *H.-Ch. Pfohl* ([72], [73]) określa systemy logistyczne jako systemy przestrzenno-czasowej transformacji towarów, a zachodzące w nich procesy nazywa procesami logistycznymi. System taki ma za zadanie przekształcać strumień materiałów płynący od miejsca pozyskania aż do miejsca konsumpcji. Stąd obiekty systemu logistycznego muszą wypełniać funkcje dystrybucji, takie jak rozdział, składowanie i transport oraz mogą wykonywać proste zadania przetwarzania materiałów.

System logistyczny składa się z *obiektów logistycznych* pozostających ze sobą w ścisłej relacji, wyrażonej przez przepływy strumieni materiałów i informacji między nimi. *Obiekt logistyczny* definiowany jest jako fizyczny, punktowy element łańcucha transportowo-magazynowego (łańcucha dostaw), w którym odbywa się transport wewnętrzny materiałów, przy czym transport ten jest głównym lub jednym z kluczowych przedmiotów działalności tego obiektu. Łańcuchy dostaw oparte są na wzajemnej współzależności obiektów logistycznych. W związku z tym obiekty te należy rozpatrywać z punktu widzenia większych struktur, w których funkcjonują w myśl zasady, że „łańcuch jest tak mocny, jak jego najsłabsze ogniwo”. Obiekty wchodzące w skład systemu logistycznego są jego podsystemami, których wejścia i wyjścia są sparametryzowane. Podsystemy te stanowią oddzielne systemy logistyczne o znanym zakresie przekształceń strumieni materiałów.

Transport wewnętrzny rozumiany jest jako przemieszczanie dóbr w obrębie obiektu logistycznego umożliwiające wykonywanie przez ten obiekt jego podstawowych zadań gospodarczych. Transport wewnętrzny jest procesem określanym w rozprawie jako proces transportu wewnętrznego (PTW – definicja w punkcie 3.1).

Najliczniejszą grupą spośród obiektów logistycznych w tym rozumieniu są magazyny przyprodukcyjne i dystrybucyjne, zakłady przemysłowe, terminale ładunkowe, punkty konsolidacji ładunków, centra logistyczne, centra dystrybucji itp. Pewne elementy procedur prezentowanych w rozprawie przedstawione są wprost na przykładzie magazynów. Magazyny realizują transport wewnętrzny na największą skalę spośród wymienionych obiektów i rozważania na ich przykładzie mogą obowiązywać także dla innych typów obiektów.

Obiekty logistyczne są elementami pośrednimi w przepływie materiałów w systemach logistycznych. Umożliwiają dokonywanie konsolidacji strumieni materiałów i zmniejszenie kosztów [57]. Elementy pośrednie powodują opóźnienie w przemieszczaniu materiałów, które w swoim korzystnym aspekcie oznacza składowanie.

Strumienie materiałów przekształcane w obiektach logistycznych opisane są na ogół charakterystykami stochastycznymi. Charakterystyki te, ze względu na liczebność czynników mających na nie wpływ, można jedynie szacować w celu wykorzystania ich jako dane projektowe. Ponieważ zawsze pozostaje co do nich niepewność konieczne jest odpowiednie przeciwdziałanie w sferze fizycznej, czyli uwzględnienie odpowiednich współczynników zwiększających już w fazie projektowej. Obiekty logistyczne powinny być projektowane pod obciążenia maksymalne lub do nich zbliżone tak, aby pozostały nadatek wydajnościowy mógł być wykorzystany do obsłużenia zwiększonego natężenia strumienia.

1.2. Problem badawczy

■ Projektowanie obiektów logistycznych

Generalna zasada projektowania obiektów logistycznych orzeka, że im większa jest rozbieżność pomiędzy charakterystykami strumienia materiałów wchodzącego do obiektu a strumieniem wyjściowym (pod względem ilościowym, postaci fizycznej, rytmiczności) tym większy, bardziej zaawansowany technologicznie i droższy musi być obiekt przekształcający.

Metoda projektowania powinna obejmować kroki z zakresu zbierania i formułowania danych, doboru technologii obsługi strumieni materiałów i informacji, wyznaczania technicznych i ekonomicznych parametrów systemu, a także jego wariantowania i oceny. Dodatkowo powinna zawierać warstwy projektowania infrastruktury, wyposażenia, organizacji, sterowania oraz wnioskowania na temat rozłożenia obciążenia pracą w czasie. *Z. Korzeń* ([54]) stwierdza, że nieodzowne jest powiązanie wszystkich tych problemów cząstkowych dotyczących planowania przepływu materiałów w jeden wariantowy projekt. Warianty te są alternatywnymi rozwiązaniami zadania logistycznego.

Opracowanie pełnego i uniwersalnego algorytmu projektowania obiektów logistycznych, ścisłego w każdym zakresie i dającego rozwiązanie optymalne ze względu na realizowany przez nie proces jest złożonym zadaniem. Liczba potencjalnych rozwiązań jest bardzo duża, a decyzje podejmowane na kolejnych etapach implikują znaczną liczbę potencjalnych ścieżek projektowych ([41]). W związku z tym cenne jest posiadanie ogólnej procedury projektowania oraz analizy obiektów logistycznych mającej zastosowanie w większości przypadków. Procedura taka określa ramy oraz systematyzuje kolejność działań i może być wykorzystywana przez projektantów jako narzędzie wspomagające pracę.

Projektowanie obiektu logistycznego podzielone jest na etapy. Każdy etap jest wynikiem decyzji podjętych w etapach poprzedzających i determinuje działanie w etapach kolejnych. W przypadku decyzji niekorzystnych konieczny jest powrót do etapów wcześniejszych i dokonywanie zmian w celu polepszenia rozwiązania. Liczba iteracji pętli projektowej zależy od jakości podejmowanych decyzji. Ważne jest zatem, aby zwłaszcza początkowe decyzje, podejmowane były starannie, gdyż powrót do nich w celu dokonania zmian, w praktyce oznacza wykonanie projektu od początku.

■ Harmonogramowanie procesów transportu wewnętrznego

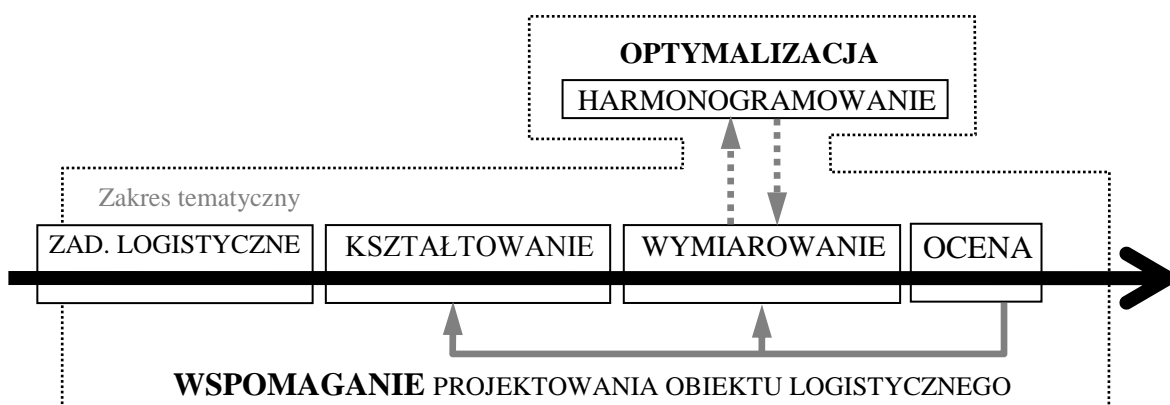
Jednym z ważniejszych aspektów projektowania obiektów logistycznych jest określanie ram czasowych dla procesu przepływu materiałów, czyli organizacja procesu w formie harmonogramu. Harmonogram realizacji procesu transportu wewnętrznego (PTW) w obiekcie logistycznym jest podstawą dla obliczeń wydajnościowych. Ponieważ wydajność PTW zależy nie tylko od infrastruktury i wyposażenia technicznego, ale i organizacji pracy, tak więc należy uwzględnić harmonogramowanie PTW w procedurze projektowej.

Istotę zagadnienia oddaje przykład: przy planowaniu wyjść ewakuacyjnych ze stadionu sportowego należy założyć, że ewakuacja nie może zająć więcej niż kilkanaście minut podczas gdy zapełnianie stadionu w normalnych warunkach trwa nawet kilka godzin. Przepustowość ciągów pieszych w takim przypadku musi zostać przygotowana na przyjęcie obciążenia potokiem ludzkim w warunkach ewakuacji, a nie w warunkach normalnego funkcjonowania. Podobnie rzecz ma się z procesami transportu wewnętrznego w obiektach logistycznych. Wydajność układu logistycznego należy projektować tak, aby mógł on obsłużyć spiętrzenia przepływów materiałowych. Tak więc uwzględnienie ram czasowych dla operacji wchodzących w skład procesu transportu wewnętrznego będzie wpływało znacząco na projekt technologiczny, a co za tym idzie także architektoniczny obiektu logistycznego.

Harmonogramowanie PTW jest metodą organizacji pracy w obiekcie logistycznym. Proces przepływu materiałów składa się z zadań wykonywanych przez urządzenia

i pracowników. Od wzajemnego rozłożenia w czasie zadań zależy wydajność oraz koszty realizacji tego procesu. Harmonogram będzie miał także wpływ na elastyczność układu logistycznego i jego zdolność reagowania na nieplanowane obciążenia pracą. Ograniczenia wynikające z własności procesu, dostępności urządzeń i pracowników oraz warunków budowlanych będą miały duży wpływ na rozkład procesu w czasie. Opracowanie metodyki budowy optymalnego harmonogramu PTW pozwoli na uszczegółowienie i wzbogacenie procedury projektowej, a tym samym zmniejszenie liczby pętli iteracyjnych projektowania. Możliwa będzie dokładniejsza analiza procesu logistycznego i przez to zwiększy się szansa wykonania projektu racjonalnego.

Na rys. 1 przedstawiono zakres tematyczny rozprawy. Przedstawiona zostanie metoda projektowania obiektów logistycznych. Metoda ta bazuje na procedurze projektowej obejmującej: zadanie logistyczne, kształtowanie, wymiarowanie i ocenę rozwiązań projektowych. Procedura, wraz z aplikacją komputerową, będzie stanowić podstawę dla dokonania optymalizacji jednego z jej elementów, tj. harmonogramowania PTW w celu wzbogacenia tej procedury.



Rys. 1. Umieszczenie i zakres tematyczny rozprawy

Źródło: Opracowanie własne.

Metoda ma formę ogólną. Uszczegóławianie działań na kolejnych etapach metody jest zadaniem projektanta i wymaga od niego znajomości zagadnień z zakresu technologii magazynowania i prac ładunkowych oraz przepływu materiałów w systemach logistycznych.

1.3. Projektowanie obiektów logistycznych w literaturze

Dokonując przeglądu literatury logistycznej można stwierdzić, że w większości traktuje ona o budowie, sterowaniu i funkcjonowaniu systemów i obiektów logistycznych o różnej skali, rzadziej o projektowaniu. Możliwe jest dokonanie podziału „pionowego” i „poziomego” w literaturze przedmiotu. Podział „pionowy” dotyczy zasięgu i rozmiaru

systemów, zaś „poziomy” różnicuje zagadnienia ze względu na dziedzinę nauki. W podziale „pionowym” wyróżniono trzy poziomy hierarchiczne: systemy w skali makro, systemy zakładowe – wewnętrzne (dotyczące obiektów logistycznych) oraz rozwiązania szczegółowe elementów procesów logistycznych (skala mikro). Podział „poziomy” rozpięty jest na dziedzinach nauki takich jak: ekonomia, technologia, badania inżynierskie, optymalizacja, zarządzanie, sterowanie, handel, marketing, socjologia, polityka i inne. W ramach podziału „poziomego”, przegląd literatury dokonany został w grupie literatury projektowej, technologicznej (inżynierskiej) z elementami optymalizacji i zarządzania.

Rozważając podział „pionowy” stwierdzono, że literatura zawiera dużą liczbę pozycji dotyczących analizy i doskonalenia całych łańcuchów dostaw i systemów logistycznych w skali makro oraz globalnej gospodarki i relacji makroekonomicznych ([4], [15], [19], [20], [22], [31], [37], [59], [72], [73], [78], [83]). W grupie tej nieliczne są pozycje mówiące o projektowaniu kompleksowych rozwiązań dla takich systemów. Projektowanie obiektów logistycznych najpowszechniej obecne jest w literaturze średniego szczebla, tj. dotyczącej rozwiązań wewnątrz-zakładowych ([1], [10], [11], [12], [20], [21], [23], [24], [25], [26], [27], [34], [38], [53], [54], [68], [79] i inne). Najniższy poziom obejmuje grupę pozycji literatury związanych głównie z badaniami operacyjnymi i optymalizacją ([7], [28], [29], [32], [45], [47], [56], [64], [75], [81]). Pozycje te podają dokładne i przybliżone metody ulepszania elementów procesów logistycznych w aspekcie lokalnym i w obszarze tzw. mikrologistyki.

Przegląd literatury wykazał, iż niewiele jest pozycji podających pełną procedurę projektowania obiektów logistycznych, tj. zawierającą wskazówki począwszy od formułowania zadania logistycznego, aż do metod oceny gotowego rozwiązania projektowego. Bardzo często zaś napotkać można bogato opisane wybrane elementy procedury i uszczegółowienia wybranych fragmentów.

Większość literatury w badanym zakresie dotyczy głównie dwóch typów obiektów logistycznych, tj. magazynów oraz zakładów produkcyjnych. Przepływ materiałów w obu przypadkach pozostaje jednak bardzo podobny. W obu przypadkach należy rozważać składowanie długotrwałe oraz buforowanie, transport wewnętrzny i przetwarzanie (zmianę postaci materiałów). Różne jest jedynie natężenie tych działań, które w magazynach będzie nastawione na składowanie w szerokim zakresie, podczas gdy produkcja będzie wymagała rozbudowanego buforowania – czyli krótkotrwałego przechowywania. Naturalne dla produkcji przetwarzanie obecne jest również w magazynach. Komisjonowanie zamówień klientów, czy realizacja finalnych faz procesu produkcyjnego – różnicowania asortymentu (*co-manufacturing*) dla klienta są przetwarzaniem ze względu na postać fizyczną materiałów

([26], [27], [45]). Z tego powodu procedury projektowe dla obiektów produkcyjnych mają swoje ściśle odzwierciedlenie w procedurach dla magazynów i mogą zostać przeniesione na pozostałe typy obiektów logistycznych.

Z. Korzeń (1999) w [54] proponując ogólne założenia metody projektowania systemów logistycznych i definiuje pojęcie metody projektowania. W myśl tej definicji metoda projektowania to świadome i konsekwentnie stosowane zasady postępowania w osiąganiu założonego celu projektowania oraz sposoby naukowego badania i rozpoznawania stanów rzeczy i zjawisk związanych z systemowym projektowaniem, a także implementacją projektów. Idąc dalej w tym duchu Autor przedstawia w sposób pełny zasady organizacji procesu projektowania, podziału obowiązków i harmonogramów przedsięwzięcia.

W innym miejscu Z. Korzeń stwierdza, że „tok projektowania logistycznego systemu transportu bliskiego i magazynowania, jeżeli ma być realizowany poprawnie, winien posiadać jednoznaczne odniesienie do problematyki planowania przepływów materiałów.” Tak postawiona kwestia okazuje się być w znacznej korelacji z rozważanym w części dalszej niniejszej rozprawy problemem harmonogramowania PTW, który narzuca jednoznaczne i bardzo znaczące ograniczenia na proces przepływu materiałów w obiektach logistycznych!

Dalej przedstawiono ogólną sekwencję faz organizacyjnych projektowania logistycznych systemów transportu bliskiego i magazynowania (LSTM) wg reguł CE (ang. *Concurrent Engineering*¹). Sekwencja składa się z trzech faz: 1) opracowanie koncepcji, 2) planowanie syntetyczne (szczegółowe, łącznie z przetargiem na realizację projektu), 3) implementacja (realizacja projektu łącznie z odbiorem i uruchomieniem systemu).

Proponowana w rozprawie metoda będzie obejmowała swoim zasięgiem zwłaszcza dwie z wymienionych faz; pierwszą, w której ustalane są dane podstawowe dla tworzonego systemu (budowane zadanie logistyczne) oraz planowane rozwiązania operacyjne i fazę drugą, w ramach opisu której Z. Korzeń przytacza elementy procedury J. Fijałkowskiego [26], [27] dla obszaru wyliczeń inżynierskich. Jednakże generalnie przedstawiona w [54] procedura projektowa zorientowana jest na organizację prac projektowych i działań zespołu roboczego.

House i Karrenbauer (1978) w publikacji *Logistics Systems Modelling* [41] przedstawiają ogólne podejście do modelowania procesów logistycznych jako narzędzia wspomagania pracy projektantów. Podejście modelowe ułatwia wybór najlepszej kombinacji kosztowo-technologicznej spośród dostępnych. Jednocześnie autorzy wskazują, że problem modelowania systemów logistycznych ze względu na niezwykle szeroki obszar badań zawsze

¹ Concurrent Engineering (ang.) – metodyczne postępowanie rozumiane jako praktyka o charakterze działań logistycznych, polegająca na odpowiednio wczesnym wprowadzaniu do etapu projektowania możliwie dużej liczby atrybutów związanych z dalszymi, tzn. następującymi po etapie projektowania, etapami cyklu życia tworzonego systemu [definicja za Z. Korzeń [54]]

charakteryzuje się dużym marginesem błędu wynikającym z nakładania się danych projektowych z różnych źródeł i rozmiarów struktur danych. W rozumieniu Autorów systemy logistyczne są znacznie bardziej złożone niż może się to pozornie wydawać. Projektant musi wziąć pod uwagę wybór technologii transportowych, systemów składowania, systemów transportu wewnętrznego, pakowania, kontroli i sterowania, fizycznego rozmieszczenia powyższych oraz wzajemnych interakcji. System logistyczny, który spełnia wymagania inwestora i bierze pod uwagę wszystkie powyższe elementy charakteryzuje się złożonymi zależnościami. Projektowanie systemów i obiektów logistycznych oznacza podejmowanie decyzji. Autorzy publikacji przedstawiają przegląd typowych decyzji jakie musi podjąć projektant budując system. Zestawienie komponentów decyzyjnych prezentuje tabela 1.

Tabela 1. Komponenty decyzyjne systemu logistycznego

Komponent	Składowe decyzji
A. Transport	(1) Wybór rodzaju i środka transportu (2) Ustalanie tras przejazdu
B. Zapasy	(1) Strategia składowania (2) Rejestracja dokumentów (3) Zamawianie (4) Krótkoterminowe prognozowanie sprzedaży
C. Świadczone usługi	(1) Potrzeby i oczekiwania (2) Odpowiedź na potrzeby i oczekiwania
D. Składanie zamówień/przepływ informacji	(1) Procedury zamawiania (2) Przetwarzanie informacji (3) Analiza danych
E. Magazynowanie	(1) Przydzielenie przestrzeni (2) Rozplanowanie strefy składowania i doków przeładunkowych (3) Rozmieszczenie asortymentu (4) Konfiguracja magazynu
F. Transport wewnętrzny	(1) Wybór wyposażenia (2) Rozmieszczenie wyposażenia (3) Komisjonowanie (4) Składowanie/podejmowanie
G. Pakowanie w celu	(1) Przemieszczania (2) Składowania (3) Ochrony
H. Harmonogramowanie produkcji	(1) Zagregowane wielkości produkcji (2) Sekwencjonowanie/planowanie czasowe produkcji
I. Rozmieszczenie obiektów logistycznych	(1) Lokalizacja, liczba i rozmiar obiektów (2) Przydział zapotrzebowania do obiektów

Źródło: za [41].

Zestawione w tabeli 1 komponenty decyzyjne po uszeregowaniu mogą stanowić kanwę procedury projektowania obiektu logistycznego. Jednakże ciągle pozostają zbyt ogólne i nie określają punktów początkowego i końcowego projektowania.

Propozycja procedury projektowej, ograniczona jednak wyłącznie do obiektów magazynowych, podana została przez *Hassana* (2002) w [38]. Autor stwierdza, iż „proces

projektowania magazynu nie doczekał się w literaturze takiego opracowania jak chociażby zagadnienie rozmieszczenia asortymentu w strefie składowania czy opracowanie schematów komisjonowania” (elementów procedury z najniższego stopnia proponowanej hierarchii). Przykłady opracowań takich elementów procedury zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Przykłady stosowania wybranych elementów projektowania w rozplanowaniu przestrzennym obiektu logistycznego opracowane na podstawie przeglądu literatury

Element projektowania	Odniesienia w literaturze	Opisy praktycznego zastosowania
Przewidywanie zapotrzebowania	Sadiq <i>et al.</i> (1999)	
Grupowanie i przydział grup materiałowych	Hwang i Lee (1988) Brynzer i Johansson (1996)	Frazelle i Sharp (1989)
Planowanie sąsiedztwa asortymentów	Brynzer i Johansson (1996)	Frazelle i Sharp (1989)
Lokowanie asortymentu względem punktów zdawczo-odbiorczych ZO	Brynzer i Johansson (1996)	Johnson i Lofgren (1994) Auguston (1995), Kallina i Lynn (1976), Witt (1995)
Zmiana lokalizacji magazynowych	Sadiq <i>et al.</i> (1999), Malmberg (1995)	
Podział magazynu	Ashayeri <i>et al.</i> (1983)	Auguston (1996a)
Podział składowania	Ballou (1967)	
Zagadnienie wielu punktów ZO	Kaylan i Medeiros (1988)	
Strefy magazynowe	Gray <i>et al.</i> (1992)	Goud (1996), Krepchin (1992)
Zagadnienie przydziału		Auguston (1995)
Zapasy	Malborg i Deutsch (1988)	
Prosty przepływ		Auguston (1995)
Doki przeładunkowe po różnych stronach magazynu		Smith i Tompkins (1982)

Źródło: [38] za van den Berg (1999)

Zaproponowane przez Hassana w [38] ramy projektowe składają się z kolejnych kroków zaprezentowanych w tabeli 3 i opatrzonych komentarzem.

Tabela 3. Kroki projektowe wg. Hassana (2002)

Lp.	Krok projektowy
1.	Określenie typu i przeznaczenia magazynu
2.	Prognozowanie i analiza spodziewanych zapotrzebowań
3.	Ustalanie polityki działania
4.	Ustalanie poziomów zapasów magazynowych
5.	Podział asortymentu na grupy (klasy)
6.	Wydzielanie obszarów magazynowych i ogólne rozplanowanie magazynu
7.	Podział strefy składowania
8.	Projekt systemów transportu wewnętrznego, składowania i rozdzielania
9.	Projekt korytarzy roboczych w magazynie
10.	Określenie wymaganej przestrzeni
11.	Określenie liczby i lokalizacji punktów ZO
12.	Określanie liczby i lokalizacji doków przeładunkowych
13.	Organizacja składowania (przydział asortymentu do stref składowania)
14.	Formowanie stref w obszarze komisjonowania zamówień

Źródło: za [38].

Autor ogranicza swoją procedurę do opisu działań projektanta, pozostawiając mu kwestię wyboru narzędzi oraz kolejność i wypełnienie merytoryczne kroków. Nie uwzględnia

ona jednak etapu formułowania zadania logistycznego, wariantowania i oceny. Procedura odnosi się wyłącznie do tzw. *layout-u*, tzn. (ang.) rozplanowania przestrzennego i pomija m.in. etap harmonogramowania PTW. Autor uprzedza, że planowanie magazynu jest zadaniem złożonym, co jest efektem ogromnej liczby podejmowanych decyzji, z których wiele ma charakter problemów kombinatorycznych. Wykazuje także, że charakter operacji magazynowych oraz czynniki je determinujące wpływają na czas wykonania operacji, co ma swoje przełożenie na koszty operacyjne. Operacje magazynowe wchodzą we wzajemne interakcje, które muszą być uwzględnione w projekcie.

Kolejne podejście do zagadnienia magazynowania i przepływu materiałów w obiektach logistycznych prezentują Autorzy pozycji [34], (2005). Celem publikacji, którą sami Autorzy określają jako wskazówki, jest wytworzenie pewnych standardów i zaleceń dla dystrybucji, logistyki magazynowej oraz logistycznej obsługi produkcji w przemyśle tytoniowym. Autorzy oferują przegląd zagadnień z dziedziny technologii magazynowania i zarządzania przepływami materiałów i informacji – które wchodzą w zakres procedury projektowej, jednak nie podają ich umiejscowienia w procesie projektowym. Ciekawym elementem jest zaproponowana lista kontrolna zagadnień, które należy wziąć pod uwagę dokonując analizy systemu. Skrócona wersja listy przedstawiona została w tabeli 4. Wybrane pytania kontrolne można zinterpretować jako kroki projektowe, jednakże poziom szczegółowości pytań oraz ich specyfika odnosząca się do przemysłu tytoniowego ograniczają obszar możliwej aplikacji.

Tabela 4. Lista zagadnień z zakresu projektowania obiektów logistycznych w przemyśle tytoniowym

I. Magazyn tytoniowy	
A.	Pytania ogólne – 5 pytań dotyczących dopasowania aktualnie istniejącej wydajności infrastruktury logistycznej do zapotrzebowania generowanego przez produkcję.
B.	Budynek – 14 pytań dotyczących konstrukcji budynku, jego funkcjonalności, rozwiązań komunikacyjnych itd., w tym pytania dotyczące jakości posadzki magazynowej.
C.	Otoczenie zewnętrzne – 2 pytania z zakresu dostępu do infrastruktury kolejowej oraz przeładunku kontenerów.
D.	Składowanie – 11 pytań dotyczących wykorzystywanych technologii składowania regałowego, bezpieczeństwa i jakości palet.
E.	System transportu wewnętrznego – 18 pytań z zakresu automatyzacji procesu magazynowego, typów baterii i ich wydajności, typów wózków i innego wyposażenia transportu bliskiego.
F. G.	Przepływ materiałów – 13 pytań d. cech strumieni materiałów w przemyśle tytoniowym
H.	Zarządzanie odpadami
II. – XIII. Zapasy produktu niezróżnicowanego pod względem cech handlowych, zaopatrzenie produkcji, obsługa odpadów produkcyjnych	
XIV. Obszar wysyłkowy	
XV. Magazyn wyrobów gotowych	
A.-H.	Zestaw pytań jak w pkt. I.
XVI. Personel	
XVII. Obszar biurowy	
XVIII. Składowanie części zamiennych dla produkcji	

Zródło: opracowano na podstawie [34].

Elementy procedury projektowej obecne są w wielu publikacjach z dziedziny logistyki. *Bassan, Roll i Rosenblatt* (1980) w [12] dokonują porównania dwóch schematów konfiguracji strefy półkowej w magazynie podzielonym na strefy oraz jednolitym. Ocena dokonana jest przez porównanie kosztów operacyjnych oraz nakładów na magazyn. Na podstawie oceny proponowane są parametry optymalnego rozplanowania magazynu. Podobnie *Aiello, Enea* oraz *Galante* (2002) w [2] przedstawiają podejście do rozplanowania przestrzeni magazynu w dwóch oddzielnych krokach: konstruowania bloków funkcjonalnych na planie magazynu a następnie rozplanowanie systemu transportu wewnętrznego pomiędzy tymi blokami. Autorzy stosują algorytm genetyczny do rozwiązania problemu. Obie publikacje oferują jedynie wybrane elementy procedury projektowania obiektów logistycznych. Elementy te mogą znaleźć zastosowanie w opisanym w następnych rozdziałach podejściu.

Dokładne opisy procesu magazynowego i procesu transportu wewnętrznego pojawiają się w [21], pozycji powstałej na zamówienie Marynarki Wojennej USA w 1985 roku. Autorzy podają funkcjonalno-użytkowe wskazówki odnoszące się do projektowania nowych obiektów magazynowych oraz modernizacji już istniejących. Opisane są koncepcje składowania i transportu wewnętrznego, wytyczne dla planowania przestrzennego i charakterystyki kosztowe rozwiązań oraz kryteria wyboru technologii i organizacji budżetu. Podane rozwiązania, pomimo upływu czasu pozostają aktualne i aplikowane. *Bartholdi i Hackman* (2010) w [11] przedstawiają elementy procesu transportu wewnętrznego i zarządzania procesem przepływu materiałów i informacji. Prezentują podstawowe zasady planowania przestrzennego obiektów logistycznych i analizy danych systemowych koniecznych do zarządzania i projektowania. Podobnie *Muller* (2003) w [68], *Donath i inni* (2002) w [23], *Taylor* (edt. 2008) w [82], *Hompel i Schmidt* (2007) w [40] oraz *Daganzo* (2005) w [19].

Jaap (2000) w [42] prezentuje koncepcje sterowania transportem wewnętrznym, w tym systemy sterowania transportem, wykorzystywane urządzenia oraz elementy planowania przestrzennego obiektów magazynowych w procesie projektowania systemu transportu wewnętrznego. Autor nie podejmuje problematyki harmonogramowania PTW. *Sule* (2001) w [79] prezentuje zagadnienie lokowania obiektów logistycznych w terenie, podając ilościowe i jakościowe metody określania lokalizacji i relokowania obiektów logistycznych ze względu na szacowane zapotrzebowanie na usługi logistyczne. Zagadnienie lokowania obiektów logistycznych może być elementem procedury projektowej w rozumieniu organizacji łańcucha dostawczego. Wybrane wyżej elementy procedury projektowej opatrzone są przeważnie szczegółowym opisem matematycznym i metodami rozwiązania problemów; poczynając od metod dokładnych, optymalizacji poprzez algorytmy heurystyczne

wraz z algorytmami genetycznymi i teorią zbiorów rozmytych [32], [50].

Analiza systemów logistycznych w aspekcie jakości realizacji łańcucha dostaw podejmowana jest szeroko przez *Dolugi'ego* (2005) w [22], *Daganzo* (2005) w [19], *Bramela i Simchi* (1997) w [15], *Geunes* (2005) w [31], a także *Waters'a* (2003) w [83]. Publikacje te przybliżają zagadnienia kosztowe organizacji łańcucha dostaw, modele dystrybucji, politykę zarządzania i sterowania przepływem materiałów, kanały dystrybucji i określanie wydajności i poziomu zintegrowania łańcuchów dostaw. Podobnie w [36], [37], [55], [78] znaleźć można elementy procedur wzbogacone o metody optymalizacyjne i racjonalizatorskie organizacji łańcuchów. Publikacje te stwarzają bogate tło dla formułowania zadania logistycznego.

Zespół *S. Nowosielskiego* ([71]) przybliży koncepcję projektowania procesów logistycznych w aspekcie trzech dziedzin wiedzy: zarządzania procesami, zarządzania projektami i zarządzania logistyką. Dokonuje tego poprzez zidentyfikowanie procesów gospodarczych i logistycznych w różnych typach przedsiębiorstw. Autorzy skupiają się na rozważeniu aspektu zarządzania projektem pomijając raczej merytoryczną zawartość projektu i traktując sam projekt jako szczególny rodzaj procesu.

Składowe procedury wykorzystane w rozprawie i zaimplementowane w postaci aplikacji zostały zaczerpnięte z pozycji [25], [26], [27] *J. Fijałkowskiego*. Kolejne rozdziały rozprawy służą usystematyzowaniu, przybliżeniu i porównaniu z innymi procedurami. Na jej podstawie zbudowany zostanie algorytm wyznaczania harmonogramu PTW. W tabeli 5 zaprezentowano syntetyczne zestawienie kroków projektowych wg *J. Fijałkowskiego*.

Tabela 5. Procedura projektowania zakładowego układu logistycznego – kolejne kroki projektowe

Etap	Kroki projektowe	Dane wspomagające	
Formułowanie zadania logistycznego	<ol style="list-style-type: none"> 1. Podział danych liczbowych na stałe i zmienne. 2. Określenie struktury dostaw i wysyłek zewnętrznych. 3. Określenie struktury wejść i wyjść zewnętrznych. 4. Identyfikacja punktów odbioru i nadania. 5. Ustalenie danych o organizacji pracy zakładu. 6. Aktualizacja układu wartości, wybór i wyważenie celów. 	ad.2/3 Metoda ustalania miarodajnych wielkości przepływu materiałów, katalog ładunków. ad.6. Układ wartości.	
Rozwiązanie zadania logistycznego	Kształtowanie procesu	<ol style="list-style-type: none"> 7. Identyfikacja strumieni materiałów na planie obiektu. 8. Opis procesu przepływu materiałów ustalający sposób realizacji poszczególnych czynności ze względu na ładunki, środki transportu i ludzi. 9. Sporządzenie kart procesu przepływu materiałów i kart cykli transportowych (sekwencja czynności). 	ad.8. Katalog ładunków, środków transportowych i kategorii pracy.
	Wymiarowanie procesu	<ol style="list-style-type: none"> 10. Ustalenie natężenia przepływu materiałów na poszczególnych trasach oraz czasów dysponowanych; dobowy harmonogram realizacji procesu. 11. Wybór sposobów składowania oraz wyznaczenie potrzebnych powierzchni i kubatur. 12. Ustalenie parametrów dróg transportowych. 	ad.11. Katalog sposobów składowania.

c.d. Tabeli 5.

Etap		Kroki projektowe	Dane wspomagające
Rozwiązanie zadania logistycznego	Wymiarowanie procesu	13. Ustalenie parametrów eksploatacyjnych i kosztów jednostkowych urządzeń i kategorii pracy ludzi. 14. Obliczenie czasów trwania cykli transportowych. 15. Obliczenie dobowej pracochłonności procesu przepływu materiałów ze względu na pracę ludzi i urządzeń. 16. Obliczanie potrzebnej do realizacji procesu liczby środków transportowych i urządzeń. 17. Obliczenie nakładów na zakładowy układ logistyczny, wg układu wartości.	ad.13/14. Katalog środków transportowych i kategorii pracy. ad.17. Katalog kosztów zakupu.
	Ocena i wybór wariantu	18. Obliczanie dobowej pracochłonności sprowadzonej procesu przepływu materiałów. 19. Obliczanie sprowadzonej liczby urządzeń oraz ludzi. 20. Obliczenie dobowego wysiłku fizycznego pracownika. 21. Obliczenie kosztów eksploatacyjnych zakładowego układu logistycznego.	ad.18/19 Katalog środków transportowych i kategorii pracy ludzkiej. ad.20. Katalog norm jednostkowego wysiłku fizycznego.
Ocena	Czast.	22. Dokonanie oceny cząstkowej rozwiązania projektowego zakładowego układu logistycznego.	ad.21. Katalog kategorii pracy i katalog kosztów zakupu.
	Komp.	23. Dokonanie oceny kompleksowej rozwiązania projektowego zakładowego układu logistycznego – wybór wariantu suboptymalnego.	ad.22/23. Układ wartości.

Źródło: opracowano na podstawie [27].

1.4. Problematyka harmonogramowania procesów w literaturze

■ Klasyczne zagadnienia harmonogramowania

Problematyka harmonogramowania w ogólności może być rozumiana jako zagadnienie przydziału w czasie środków pracy, w celu wykonania zadań będących częścią pewnego procesu [14]. Harmonogramowanie jest ustalaniem kolejności wykonywania zadań z wykorzystaniem zadanych zasobów pracy w celu minimalizacji łącznego czasu wykonania wszystkich zadań.

T. Ambroziak w [10] definiuje podstawowe pytania, na jakie powinien odpowiadać prawidłowo wykonany harmonogram: „kto/co” (jaki środek techniczny), „co robi” (jaką operację wykonuje”) oraz „kiedy” i stwierdza, że harmonogram przedsięwzięcia jest znany, kiedy znane są odpowiedzi na powyższe pytania dla wszystkich operacji przedsięwzięcia. Dodatkowo Autor formułuje pytanie „gdzie” – jeżeli miejsca wykonania operacji mogą być różne. W infrastrukturalnych przedsięwzięciach inwestycyjnych wyróżnia się harmonogramy: 1) zadań rzeczowych, w tym dyrektywne, ogólne i szczegółowe, 2) harmonogramy zapotrzebowania na zasoby: pracy maszyn, zużycia zasobów materialnych i finansowe.

W przypadku przedsięwzięć infrastrukturalnych celem budowy harmonogramu jest wyznaczenie racjonalnej ścieżki realizacji inwestycji lub przedsięwzięcia, tj. takiej, która

minimalizuje ryzyko opóźnień i jednocześnie minimalizuje czas wykonania przedsięwzięcia. Jako przykłady zastosowania harmonogramowania w transporcie T. Ambroziak podaje konstruowanie rozkładów jazdy, planowanie obsługi transportowej obszarów, rozłożenia ruchu w sieci transportowej, technologii pracy punktów ładunkowych i stacji kolejowych.

Innym zagadnieniem poruszonym w pracy [10] jest konieczność stosowania modelowania matematycznego w harmonogramowaniu. Umożliwia ono stosowanie technik komputerowych do rozwiązywania zadań harmonogramowania. Model matematyczny do obliczeń komputerowych musi być przygotowany w sposób pozwalający na wyrażenie go w postaci programu zawierającego liczbowe wartości parametrów, a także warunki i ograniczenia, które go tworzą. Budowa modeli jest ułatwiona dzięki zastosowaniu teorii grafów do odwzorowania struktury procesu [52]. Cytowana w [10] literatura przedstawia podejście do modelowania czynności jako konstruowanie sieci czynności, czyli przedstawienia zbioru czynności w postaci grafu. Łuki grafu reprezentują czynności, a wierzchołki zdarzenia zakończenia i rozpoczęcia ich realizacji. Każdej czynności przyporządkowana jest wielkość o interpretacji czasu trwania lub kosztu realizacji w funkcji środków pracy. Optymalizacja takiej sieci sprowadza się do wyznaczenia drogi krytycznej oraz określenia tzw. zapasów czasów dla czynności niekrytycznych, jak również wygenerowania na tej podstawie wykresu Gantta [10], [81], [14]. Na tym założeniu między innymi opierają się metody CPM, PERT, RAMPS programowania sieciowego.

Problematyka harmonogramowania w literaturze rozpatrywana jest przeważnie w aspekcie organizacji procesu produkcyjnego na stanowiskach obróbczych. Rozważane są problemy harmonogramowania jednego lub wielu stanowisk pracy (*One Procesor, Parallel Processors*), harmonogramowanie systemów czasu rzeczywistego, problemy typu *Flow Shop, Open Shop, Job Shop*, problemy z ograniczeniami mocy produkcyjnych i ograniczeniami zasobów, harmonogramowanie elastycznych systemów produkcyjnych oraz inne ([14], [16], [17], [33], [36], [81]). Problemy te zostały dobrze opisane i sformułowane matematycznie. Zaproponowano także wiele rozwiązań heurystycznych i dokładnych takich problemów.

Literatura zawiera opis algorytmów rozwiązywania problemu harmonogramowania. Istnieje duża liczba modyfikacji problemu oryginalnego, które nie mogą być rozwiązane w czasie wielomianowym, tj. należą do klasy problemów NP-pełnych. W pracach [39] i [80] można znaleźć opisy różnych postaci problemu szeregowania deterministycznego włącznie z klasycznymi metodami ich rozwiązywania. W pracach [62], [63] podano propozycje harmonogramowania w systemach czasu rzeczywistego z niepewnymi parametrami opisanymi przy pomocy liczb rozmytych.

Istnieje wiele algorytmów rozwiązywania problemów szeregowania zadań, które można podzielić na: optymalizacyjne (dokładne) oraz aproksymacyjne (przybliżone). Narzędzia optymalizacyjne gwarantują znalezienie rozwiązania optymalnego, jednakże przeważnie wymagają długiego czasu obliczeń, co często wyklucza je z zastosowań praktycznych. Przy zadaniach o większej skali stosuje się wyłącznie techniki aproksymacyjne. Zaliczyć można do nich np. symulowane wyżarzanie (*Simulated Annealing* [35]) oraz *Tabu Search*.

Klasycznie definiowany problem harmonogramowania ([14], [48], [58], [69], [77]) może być scharakteryzowany przez trzy zbiory: skończony zbiór n zadań, zbiór m maszyn realizujących zadania oraz dodatkowo zbiór s typów dodatkowych zasobów. Oznaczenia zbiorów przybierają różne postacie w zależności od źródła literaturowego. Każda operacja jest wykonywana przez jedną, określoną maszynę w ciągu pewnego przedziału czasu. Rozpoczęta operacja nie może być przerwana. Problemem jest określenie optymalnej kolejności wykonania zadań. Definicja klasycznego problemu szeregowania zakłada znalezienie harmonogramu (ang. *schedule*), który spełniałby wymagania:

$$C_{\max}^* = \min_{i \in SolSp} \{C_{\max}(i)\} \quad (1)$$

gdzie: C_{\max}^* – harmonogram optymalny;

$SolSp$ – zbiór rozwiązań problemu harmonogramowania;

$C_{\max}(i)$ – czas wykonania wszystkich operacji i -tego rozwiązania harmonogramu.

1.5. Metody harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego

Harmonogramowanie procesu transportu wewnętrznego nie jest obecne w literaturze poza pracami [26], [27], [28] *J. Fijałkowskiego*. Podnoszą one rangę harmonogramu w procesie projektowania obiektów logistycznych, jednakże nie oferują analitycznego – formalnego opisu problemu, ograniczeń harmonogramowania i metod rozwiązania zagadnienia poza metodą ekspercką. Na bazie wymienionych prac można stwierdzić, że stosowane w praktyce podejście do problemu jest dwojakie:

1. Nie istnieje szczegółowy harmonogram operacji procesu transportu wewnętrznego.
2. Istnieją wyłącznie ogólne ramy czasowe wynikające z warunków zewnętrznych funkcjonowania obiektu logistycznego jako elementu łańcucha transportowo-magazynowego. Ramy te ograniczają wewnętrzny proces przepływu materiałów.

W pierwszym przypadku wszystkie zadania mogą być wykonywane przez cały dostępny czas – w zależności od zapotrzebowania. Taka organizacja skutkuje teoretycznie mniejszą liczbą urządzeń i pracowników ze względu na dłuższy czas dysponowany dla zadań.

Może jednak zdarzyć się, że część zadań nie zostanie wykonana ze względu na spiętrzenia i konieczność realizacji kilku operacji jednocześnie. W przypadku braku harmonogramu prawdopodobne jest, że pracownicy obiektu logistycznego sami wytworzą wewnętrzną organizację pracy. Nie ma jednakże pewności, że organizacja ta będzie racjonalna.

W drugim przypadku, który jest praktycznie dominującym, zadania dotyczące przepływu materiałów są ograniczane co do czasu realizacji przez uwarunkowania zewnętrzne pracy obiektu. Do takich uwarunkowań można zaliczyć: narzucone godziny dostaw i wysyłek, dobowy plan produkcji, godziny realizacji kompletacji zgodnie ze zleceniami klientów itd. Ograniczenia te wymuszają kolejność operacji transportowych i magazynowych. Wymuszenia związane z deklarowanym czasem realizacji zamówień klientów i dostaw materiałów są dominującym czynnikiem wpływającym na harmonogram. Biorąc jako przykład magazyn i zadanie komisjonowania, odpowiednia partia materiałów musi zostać przygotowana w miejscach oferowania zanim rozpocznie się kompletacja. Kompletacja rozpocznie się po zebraniu i opracowaniu zamówień klientów. W przypadku wysyłki, przed realizacją załadunków, należy zakończyć zestawianie partii wysyłkowej z zamówionych przez klienta jednostek kompletowanych i jednorodnych. W ten sposób harmonogram wytwarzany jest samoistnie, jednakże nie gwarantuje optymalności procesu i nie jest możliwe badanie wpływu zmian harmonogramu PTW na jakość procesu. Innym ważnym ograniczeniem ram czasowych harmonogramu procesu transportu wewnętrznego jest czas pracy pracowników obiektu narzucony przez rytm dobowy.

Pomimo, iż sam problem szeregowania zadań jest bardzo dobrze rozpoznany i szeroko omawiany w literaturze, to jednak klasyczne podejście do harmonogramowania nie znajduje zastosowania dla procesów logistycznych. Wynika to z charakteru tych procesów i stopnia przybliżenia, które stosowane jest przy harmonogramowaniu PTW. Przybliżenie to wynika z losowości charakteryzującej rzeczywiste warunki pracy. Losowość ta utrudnia planowanie dokładnej realizacji zadań i wymusza przeniesienie nacisku z dokładnego przydziału zasobów do zadań w deterministycznym czasie na przydzielanie grupy urządzeń do zbioru zadań realizowanych w pewnych ramach czasowych. Należy przy tym pamiętać, że zadanie procesu transportu wewnętrznego jest inaczej definiowane niż w podejściu klasycznym. Najważniejszą różnicą jest to, że jego realizacja może być przerywana i czas realizacji nie jest ściśle zależny od użytego zasobu pracy.

1.6. Wspomaganie projektowania obiektów logistycznych

Narzędziami wspomagającymi projektowanie są: algorytmy projektowania, narzędzia przyspieszające obliczenia, metody optymalizacyjne, narzędzia do analizy danych, narzędzia symulacyjne, narzędzia do prezentacji wyników, narzędzia do koordynacji kroków projektowych i archiwizacji, zbiory rozwiązań standardowych.

Na rynku dostępna jest gamma programów umożliwiających realizację wymienionych zadań. Są to złożone programy – służące do realizacji kompleksowych projektów, jak i małe aplikacje do rozwiązywania wybranych problemów. Programy duże oferują pewne możliwości, jednakże ich wykorzystanie wiąże się ze znaczną pracą przygotowawczą i koniecznością znajomości procedur projektowych. Wykorzystanie pakietów takich jak CLASS firmy CIRRUS LOGISTICS Simulation & Modelling Technology często okazuje się być nieefektywne przy projektach względnie niewielkich bądź przy analizie już istniejących procesów. Zaawansowane narzędzia oferują mechanizmy symulacji systemów na modelach wirtualnych, odwzorowują wybrane aspekty projektowania obiektów logistycznych, umożliwiają prowadzenie obliczeń i oszacowań, a także prezentację wyników pracy w postaci wizualizacji i planów. Nie zawierają jednak narzędzia do harmonogramowania PTW i badania wpływu harmonogramu na jakość projektu.

M. Jacyna oraz *K. Wiśniewski* w pracy [43] prezentują podstawy aplikacji komputerowej wspierającej metodę optymalizacji wyposażenia technicznego centrów logistycznych. Centra logistyczne są najbardziej zaawansowanym typem obiektów logistycznych. Prezentowane podejście jest oparte na statycznym i dynamicznym modelu przepływu materiałów przez elementy analizowanego systemu. Metoda optymalizacyjna została zaimplementowana i zweryfikowana na istniejącym obiekcie logistycznym.

1.7. Teza badawcza i jej uzasadnienie

Rozprawa ma na celu zaprezentowanie metody projektowania obiektów logistycznych opartej na procedurze projektowej wraz z jej istotnym składnikiem jakim jest harmonogramowanie przyszłego procesu transportu wewnętrznego. Procedura ta będzie miała zastosowanie do projektowania wszystkich rodzajów obiektów logistycznych dysponujących transportem wewnętrznym. Szczególnie przydatna może okazać się zwłaszcza w przypadku magazynów dystrybucyjnych, przyprodukcyjnych i rezerwowych, a także obiektów cross-dockingowych, konsolidacyjnych, terminali ładunkowych itp. Procedura może także zostać wykorzystana w projektowaniu większych układów, takich jak centra logistyczne.

Proponowana procedura zostanie sformułowana w sposób umożliwiający umiejscowienie w niej problematyki harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego. Określone zostaną zależności pomiędzy kolejnymi etapami procedury, współzależności pomiędzy parametrami rozwiązania, a także implikacje podejmowanych decyzji. Mając na uwadze powyższe sformułowano tezę:

„Narzędzia programowania matematycznego umożliwiają wzbogacenie procedury projektowania obiektów logistycznych w aspekcie harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego.”

Procedura projektowania obiektów logistycznych jest wieloaspektowym, złożonym problemem decyzyjnym o znacznej liczbie ścieżek rozwiązań. Harmonogramowanie PTW, jako jeden z etapów tej procedury, ma duże znaczenie dla realizacji całego projektu. Zapis matematyczny zagadnienia harmonogramowania PTW daje możliwość sformułowania zadania optymalizacyjnego, które może być rozwiązywane znanymi metodami. Dzięki temu, możliwe staje się podejmowanie optymalnych bądź racjonalnych decyzji dotyczących harmonogramu PTW, co zmniejsza liczbę potencjalnych ścieżek rozwiązań. W konsekwencji ulepszona zostanie procedura projektowa i poszerzony zostanie warsztat projektanta.

W praktyce problem harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego – jeżeli w ogóle jest podnoszony przez projektanta – zostaje rozwiązany w drodze ustaleń wynikających z uwarunkowań zewnętrznych pracy obiektu logistycznego oraz doświadczenia projektanta. Wydaje się więc uzasadnione podjęcie próby opisu za pomocą aparatu matematycznego problemu harmonogramowania PTW i jego wpływu na projekt obiektu logistycznego. Problem ten, jak do tej pory, nie doczekał się opracowań inżynierskich w literaturze przedmiotu, a przynajmniej opracowania takie nie są znane autorowi rozprawy.

Nie jest możliwe rozważanie problemu harmonogramowania PTW bez podania metody projektowania obiektu logistycznego. Równoległe omówienie metody umożliwia umiejscowienie w niej zagadnienia harmonogramowania i dzięki temu wykazanie jego wpływu na projekt obiektu logistycznego – będący efektem zastosowania metody.

Kolejne rozdziały rozprawy będą przybliżały następujące po sobie etapy projektowe zgodnie z porządkiem zaprezentowanym w rozdziale 2 na rysunkach 2 i 3. Rozdział 2 w całości poświęcono proponowanej metodzie projektowania obiektów logistycznych, rozdziały 3 – 5 poświęcono zagadnieniu harmonogramowania PTW. W każdym rozdziale będzie zamieszczony opis implementacji danego elementu w aplikacji komputerowej SCHED.

2. METODA PROJEKTOWANIA OBIEKTÓW LOGISTYCZNYCH

2.1. Wprowadzenie do metody

Projektowanie obiektów logistycznych jest procesem o charakterze pętli iteracyjnej składającym się z czterech podstawowych etapów projektowych.

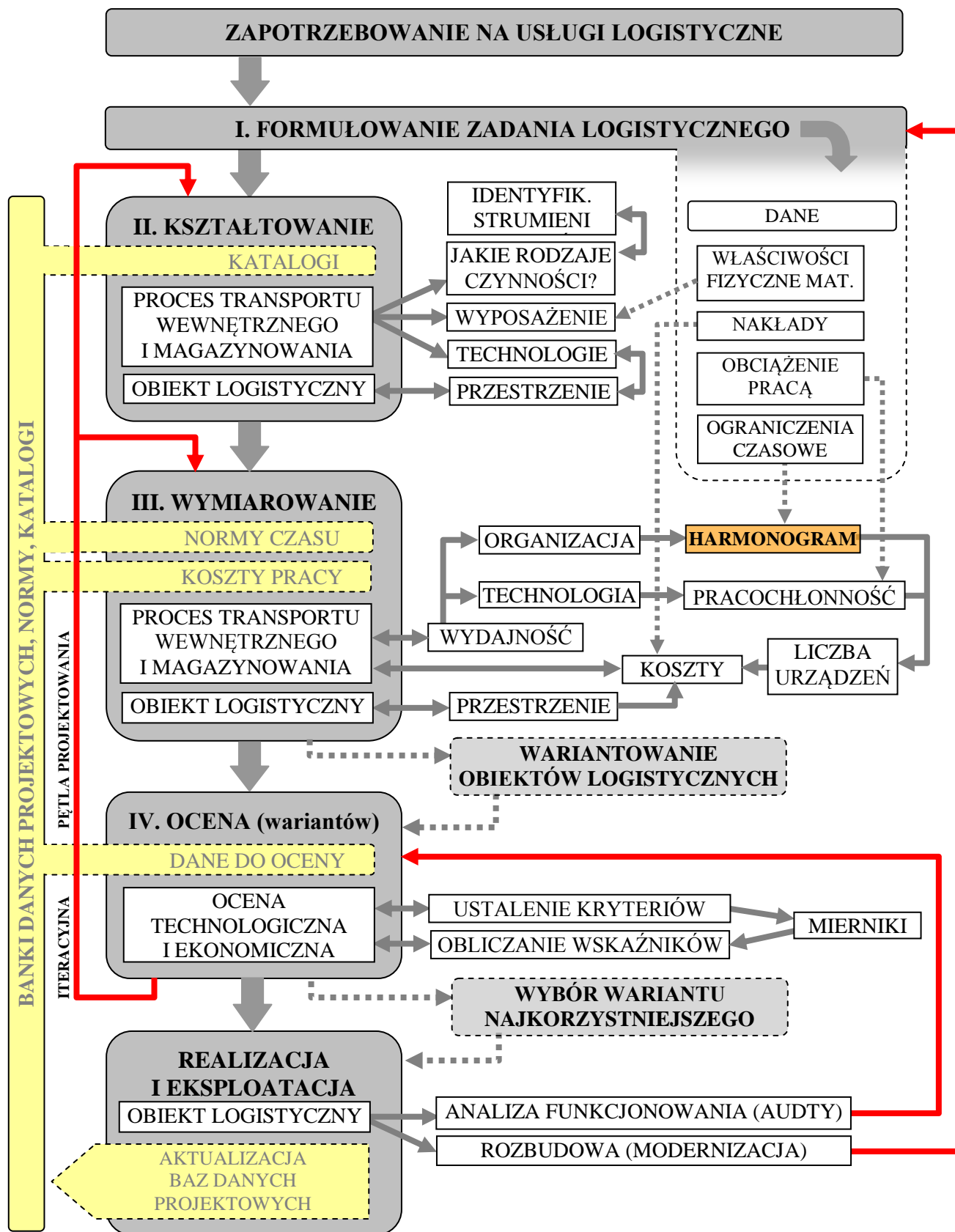
Pierwszym z nich jest *formułowanie zadania logistycznego*, które jest jakościowym i ilościowym ujęciem parametrów strumienia ładunków i związanych z nim informacji. Strumienie te będą przekształcane ze względu na miejsce (transport), czas (składowanie) i postać z wykorzystaniem planowanej infrastruktury i wyposażenia.

Drugim etapem jest *ukształtowanie* obiektu logistycznego, który będzie w stanie zapewnić obsługę danego strumienia materiałów. W etapie tym konstruowany jest proces transportu wewnętrznego, dobierane są technologie obsługi oraz niezbędne przestrzenie.

W trzecim etapie ukształtowany technologicznie i przestrzennie obiekt logistyczny jest *wymiarowany*, tj. wyznaczana jest liczba urządzeń i ludzi realizujących proces. Liczby te wynikają z pracochłonności procesu przekształcenia strumieni materiałów, dobranych technologii oraz z organizacji procesu wyrażonej w formie harmonogramu. Wyznaczone na podstawie harmonogramów czasy dysponowane dla poszczególnych zadań procesu pozwalają na wyznaczenie liczby urządzeń, a w konsekwencji także kosztów realizacji procesu.

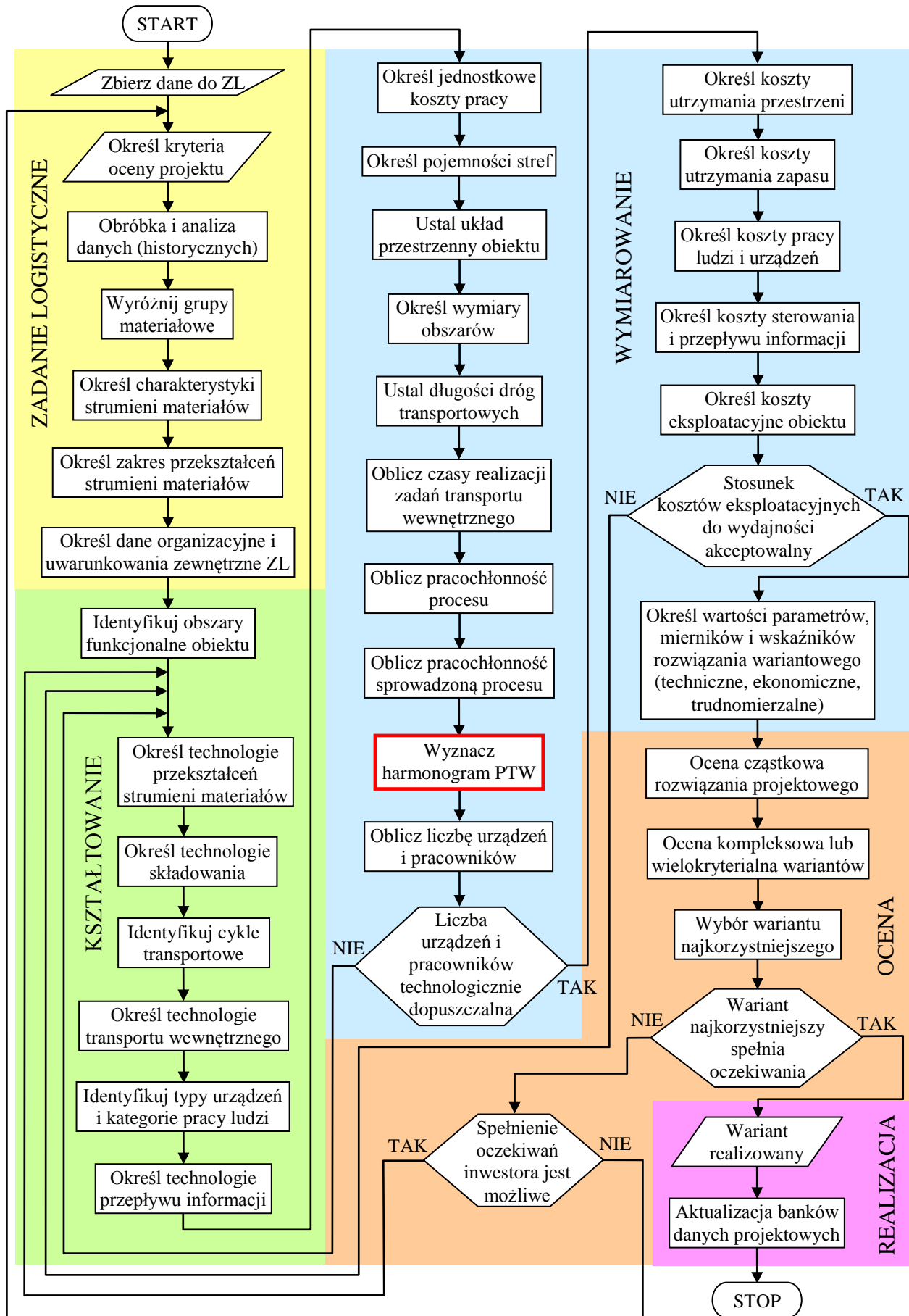
Ukształtowany i zwymiarowany obiekt logistyczny, w czwartym etapie poddawany jest *ocenie* ze względu na techniczne i ekonomiczne kryteria projektowe. Jeżeli projektowany obiekt logistyczny nie spełnia warunków oceny należy powrócić do wcześniejszych etapów procedury projektowej i dokonać zmian.

Metoda projektowa proponowana w rozprawie została przedstawiona w sposób syntetyczny na rys. 2 z podaniem najważniejszych jej etapów i ich następstwa oraz na rys. 3 w postaci schematu blokowego. Główne elementy i założenia projektowe prezentowanej procedury opierają się na pracach [26], [27] i zostały zaprezentowane w tabeli 5. W punktach 2.2 – 2.5 kolejne etapy procedury zostały opisane i wzbogacone odpowiednimi formułami obliczeniowymi.



Rys. 2. Procedura projektowania obiektów logistycznych

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 3. Schemat blokowy procedury projektowania obiektu logistycznego

Źródło: Opracowanie własne.

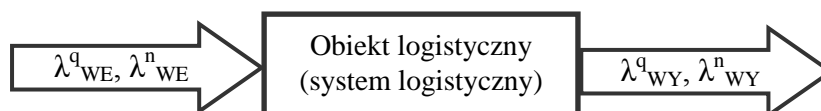
2.2. Zadanie logistyczne

■ Zadanie logistyczne jako pierwszy etap projektowania obiektów logistycznych

Przedstawiony na rysunku 2 oraz 3 pierwszy etap projektowania obiektu logistycznego – zadanie logistyczne jest poprzedza wszystkie inne etapy projektowe. W etapie tym specyfikowane jest zadanie, które obiekt logistyczny ma realizować na zadanym poziomie jakościowym i kosztowym.

Zadanie logistyczne jest sformalizowanym sposobem zapisu obciążenia pracą nakładanego na obiekt logistyczny (lub jego fragment) poprzez określenie parametrów ilościowych i jakościowych strumieni materiałów na wejściach i wyjściach systemu (rys. 4), bądź jego fragmentu. Strukturę zadania logistycznego wyraża się w postaci parametrów i ich wartości opisujących jednoznacznie zależności: czasowe, ilościowe, jakościowe i strukturalne przepływu ładunków. Dodatkowo zadanie zawiera informacje uściślające zakres i rodzaj przekształceń fizycznej postaci strumieni materiałów wewnątrz obszarów funkcjonalnych obiektu. Informacje te dotyczą technologii realizacji przekształceń, kosztu i żądanej jakości. Zadanie logistyczne realizowane jest przez projektowany obiekt (system) logistyczny (definicja opracowana na podstawie [27], [45], [59], [61], [67]).

Projektowanie obiektu logistycznego opiera się na podejściu do niego jak do „czarnej skrzynki”, która w drodze projektowania ma „ujawnić” mechanizm swojego działania na podstawie danych we/wy, tj. zadania logistycznego (Rys. 4).



λ^q_{WE} – struktura jakościowa (co, w jakiej postaci?) strumieni materiałów na wejściu do systemu;
 λ^n_{WE} – struktura ilościowa (ile? kiedy?) strumieni materiałów na wejściu do systemu;
 λ^q_{WY} – struktura jakościowa (co, w jakiej postaci?) strumieni materiałów na wyjściu z systemu;
 λ^n_{WY} – struktura ilościowa (ile? kiedy?) strumieni materiałów na wyjściu z systemu;

Rys. 4. Zadanie logistyczne jako opis we/wy systemu logistycznego

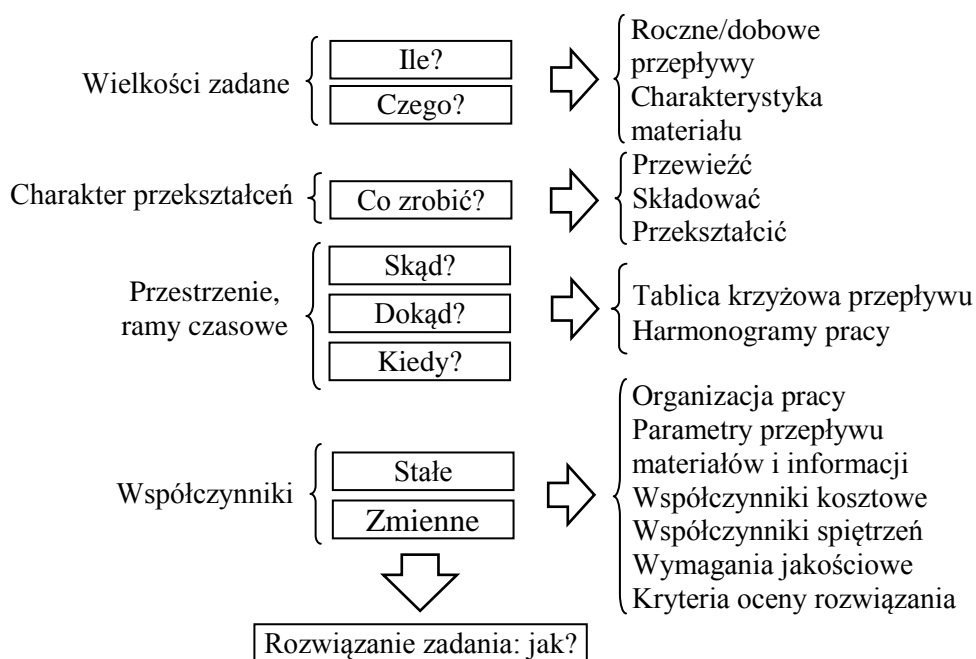
Źródło: Opracowanie własne na podstawie [27].

Definicja zadania logistycznego pozostaje w mocy dla wszystkich systemów logistycznych niezależnie od ich wielkości. Zadanie logistyczne w odniesieniu do obszarów funkcjonalnych systemu musi być bardziej uszczegółowione i pozostawać w ścisłej korelacji z realizowanym zadaniem. Najwyższy napotykanym w projektowanym systemie stopień szczegółowości zadania logistycznego będzie wynikał z niepodzielności i pierwotność

wykonywanych na materiale manipulacji w najniższych, elementarnych stopniach organizacyjnych systemu. Parametry i charakterystyki składające się na sformułowanie zadania, przekładają się w drodze projektowania na ukształtowanie przestrzenne, wyposażenie mechaniczne i niemechaniczne, niezbędne liczby ludzi i urządzeń oraz nakłady i koszty utrzymania obiektu logistycznego [60].

■ Formułowanie zadania logistycznego

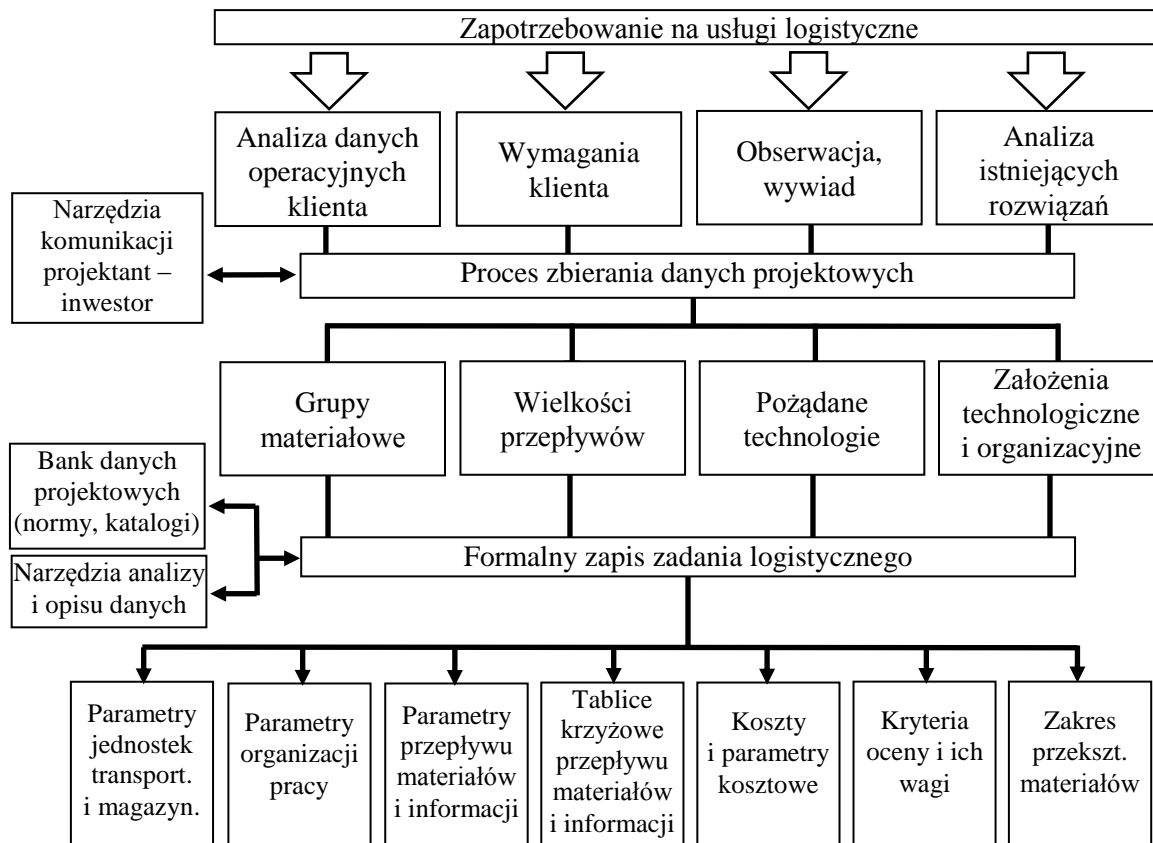
Formułowanie zadania wymaga udzielenia odpowiedzi na 6 podstawowych pytań ([27], [45]) z zakresu przekształceń strumieni materiałów, które zostały zaprezentowane na rys. 5:



Rys. 5. Struktura zadania logistycznego

Źródło: [61].

Uzyskanie odpowiedzi na przedstawione pytania pozwala na udzielenie odpowiedzi na pytanie zasadnicze – „jak?” ... realizować proces transportowy i magazynowy w sposób efektywny pod względem technologicznym, ekonomicznym i jakościowym. Uzyskanie odpowiedzi na te pytania wymaga zebrania danych projektowych. Źródłami tych danych są głównie: założenia inwestycyjne, wywiady z inwestorem, analiza danych historycznych dotyczących przepływów materiałów i informacji, analiza działalności obiektów logistycznych o podobnym profilu, analiza gospodarcza, ekonomiczna i społeczna otoczenia. Zakres działań związanych z pozyskaniem informacji do formułowania zadania logistycznego przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Formułowanie zadania logistycznego

Źródło: [61].

■ Zapis formalny zadania logistycznego

Dane dla projektowania systemów logistycznych można podzielić na podstawowe grupy ([27], [46], [60], [61]):

- dane poddające się opisowi formalnemu – matematycznemu (grupy parametrów):
 - tablice krzyżowe przepływu materiałów i informacji między elementami systemu (opis ilościowy, także jakościowy);
 - struktura udziału grup materiałowych w strumieniach materiałów;
 - parametry organizacji pracy (czas pracy, współczynniki redukujące);
 - parametry kosztowe (wskaźniki amortyzacji i kosztów utrzymania);
 - parametry jednostek ładunkowych/magazynowych (fizyczne i ekonomiczne);
 - parametry technologiczne urządzeń (katalogi urządzeń);
 - parametry technologiczne infrastruktury;
 - jednostkowe normy czasu pracy;
 - dane kosztowe (stawki, ceny);
 - dodatkowe parametry wynikające z narzuconej technologii pracy (np.: zlecenia klientów),
- oraz:

- kryteria oceny rozwiązania projektowego o charakterze mierzalnym (np.: koszty operacyjne, wydajność, liczba urządzeń);
- wagi przyporządkowane kryteriom dla metody cząstkowej i kompleksowej oceny rozwiązania projektowego.
- dane nie poddające się formalnemu opisowi:
 - narzucone technologie pracy;
 - inne uwarunkowania trudno mierzalne (np.: społeczno-kulturowe, komercyjne, możliwość rozbudowy, niezawodność funkcjonalna).

Wymienione grupy parametrów będą w zadaniu logistycznym reprezentowane przez przyporządkowane im wartości liczbowe. Wartość liczbową każdego parametru, zdefiniowanego w swojej klasie, będzie miała przypisany zakres zmienności. Poniżej zaproponowano zapis formalny zadania logistycznego.

Zadanie logistyczne ZL będzie zapisane jako szóstka uporządkowana postaci:

$$ZL = \langle \mathbf{L}, \mathbf{N}_{n/o}, \mathbf{N}_\sigma, \mathbf{H}, \mathbf{O}, \mathbf{R} \rangle \quad (2)$$

- gdzie: \mathbf{L} – macierz o rozmiarze $k \times g$, elementy której charakteryzują grupy materiałowe „obsługiwane” przez system (wyjaśnienie w tekście);
- $\mathbf{N}_{n/o}$ – macierz stopnia $N \times N$, elementy której charakteryzują miejsca nadania i odbioru materiałów w systemie logistycznym oraz średnie wielkości przepływów pomiędzy elementami systemu w zadanym okresie czasu;
- \mathbf{N}_σ – macierz stopnia $N \times N$, elementy której charakteryzują współczynniki spiętrzeń w przepływach materiałów pomiędzy elementami systemu;
- \mathbf{H} – harmonogram czasu pracy systemu i jego elementów;
- \mathbf{O} – zbiór parametrów organizacyjnych systemu logistycznego;
- \mathbf{R} – zbiór kryteriów oceny wariantów systemu logistycznego;

Wymienione parametry zadania logistycznego odpowiadają na postawione na rys. 5 pytania. W celu udzielenia odpowiedzi na pierwsze pytanie: „CO?”: ma zostać przewiezione, składowane, przetworzone, itd. sformułowano zbiory \mathbf{G} , \mathbf{K} , \mathbf{W} .

Niech \mathbf{G} będzie zbiorem numerów grup materiałowych „obsługiwanych” przez system, wyłonionych w drodze analizy: $\mathbf{G} = \{1, \dots, g, \dots, G\}$. Niech \mathbf{K} będzie zbiorem rodzajów parametrów opisujących grupy materiałowe: $\mathbf{K} = \{1, \dots, k, \dots, K\}$. Każdy k -ty parametr dla każdej g -tej grupy materiałowej ma przypisaną wartość w_{kg} należącą do zbioru wartości parametrów \mathbf{W} , przy czym: $\mathbf{W} = \{w_{kg} : z_{kg}^{\min} \leq w_{kg} \leq z_{kg}^{\max}; k \in \mathbf{K}; g \in \mathbf{G}\}$ gdzie para $(z_{kg}^{\min}, z_{kg}^{\max})$

jest zakresem zmienności wartości parametrów k -tych dla g -tej grupy materiałowej:

$$\mathbf{Z}_g = \left\{ (z_{1g}^{\min}, z_{1g}^{\max}), (z_{2g}^{\min}, z_{2g}^{\max}), \dots, (z_{kg}^{\min}, z_{kg}^{\max}), \dots, (z_{Kg}^{\min}, z_{Kg}^{\max}) \right\}, \quad g \in \mathbf{G}.$$

Na tej podstawie tworzy się macierz \mathbf{L} o rozmiarze $K \times G$ zawierającą elementy ze zbioru \mathbf{W} . Kolumny macierzy są wektorami opisującymi cechy materiałów g -tych grup materiałowych.

Po drugie: „ILE?, SKĄD?, DOKĄD?”: czegoś ma zostać przewiezione, składowane, przetworzone. Niech N będzie zbiorem wszystkich miejsc nadania i odbioru rozpatrywanych w systemie bądź jego fragmencie: $N = \{1, \dots, n, \dots, N\}$. Wtedy, $\mathbf{N}_{n/o}$ będzie macierzą diagonalną stopnia $N \times N$ opisującą miejsca nadania i odbioru w systemie logistycznym oraz średnie wielkości przepływów pomiędzy elementami systemu w zadanym okresie czasu. Jeżeli na przecięciu wiersza i kolumny tej macierzy występuje wartość niezerowa, wtedy istnieje przepływ między odpowiednimi elementami o wielkości odpowiadającej tej wartości. Dla każdej g -tej grupy materiałowej należy utworzyć oddzielną macierz $\mathbf{N}_{n/o(g)}$. Macierz $\mathbf{N}_{n/o}$ powstaje przez dodanie odpowiednich elementów wszystkich macierzy $\mathbf{N}_{n/o(g)}$.

Ponadto należy utworzyć macierz \mathbf{N}_σ stopnia $N \times N$ zawierającą współczynniki spiętrzeń przepływów materiałów pomiędzy poszczególnymi elementami systemu. Po wymnożeniu macierzy \mathbf{N}_σ oraz $\mathbf{N}_{n/o}$ uzyskuje się macierz przepływów miarodajnych.

Na pytanie „KIEDY?”: coś ma zostać przewiezione, składowane, przetworzone, itd. odpowiada harmonogram realizacji operacji. Harmonogram lub jego część może zostać narzucony przez klienta, ze względu na możliwą współpracę z innymi systemami, lecz bardzo często budowa efektywnego harmonogramu pracy jest zadaniem projektanta. Narzędzia do tworzenia i formalnego zapisu harmonogramów dla systemów logistycznych opisano w [10]. W dalszej części rozprawy rozważa sposób formalnego zapisu harmonogramu PTW.

STAŁE/ZMIENNE: dotyczące organizacji i kosztów pracy będą wyrażone w postaci odpowiednich zbiorów. Niech \mathbf{O} będzie zbiorem parametrów organizacyjnych i kosztowych poddających się pomiarowi: $\mathbf{O} = \{1, \dots, o, \dots, O\}$ o wartościach: $\mathbf{W}_o = \{w_o : z_o^{\min} \leq w_o \leq z_o^{\max}\}$ oraz zakresach zmienności $\mathbf{Z}_o = \left\{ (z_1^{\min}, z_1^{\max}), (z_2^{\min}, z_2^{\max}), \dots, (z_o^{\min}, z_o^{\max}), \dots, (z_O^{\min}, z_O^{\max}) \right\}$.

Ponadto należy utworzyć zbiór \mathbf{O}' parametrów trudnomierzalnych $\mathbf{O}' = \{1, \dots, o', \dots, O'\}$, ich zakresów zmienności: $\mathbf{Z}_{o'} = \left\{ (z_1^{\min}, z_1^{\max}), (z_2^{\min}, z_2^{\max}), \dots, (z_{o'}^{\min}, z_{o'}^{\max}), \dots, (z_{O'}^{\min}, z_{O'}^{\max}) \right\}$ oraz ich oszacowań: $\mathbf{W}_{o'} = \{w_{o'} : z_{o'}^{\min} \leq w_{o'} \leq z_{o'}^{\max}\}$.

Jednym z ostatnich, elementów zadania logistycznego jest zbiór \mathbf{R} numerów kryteriów do oceny rozwiązania projektowego: $\mathbf{R} = \{1, \dots, r, \dots, R\}$ oraz zbiór \mathbf{Q} wag poszczególnych

kryteriów: $Q = \{q_1, \dots, q_r, \dots, q_R\}$, które wykorzystuje się w ocenie cząstkowej i kompleksowej systemu logistycznego [27].

Tak postawiony problem matematyczny możliwy jest do przedstawienia w postaci baz danych (list i tablic) aplikacji informatycznych. Formalne opracowanie danych projektowych i utworzenie zadania logistycznego jest pierwszym krokiem do budowy uniwersalnych narzędzi wspomagających projektowanie systemów logistycznych. Proponowany zapis jest jedną z wielu możliwości, w której starano się uwzględnić jak największą liczbę czynników.

Zadanie logistyczne, poza wielkościami mierzalnymi, obejmuje także całą gamę wielkości trudnomierzalnych, bądź nie poddających się pomiarowi. Parametry takie można próbować opisywać wielkościami matematycznymi i szacować przez tworzenie nowych mierników syntetycznych. Należy do tego wykorzystać inne wielkości technologiczne lub przyporządkowywać im odpowiedniki liczbowe. W takim przypadku możliwe będzie (w pewnym zakresie) zastosowanie przedstawionej wyżej formy. Należy jednak pamiętać, iż istnieją czynniki wpływające na projekt systemu logistycznego, które nie mogą zostać „zmatematyzowane” (np.: prestiż), a które należy uwzględnić w projekcie.

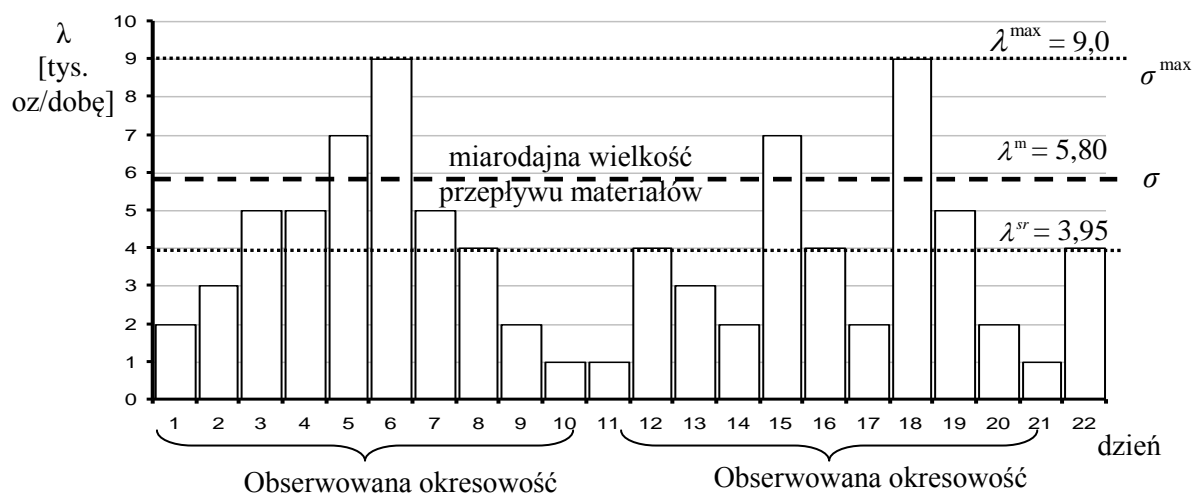
W aplikacji komputerowej SCHED, zadanie logistyczne formułowane i zapisywane jest jako zbiór wartości liczbowych wprowadzanych bezpośrednio do programu. Odbyna się to na różnych etapach realizacji projektu (punkt 6.2).

■ Analiza danych przed-projektowych – współczynniki spiętrzeń

Uzyskanie użytecznych, tj. miarodajnych dla projektowania wielkości przepływów materiałów w obiekcie, a zwłaszcza tzw. *współczynników spiętrzeń materiałów*, wymaga przeprowadzenia analizy statystycznej danych historycznych [5], [27], [45], [61]. Współczynnik spiętrzeń jest stosunkiem wartości maksymalnej z próby do wartości średniej z próby. W przypadku procesu przepływu materiałów przez obiekt logistyczny okazuje się, że maksymalne spiętrzenia materiałów mogą pojawiać się na tyle rzadko, aby pominąć je jako miarodajne dla projektowania. Przyjęto więc, że do obliczenia współczynnika spiętrzeń należy znaleźć wartość *miarodajną*, często mniejszą od wartości maksymalnej spiętrzeń.

Współczynniki spiętrzeń strumieni materiałów decydują o stosunku wydajności technologicznej zaimplementowanej w obiekcie do wydajności wykorzystywanej, a tym samym ekonomicznej opłacalności działalności. Obiekt logistyczny należy projektować pod obciążenia maksymalne λ^m przewidywane przez projektanta, jednak nie muszą one być równoznaczne z rzeczywistymi spiętrzeniami maksymalnymi λ^{\max} . Na rys. 7 przedstawiono przykładowy rozkład spiętrzeń materiałów na wejściu do obiektu logistycznego w ciągu

miesiąca. Przy maksymalnej wartości spiętrzeń dobowych $\lambda^{\max} = 9$ tys. opakowań zbiorczych (oz) na dobę i średniej $\lambda^{\text{sr}} = 3,95$ tys. oz/dobę ustalono wartość miarodajną natężenia strumienia materiałów na $\lambda^m = 5,8$ tys. oz/dobę. W tym przypadku analiza wykazała, że nie jest uzasadnione projektowanie obiektu pod maksymalne przepływy, które zdarzają się okazjonalnie. Tak zaprojektowany obiekt przez większość czasu nie wykorzystywałby swoich możliwości. W tym przykładzie okazuje się, iż bardziej opłacalne będzie podjęcie działań zaradczych takich jak przedłużenie dobowego czasu pracy, wypożyczenie dodatkowego sprzętu czy rozłożenie pracy na kolejne dni w okresach spiętrzeń.



Rys. 7. Miarodajna wielkość przepływu materiałów na wejściu do obiektu logistycznego – przykład
Źródło: opracowano na podstawie [5].

■ Współczynniki spiętrzeń, a projekt obiektu logistycznego

Dane pozyskiwane w celu obróbki do zastosowań projektowych często mają postać zagregowaną średnich dla doby, miesiący lub lat. Dane takie są łatwe do pozyskania z informatycznych systemów transakcyjnych i finansowych jednak konieczne jest przeliczanie ich na wartości miarodajne ([18], [61], [65]).

Wyznaczenie współczynnika obowiązującego dla całego obiektu logistycznego jest trudnym zadaniem i dodatkowo wartość ta będzie obciążona niepewnością wszystkich swoich składowych. Poniższa formuła określa warunek dla ustalenia wartości współczynnika spiętrzeń σ strumieni materiałów w projektowanym obiekcie. Zaproponowane funkcje K , W i D , opisane odpowiednio jako funkcja kosztów, wydajności i zysku będą miały pewną postać analityczną ustaloną przez projektanta i zależną od rozwiązań projektowych.

$$K(W(\sigma)) + K(W(\sigma^{\max}), W(\sigma)) \leq \delta D(W(\sigma)) \quad (3)$$

przy czym:
$$\sigma = \lambda^m / \lambda^{\text{sr}} \quad (4)$$

- gdzie: σ – współczynnik spiętrzeń strumienia materiałów w obiekcie, $\sigma \geq 1$;
 $W(\sigma)$ – wydajność obiektu w funkcji zastosowanego współczynnika spiętrzeń σ ;
 $K(W(\sigma))$ – koszty operacyjne wynikające z utrzymywania wydajności $W(\sigma)$;
 $K(W(\sigma^{\max}), W(\sigma))$ – koszty zapewnienia dodatkowej wydajności w okresach spiętrzeń;
 δ – wskaźnik zysków ustalany przez inwestora, $\delta \geq 1$;
 $D(W(\sigma))$ – przychody wynikające z oferowania wydajności $W(\sigma)$.

Należy podkreślić, że w praktyce projektowej **nie wyznacza się generalnego współczynnika spiętrzeń** dla obiektu logistycznego. Jest to praktycznie nie możliwe (chyba, że dla obiektów obsługujących jednolite, pod względem cech materiały pochodzące od jednego dostawcy i wysyłane do jednego odbiorcy) i nie byłoby miarodajne. Należy przeprowadzić analizę danych historycznych pod kątem wyróżnienia grup materiałowych w obsługiwanym strumieniu ładunków. Liczba i cechy tych grup są zależne od charakterystyk strumienia i wyróżnienie ich następuje indywidualnie ze względu na cechy znaczące, np.: typ jednostki logistycznej, właściciela, miejsce składowania, charakterystyki fizyczne, gabaryty, charakterystyki kosztowe materiałów, uwarunkowania prawne, parametry rozkładu natężenia strumienia danej grupy, ustalenia organizacyjne itd. [5]

Współczynnik spiętrzeń powinien zostać określony ze względu na: wartości wahań natężenia przepływu materiałów oraz „okresowość” wahań (jeżeli jest ona możliwa do przewidzenia). Strumienie o wyraźnie wyróżnionym okresie w wahaniach natężenia, nawet posiadające znaczne wahania amplitudy mogą być w pewnych warunkach opisywane niższymi wskaźnikami spiętrzenia w przepływach materiałów. Sytuacja taka może zostać zaobserwowana jako sezonowość, zmiany tygodniowe lub dobowe.

Na potrzeby aplikacji SCHED przyjęto, że współczynniki spiętrzeń są znane i określone uprzednio w drodze analizy danych historycznych. Wartości współczynników wprowadzane są do programu w formie liczbowej (punkt 6.2).

■ Przepływy roczne a przepływy dobowe

Współczynniki spiętrzeń przedstawione w poprzednim rozdziale umożliwiają przeliczanie wartości średnich – rocznych w przepływie materiałów na wartości dobowe. Wartości te są miarodajne dla projektowania, jednakże uwzględnić należy także możliwości dokonywania w obiekcie logistycznym transformacji strumienia materiałów ze względu na postać fizyczną. Strumień materiałów przekształcany jest w tym przypadku na dwa sposoby:

1. Przetwarzanie, w ramach którego można wymienić m.in.:
 - proste operacje produkcyjne, głównie związane z finalnym różnicowaniem produktu ze względu na wymagania klientów (Zaawansowana produkcja o znacznym stopniu

przetworzenia nie jest z założenia realizowana przez obiekt logistyczny. Jeżeli obiekt obsługuje taką produkcję, to wydział produkcyjny rozpatrywany jest jako wewnętrzne wejście i wyjście strumieni materiałów),

- przepakowywanie, pakowanie,
- konsolidacja i dekonsolidacja jednostek logistycznych,
- etykietowanie, znakowanie itp.

2. Komisjonowanie (jako kluczowa funkcja magazynów dystrybucyjnych), czyli:

- tworzenie niejednorodnych jednostek wysyłkowych (kompletowanych) z jednostek jednorodnych zgodnie z zamówieniami klientów.

Przetwarzanie strumienia materiałów oprócz zmiany postaci fizycznej może oznaczać także zmianę liczby jednostek po przetworzeniu. Do celów projektowych należy określić tzw. stopień przetwarzania, który będzie precyzował jaki jest stosunek liczby jednostek wchodzących do podukładu przetwarzania do liczby jednostek wychodzących:

$$\lambda_{WE}^D = \eta \cdot \lambda_{WY}^D \quad (5)$$

gdzie: $\lambda_{WE}^D / \lambda_{WY}^D$ – przeładunek dobowy na wejściu/wyjściu z układu przetwarzania [j./dobę],

η – stopień przetwarzania.

Założenie takie spełnia wymagania praktyki co do określania wielkości strumieni materiałów w transporcie wewnętrznym. Stopień przetwarzania powinien być określony oddzielnie dla wszystkich podukładów przetwarzania i ewentualnie dla wszystkich grup materiałowych, których dotyczy.

Komisjonowanie prawie w każdym przypadku powoduje różnicę pomiędzy liczbą jednostek wchodzących do systemu a liczbą jednostek wychodzących. W celu wyznaczenia tej różnicy stosuje się dwa parametry charakteryzujące podukład komisjonowania:

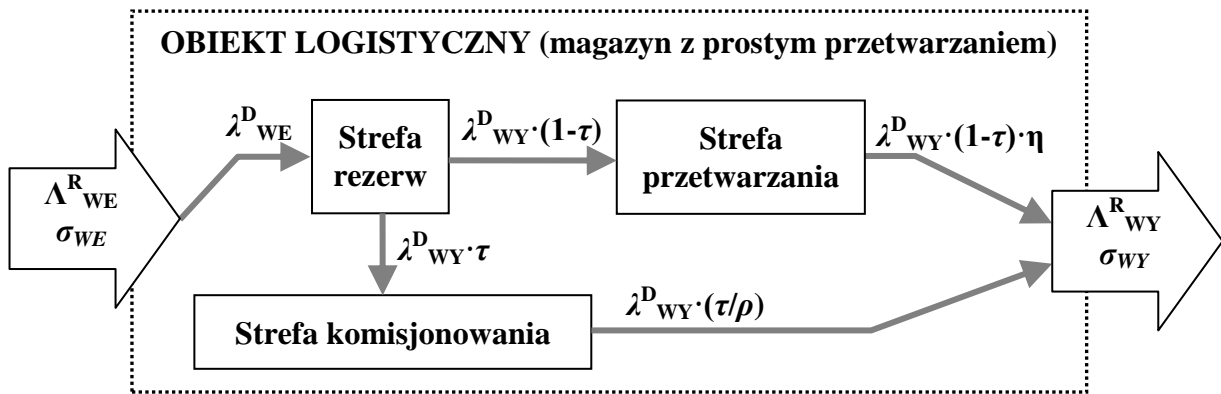
- *Stopień komisjonowania* τ , który określa jaka część materiałów opuszczających obiekt logistyczny będzie podlegała komisjonowaniu $\tau \in \langle 0;1 \rangle$. Przy $\tau = 1$ wszystkie materiały wychodzące są komisjonowane, zaś przy $\tau = 0$ komisjonowanie nie jest realizowane.
- *Stopień wypełnienia jednostki kompletowanej* ρ , który określa jak w stosunku do jednostki jednorodnej wchodzącej do podukładu komisjonowania wypełniona jest jednostka skompletowana wychodząca z podukładu. Stopień wypełnienia $\rho = 0,5$ oznacza, że z jednej jednostki jednorodnej powstają średnio dwie jednostki kompletowane.

Zarówno τ jak i ρ należy określać osobno dla wszystkich podukładów komisjonowania oraz dla poszczególnych grup materiałowych. Parametry te spełniają wymagania praktyki w zakresie obliczania dobowych przepływów materiałowych w systemie.

Przy zadanym obiekcie logistycznym (rys. 8) z podukładem komisjonowania o parametrach τ i ρ , podukładem przetwarzania o stopniu przetwarzania η , liczbie dni roboczych w ciągu roku d_r , przeładunku rocznym na wejściu do obiektu Λ_{WE}^R i na wyjściu Λ_{WY}^R oraz współczynnikach spiętrzeń dobowych σ_{WE} i σ_{WY} można wyznaczyć przepływy dobowe na wejściu λ_{WE}^D i wyjściu λ_{WY}^D z obiektu logistycznego wg zależności:

$$\lambda_{WE}^D = \left[\frac{\Lambda_{WE}^R}{d_r} \cdot \sigma_{WE} \right] \text{ [jedm./dobę]} \quad (6)$$

oraz
$$\lambda_{WY}^D = \left[\frac{\Lambda_{WY}^R}{d_r} \cdot \sigma_{WY} \cdot \left((1-\tau) \cdot \eta + \frac{\tau}{\rho} \right) \right] \text{ [jedm. przetworzonych + jedn. kompl./dobę]}. \quad (7)$$



Rys. 8. Przetwarzanie strumienia materiałów w obiekcie logistycznym – przykład

Źródło: opracowanie własne.

Program SCHED umożliwia przeliczanie wartości rocznych na dobowe wg powyższych wzorów dla zadanych grup materiałowych.

2.3. Kształtowanie obiektów logistycznych

■ Wprowadzanie

Sformułowanie zadania logistycznego pozwala na przejście do kolejnego etapu projektowego – kształtowania (por. rys. 2 i rys. 3). Znane są natężenia strumieni materiałowych na wejściu i wyjściu obiektu (rys. 4), ich fizyczna postać oraz zakres przekształceń, którym podlegają. W tym etapie ustala się technologie obsługi strumienia materiałów umożliwiające wykonanie zadania logistycznego na żądanym poziomie jakości usług i po minimalnym koszcie.

Charakter etapu kształtowania utrudnia budowę ścisłego algorytmu projektowania obiektów logistycznych. Wynika to z liczby potencjalnych, akceptowalnych rozwiązań

projektowych należących do szerokiego spektrum możliwych rozwiązań i jeszcze szerszej przestrzeni wzajemnych kombinacji i przypadków rozwiązań cząstkowych.

W fazie kształtowania, poprzez analizę zadania logistycznego pod względem wymagań procesowych, określone są fizyczne aspekty obiektu logistycznego. Kreowane są warianty projektowe zakładające wykorzystanie różnych technologii buforowania, składowania i transportu wewnętrznego, a także różne ukształtowanie przestrzenne samego budynku.

Fragmenty procedury kształtowania obiektu logistycznego zaprezentowane zostaną na przykładzie obiektu magazynowego, dla którego etap kształtowania jest wyraźny. Kształtowanie procesu przepływu materiałów w magazynie i samego magazynu może zostać łatwo odniesione do innych typów obiektów logistycznych.

■ **Kształtowanie procesu przepływu materiałów w obiekcie logistycznym**

Pierwszym krokiem w kształtowaniu obiektu logistycznego jest *identyfikacja strumieni materiałowych* przepływających przez niego. Oznacza to rozłożenie strumienia wejściowego na strumienie w transporcie wewnętrznym i podanie ich podstawowych cech, takich jak:

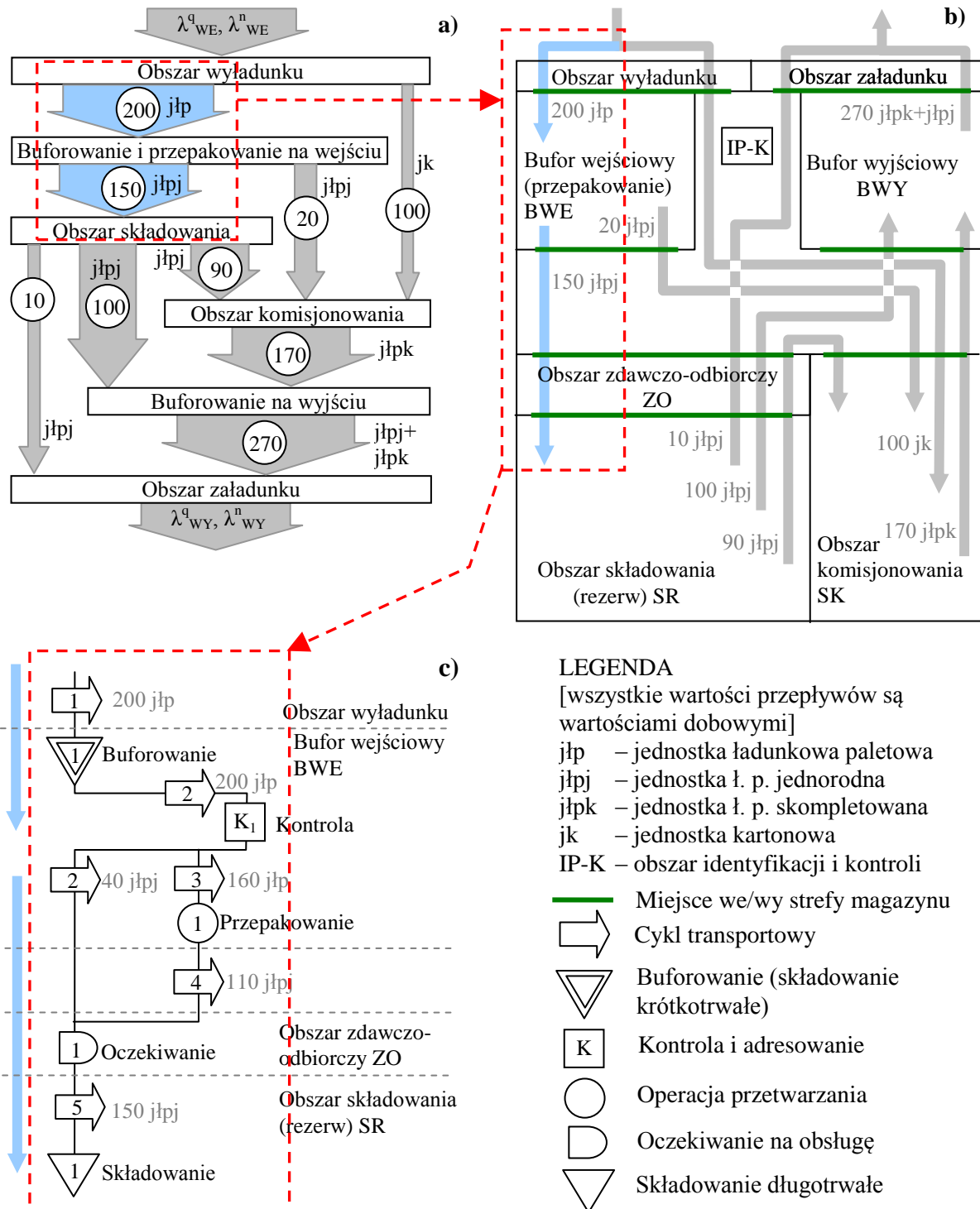
- punkty początkowe i końcowe tras przepływu,
- natężenie strumienia materiałów wyrażone w jednostkach fizycznych na jednostkę czasu (najczęściej w okresie doby lub godziny),
- fizyczna postać materiałów (rodzaj opakowania logistycznego),
- czas realizacji danego strumienia (harmonogram PTW!).

Przykład identyfikacji strumieni materiałów za pomocą wykresu Sankey'a zaprezentowano na rys. 9a.

Wymienione cechy są wynikiem pracy koncepcyjnej projektanta i będą weryfikowane w następnych etapach projektowych. Opisanie cech strumieni wymaga określenia obszarów funkcjonalnych obiektu logistycznego i ich rozmieszczenia na planie. Przez *obszar funkcjonalny* rozumie się wydzieloną fizycznie przestrzeń w obiekcie logistycznym, w której są realizowane pewne specyficzne rodzaje działań czy to związane z przekształcaniem strumieni materiałów czy też innymi funkcjami obiektu. Działania te determinują rodzaj zastosowanych w obszarze technologii (patrz rys. 9b). Do obszarów takich zalicza się:

- obszary: składowania, komisjonowania, przetwarzania, buforowania, konsolidacji, kontroli oraz obszary techniczne i pomocnicze,
- drogi w transporcie wewnętrznym oraz ciągi piesze,
- obszary biurowe i socjalne,

- punkty zdawczo-odbiorcze na granicach obszarów i wewnątrz nich oraz na granicach obszarów produkcyjnych lub innych obszarów traktowanych jako miejsca powstawania i zanikania strumieni materiałów w transporcie wewnętrznym.



Rys. 9. Podstawowe fazy kształtowania procesu przepływu materiałów w obiekcie magazynowym za pomocą narzędzi prezentacji: a) wykres Sankey'a, b) rozmieszczenie i wzajemna orientacja obszarów funkcjonalnych, c) wydzielanie zadań w wybranym fragmencie procesu przepływu materiałów

Źródło: opracowanie własne.

Dysponując rozmieszczeniem obszarów można dokonać rozdziału strumieni materiałowych i przypisania ich do tych obszarów. Pozwala to z kolei na określenie technologii obsługi strumieni. Do identyfikacji strumieni na planie przestrzennym obiektu wykorzystuje się narzędzia prezentacyjne takie jak wykres Sankey'a (rys. 9a) czy wykres procesu przepływu materiałów i informacji (rys. 11 str. 71) oraz schematy ideowe przepływów i symbolikę opisującą poszczególne operacje (za [27], [45], [51]).

Zidentyfikowane na planie obiektu strumienie materiałów dzielone są na części odpowiadające kolejnym operacjom transportowym, magazynowym i przetwarzania (rys. 9c). W ten sposób określone zostają *zadania* w procesie przepływu materiałów składające się na ukierunkowany przepływ materiałów.

Zadanie w procesie przepływu materiałów definiuje się jako konieczność przemieszczenia wybranych materiałów pomiędzy dwoma punktami w przestrzeni obiektu logistycznego. Technologia wykonania zadania zakłada realizację określonej liczby tzw. *cykli transportowych*. Cykle transportowe wchodzące w skład zadań wydzielone są ze względów technologicznych, tj. wykonywane są przez jedno urządzenie lub pracownika na pojedynczych jednostkach logistycznych i są powtarzalne. Szersze ujęcie i definicja zadania w procesie przepływu materiałów zostały przedstawione w punkcie 3.2 rozprawy. Wyróżnione zadania będą *numerowane, nazywane i opisywane*. Na podstawie analizy strumienia wejściowego i wyjściowego do obiektu ustala się natężenia strumieni wewnętrznych, czyli dobowe liczby powtórzeń cykli transportowych w ramach zadań.

Tak określony proces zapisywany jest w postaci *kart procesu przepływu materiałów* oraz *kart cykli transportowych*, które opisują szczegółowo każde zadanie procesu.

Zadania w procesie przepływu materiałów należy uszeregować ze względu na priorytet wykonania. Wyróżnione zostały dwa typy zadań rozpatrywane na etapie kształtowania:

- zadania związane bezpośrednio z *realizacją zamówień* klientów (realizowane priorytetowo – w wymaganym czasie i kolejności, np. komisjonowanie, załadunek, uzupełnianie strefy komisjonowania konieczne dla terminowej i nieprzerwanej pracy obiektu magazynowego),
- zadania należące do grupy *pozostałych* (tzn. nie związanych bezpośrednio z realizacją zamówień klientów; mogą być przełożone, podzielone, wykonane w okresie bezruchu – np. prace porządkowe i konsolidacyjne w strefie składowania, inwentaryzacje itp.). Cykle takie rzadko uwzględnia się przy projektowaniu obiektu.

Na potrzeby aplikacji SCHED przyjęto, że cykle transportowe tworzące zadania procesu przepływu materiałów określane są automatycznie pomiędzy miejscami powstawiania i zanikania strumieni materiałów. Lokalizacja tych miejsc jest konsekwencją

sporządzenia tablicy krzyżowej odwzorowującej wzajemne połączenia między elementami systemu. Aplikacja SCHED pozwala na nazwanie i opisanie tych połączeń jako cykli transportu wewnętrznego (punkt 6.2).

■ **Kształtowanie przestrzenne obiektu logistycznego**

Aspekt kształtowania przestrzennego obszarów funkcjonalnych obiektu logistycznego rozpatrywany jest szeroko w literaturze (tzw. *layout design*: [2], [12], [20], [75]). Literatura podaje szereg metod optymalizacyjnych oraz przybliżonych konfiguracji przestrzennej obiektów logistycznych. Metody te jednak mogą być wykorzystane dopiero po uprzednim zidentyfikowaniu elementów układu transportowo-magazynowego w obiekcie oraz po podaniu ich dokładnych charakterystyk. W praktyce oznacza to, że przed zastosowaniem tych metod znane są już wszystkie obszary funkcjonalne w danym obiekcie oraz ich charakterystyki. Z kolei wyznaczenie tych charakterystyk wymaga wcześniejszego dokonania obliczeń na wartościach będących rezultatem rozmieszczenia tychże obszarów. W ten sposób powstaje zapętlenie cykliczne, które może zostać przerwane poprzez:

- wykorzystanie do rozmieszczenia obszarów danych historycznych (w przypadku analizy istniejącego obiektu),
- wykorzystania danych z innego obiektu realizującego podobne zadanie logistyczne,
- porównanie kilku wariantów rozkładu obszarów.

Problem rozmieszczenia przestrzennego obszarów funkcjonalnych obiektu logistycznego nie może zostać rozwiązany całkowicie na etapie kształtowania systemu. Na tym etapie możliwe jest podanie:

- ogólnego typu zakładowego układu logistycznego (wynikającego z jego przeznaczenia i zadania logistycznego, np. magazyn wysokoregałowy, obiekt cross-dockingowy itd.),
- szacunkowych wymiarów obszarów funkcjonalnych,
- sąsiedztwa obszarów ze względu na realizację procesu przepływu materiałów,
- orientacji przestrzennej obszarów ze względu na ich wejścia i wyjścia.

Nie jest zaś możliwe podanie dokładnych:

- wymiarów obszarów (proporcji i długości krawędzi obszarów),
- ścisłej organizacji ruchu środków transportu wewnętrznego,
- ułożenia obszarów w przestrzeni obiektu,
- wydajności przekształceń realizowanych w obszarach.

Parametry te zostaną sprecyzowane dopiero w trakcie wymiarowania i zweryfikowane na etapie oceny. Jeżeli nie spełnią kryteriów oceny, wtedy będzie trzeba powrócić do etapu

kształtowania. Poniżej przedstawiono w formie ogólnej zasady projektowe podstawowe dla planowania transportu wewnętrznego:

- Kształt obszaru funkcjonalnego wynika z zakresu przekształceń, które tam są realizowane i stosowanej wewnątrz technologii.
- Kształt obszaru funkcjonalnego może wynikać z warunków terenowych działki.
- Kształt obszaru funkcjonalnego jest pierwotny względem wzajemnego ustawienia przestrzennego obszarów i w celu dopasowania do innych obszarów może być zmieniany tylko w zakresie dopuszczanym przez stosowaną wewnątrz technologię.
- Obszary funkcjonalne należy lokować w sposób zapewniający minimalizację czasów cykli transportowych, tzn. umieszczać w swoim bezpośrednim sąsiedztwie obszary o dużej wzajemnej wymianie materiałów.
- Obszary funkcjonalne należy lokować tak, aby ruch w transporcie wewnętrznym był skanalizowany i zapewniał bezpieczeństwo pracowników, należy rozważyć oddzielne ciągi transportowe dla przypadków wyjątkowo dużych przepływów między strefami.
- Obszary funkcjonalne należy lokować z uwzględnieniem zasad bezpieczeństwa składowania i manipulacji materiałami (możliwości sąsiedowania materiałów ze względów przeciwpożarowych lub innych).
- Wejścia i wyjścia obszarów (np. punkty zdawczo-odbiorcze) należy umieszczać tak, aby minimalizować czas cykli transportowych i powierzchnię ciągów transportowych.
- Wejścia i wyjścia obszarów (np. punkty zdawczo-odbiorcze) należy umieszczać tak, aby umożliwiać łatwe włączanie się środków transportu opuszczających obszar do ruchu.
- Należy unikać powstawania wąskich gardeł w przepływie materiałów (np. ze względów architektonicznych – rozstaw słupów nośnych).
- Ciągi transportowe muszą mieć odpowiednią szerokość i przepustowość do ruchu.
- Ruch pieszych musi być uwzględniony przy projektowaniu ciągów transportowych i w miarę możliwości oddzielony od ruchu urządzeń.
- Należy planować możliwość powiększenia obszaru w związku z rozwojem systemu.

Aspekt kształtowania przestrzennego obiektu logistycznego w aplikacji SCHED został sprowadzony do zidentyfikowania obszarów funkcjonalnych w obiekcie i użycia do ich odwzorowania standardowych elementów dostępnych w programie. Z wybranych elementów tworzy się tablicę krzyżową, opisującą połączenia między nimi. Elementy te powinny zostać wcześniej zwymiarowane ze względu na wymiary fizyczne i należy podać wzajemne ich rozłożenie na planie zakładu. Działanie takie następuje poza programem (punkt 6.2).

■ Technologia składowania

Składowanie oraz buforowanie w przepływach materiałów są nieodłączne i konieczne do sprawnej realizacji zadań logistycznych. W każdym obiekcie logistycznym zachodzi konieczność składowania czy też buforowania materiałów. Wielkość zapasu materiałów zależy od rodzaju obiektu logistycznego. Funkcja składowania będzie marginalna w obiektach cross-dockingowych, zaś w przypadku magazynu rezerwowego będzie kluczowa. Tak więc konieczne jest wydzielanie obszarów składowania w przestrzeni obiektów. Technologię składowania dobiera się po ustaleniu rodzaju opakowań logistycznych, wielkości przepływów materiałów, rotacji i ewentualnych wymagań specjalnych. Technologia składowania musi być odpowiednia do postaci ładunków, zakresu przekształceń i spodziewanej wydajności.

Ważną decyzją, jaką należy podjąć, jest czy będą stosowane standardy w składowaniu i manipulacji, takie jak jednostki paletowe standardowe typu EUR i urządzenia do ich składowania i przemieszczania. Stosowanie standardowych rozwiązań w zakresie transportu wewnętrznego i składowania oznacza:

- krótszy czas realizacji projektu ze względu na dostępność gotowych rozwiązań,
- większą elastyczność i możliwość modyfikacji rozwiązań (modułowość),
- łatwe dopasowanie do systemów logistycznych innych uczestników łańcucha dostaw,
- niższe koszty utrzymania obiektu, serwisu i rozbudowy,
- brak kosztów związanych z transformacją strumienia materiałów do postaci standardowych wykorzystywanych przez inne ogniwa łańcucha dostaw,
- stosowanie standardowych narzędzi kierowania przepływem materiałów.

Niekiedy zakres dokonywanych przekształceń czy wielkość obrotów lub cechy fizyczne materiałów zmuszają do wykorzystania technologii specjalizowanych – niestandardowych. Rozwiązania takie pozwolą zwiększyć wydajność procesu lub wprost umożliwią jego realizację, jednak będą wymagały zastosowania specjalnych układów na wejściu i wyjściu obiektu. Układy te będą transformowały strumień materiałów z i do postaci akceptowalnej przez innych uczestników łańcucha dostaw, co będzie generowało dodatkowe koszty.

Program SCHED nie przewiduje doboru technologii składowania wprost, jednakże będzie ona obecna w typie zastosowanego środka transportowego oraz parametrach cykli transportowych, takich jak długość i wysokość ściany regałowej oraz liczba korytarzy w strefie składowania, rodzaj obsługiwanej jednostki itd. Technologia ta będzie także wpływała na fizyczne wymiary obszarów i te będą wprowadzane do algorytmu programu.

Systemy składowania

Zastosowana technologia składowania będzie wynikała z:

- wielkości rotacji zapasu danych grup materiałowych,
- typu jednostki logistycznej, która ma być składowana,
- cech składowanych partii materiału/szarży produkcyjnej (ewentualna konieczność zachowania pełnej lub ograniczonej selektywności zapasu),
- stosowanej zasady pierwszeństwa wysyłki (FIFO, LIFO, FEFO²),
- ceny gruntu lub ceny metra kwadratowego powierzchni składowej,
- technologii komisjonowania zleceń klientów.

Wielkość rotacji zapasu (jej odwrotnością jest tzw. normatyw zapasu) opisuje dynamikę wymiany zapasu. Duża rotacja oznacza krótkie składowanie i duży ruch w strefach składowania oraz obszarach wejściowo-wyjściowych. Mała rotacja oznacza składowanie długookresowe i niewielkie ruchy materiałowe. Skrajnie duża rotacja spotykana jest w obiektach cross-dockingowych i powoduje, że praktycznie nie występuje tam obszar składowania, a jedynie strefy buforowe. Normatyw dla takich obiektów jest w granicach od kilku minut do około 6 godzin. Z kolei wolna rotacja w przypadku magazynów o funkcji gromadzenia i przechowywania zapasów umożliwia wykorzystanie zaawansowanej technologii składowania wysokiego.

Typ jednostki logistycznej, jej masa i właściwości mechaniczne wpływają na dobór technologii składowania. I tak, jednostki paletowe można składować w regałach paletowych różnego typu lub w postaci blokowej na posadzce. Opakowania zbiorcze i pojemniki składowane będą w regałach półkowych bądź specjalnych regałach przystosowanych do konkretnego rodzaju jednostki. Materiały sypkie czy płynne będą z kolei wymagały całkowicie innych technologii składowania.

Technologia składowania musi zostać dobrana do wymaganego poziomu selektywności zapasu, tj. realizacji reguł FIFO, LIFO i FEFO wymuszających wykorzystanie odpowiednich urządzeń do składowania.

Cena gruntu lub metra kwadratowego powierzchni wynajmowanej lub budowanej będzie wpływała na wysokość składowania. Przy wysokiej cenie, w przypadku obiektów magazynowych, uzasadnione są zaawansowane technologie składowania wysokoregałowego i wysokiego (pełne uzasadnienie podaje m.in. praca [24]). Z kolei niska cena gruntu pozwala na stosowanie tańszych technologii składowania w budowlach niskich.

Technologia komisjonowania zleceń klientów w realizacji funkcji dystrybucji jest ważnym aspektem wyboru technologii składowania. Ulokowanie obszaru komisjonowania

² (ang.) FIFO – *First-In First-Out* (ten, który pierwszy wszedł ten pierwszy wychodzi), LIFO – *Last-In First-Out* (ten, który ostatni wszedł wychodzi jako pierwszy), FEFO – *First-Expired First-Out* (ten, któremu jako pierwszemu skończy się data ważności/użyteczności, wychodzi jako pierwszy).

w obszarze składowania (tzw. komisjonowanie z poziomu „0”, bądź komisjonowanie z wykorzystaniem wózków systemowych lub wielofunkcyjnych) wymaga zastosowania specjalnych urządzeń i specjalnej organizacji przestrzennej strefy. Decyzja ta nie pozostaje także bez wpływu na harmonogram PTW.

W programie SCHED technologia pracy w obszarach składowania i wielkość tych obszarów wpływają na długości cykli transportowych i dobór środków transportu wewnętrznego. Parametry te są wprowadzane bezpośrednio do programu. Obszary składowania traktowane są wyłącznie jako miejsca powstawania i zanikania potoków ruchu w obiekcie logistycznym i w programie nie jest rozważana przewaga wydajnościowa różnych rozwiązań z zakresu systemów składowania.

■ Typy urządzeń i kategorie pracy ludzkiej

Urządzenia transportu wewnętrznego

Urządzenia transportu wewnętrznego dobierane są ze względu na:

- natężenie strumienia materiałów,
- typy jednostek logistycznych, które mają być transportowane,
- charakter transportu wewnętrznego (ciągły/przerywany),
- technologię składowania i narzucane przez nią warunki przestrzenne,
- technologię komisjonowania,
- warunki środowiskowe pracy.

Doboru urządzeń dokonuje się dla każdego obszaru funkcjonalnego oddzielnie, ze względu na realizowane zadania. Dążenie do standaryzacji procesu i minimalizacji kosztów operacyjnych objawia się w próbie przydzielenia tego samego typu urządzenia do wielu różnych typów zadań w różnych obszarach.

Wielkość rotacji będzie miała znaczenie przy podjęciu decyzji o stosowaniu urządzeń o działaniu ciągłym (przenośniki) lub przerywanym (np. wózki widłowe), a także automatyzacji procesu i urządzeń (systemy AS/R, AGV³, układnice regałowe). Rotacja zapasu musi być rozpatrywana jednocześnie z cechami obsługiwanych grup materiałowych.

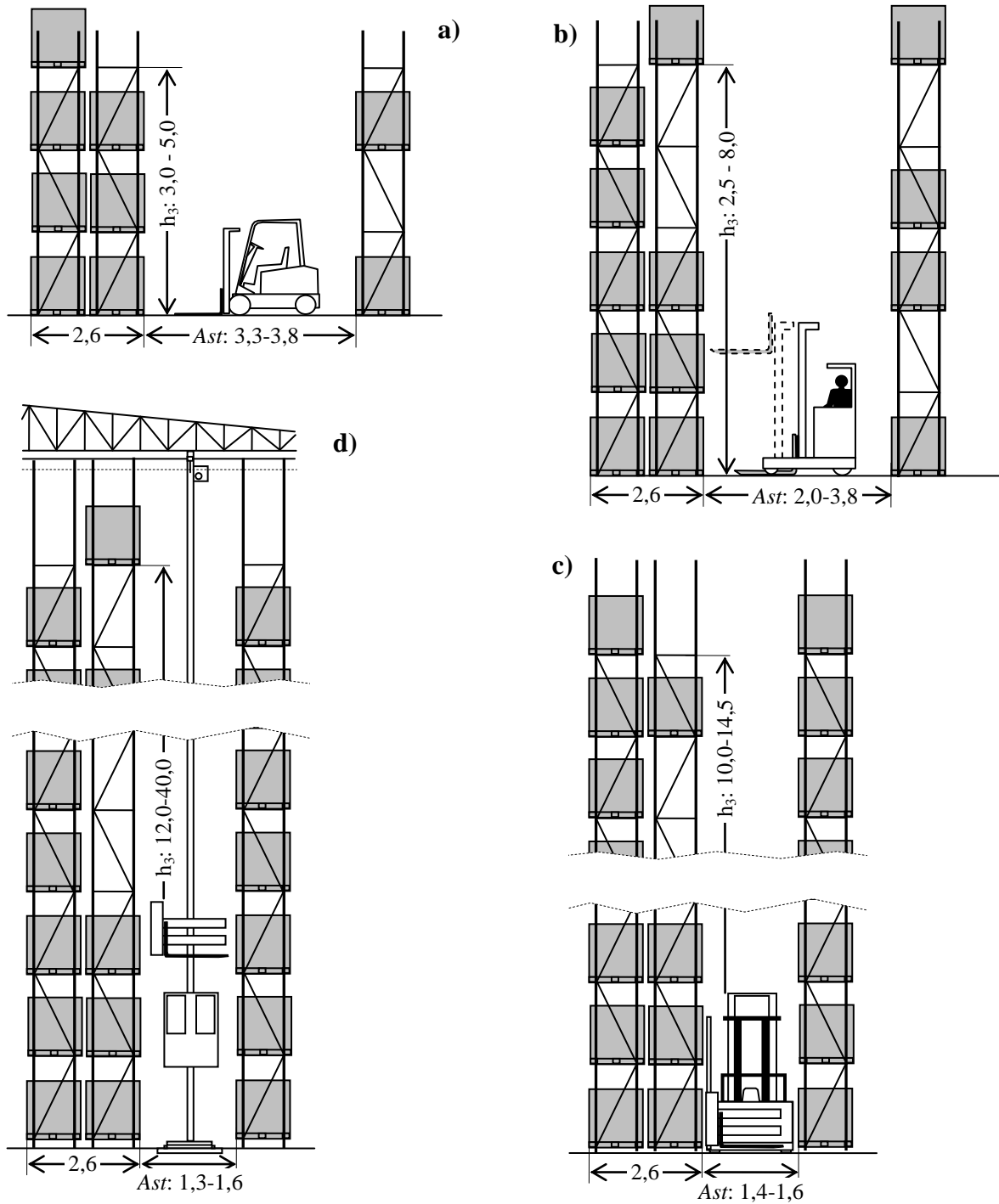
W ogólności obiekt logistyczny dysponuje zbiorem U typów urządzeń (środków transportu wewnętrznego). Elementy zbioru $U = \{1, 2, \dots, u, \dots, U\}$ są numerami typów urządzeń. Typy środków transportu wewnętrznego wyróżnia się ze względu na:

- jednostkowy koszt pracy (czynnik główny),
- obszar pracy,

³ (ang.) AS/R – Automatic Storage/Retrieval Systems (Systemy automatycznego składowania i manipulacji).
AGV – Automatic Guided Vehicle (pojazdy kierowane automatycznie).

- realizowany fragment procesu (przypisanie do konkretnych zadań),
- zdolność obsługi różnych typów jednostek logistycznych.

Typ obsługiwanych jednostek logistycznych, na równi z rotacją i technologią składowania, decydują o doborze urządzeń transportowych. Na rys. 10 przedstawiono cztery przykłady doboru urządzenia w zależności od technologii składowania.



Rys. 10. Wybrane przykłady zależności pomiędzy szerokością korytarza roboczego Ast [m] strefy składowania, wysokością podnoszenia h_3 [m] i typem urządzenia, a) wózek czołowy z przeciwwagą, b) wózek z masztom wysuwym, c) wózek typu VNA, d) układnica regałowa.

Źródło: opracowanie własne.

Konstruowanie wysokich budowli, takich jak magazyny, oznacza stosowanie węższych korytarzy roboczych. Wraz ze zwiększaniem wysokości obiektu zwiększa się cena i poziom specjalizacji urządzeń. Poczynając od powszechnie stosowanego przy niskiej cenie gruntu rozwiązania przedstawionego na rys. 10a, aż do przypadku skrajnego – układnicy regałowej przedstawionej na rys. 10d, która może operować wyłącznie w obszarze składowania.

Warunki klimatyczne pracy wpływają na dobór urządzeń transportu wewnętrznego. Duże znaczenie ma to, praca odbywa się w pomieszczeniach zamkniętych, czy występuje narażenie na działanie warunków atmosferycznych lub występują warunki specjalne takie jak np. w chłodni, mroźni czy warunki sprzyjające korozji chemicznej. Dodatkowo ważny jest typ nawierzchni, po której urządzenie będzie się poruszało oraz rodzaj jego napędu. Dla urządzeń poruszających się na kołach znaczenie będą miały zastosowane pochyłości wjazdów na rampy lub mostki przeładunkowe, a także dopuszczalne naciski jakie może przenieść podłoże (posadzka betonowa, podłoga drewniana wagonu kolejowego lub naczepy samochodowej).

Program SCHED wyposażony został w katalog urządzeń transportu wewnętrznego uzupełniany przez użytkownika. Katalog ten pozwala na opisanie w nim wszystkich typów urządzeń transportu wewnętrznego wraz z podaniem niezbędnych parametrów. Katalog odzwierciedla zbiór U . Dobór urządzeń do zadań procesu pozostaje w gestii użytkownika.

Kategorie pracy ludzkiej

Systemy logistyczne, tak jak i inne struktury w przedsiębiorstwach, ustrukturyzowane są na zasadzie hierarchicznego podziału na pionory i szczeble zarządzania. Zakres obowiązków, a także wymagane kwalifikacje różnicują pracowników tworząc tzw. *kategorie pracy ludzkiej*. W ogólności zbiór kategorii pracy ludzkiej C składa się z numerów kategorii pracy ludzkiej, przy czym $C = \{1, 2, \dots, c, \dots, C\}$. Typy kategorii zawarte w zbiorze będą wynikały z:

- jednostkowego kosztu pracy pracownika (czynnik główny),
- zakresu obowiązków pracownika,
- posiadanych kwalifikacji (uprawnienia do obsługi urządzeń, szkolenia),
- zakresu odpowiedzialności.

Program SCHED wyposażony został w katalog kategorii pracy ludzkiej uzupełniany przez użytkownika. Katalog ten pozwala na opisanie w nim wszystkich kategorii pracy wraz z podaniem niezbędnych parametrów pracy. Katalog odzwierciedla zbiór C . Dobór pracownika do urządzenia lub do zadania pozostaje w gestii użytkownika.

■ Narzędzia i dane wspomagające proces kształtowania

Kształtowanie obiektu logistycznego odbywa się w dwóch przypadkach. W pierwszym projektant całkowicie od podstaw opracowuje koncepcję technologiczno-organizacyjną obiektu. Drugi, stosowany w praktyce sposób, zakłada wykorzystanie istniejących rozwiązań i urządzeń i budowę układu logistycznego z gotowych elementów. Ponieważ opracowywanie nowych technologii nie jest objęte przez metodologię proponowaną w rozprawie, nie będzie dalej podejmowane. W związku z tym program SCHED zakłada wykorzystanie rozwiązań standardowych, chociaż pozostawia znaczną możliwość ich parametryzacji.

Na rys. 2 na str. 30, w obszarze kształtowania systemu logistycznego, widoczny jest udział źródeł informacji, w skrócie określonych jako „katalogi”. Źródła te stanowią zbiór:

- katalogów urządzeń transportu wewnętrznego,
- katalogów wyposażenia niemechanicznego (np. regałów paletowych),
- katalogów gotowych rozwiązań systemowych w zakresie transportu i składowania dla danej klasy zadań logistycznych,
- norm i standardów stosowanych przy konstruowaniu procesu przepływu materiałów,
- studiów przypadków i gotowych projektów,
- katalogów systemów sterowania.

Ponadto praca projektanta może być wspomagana przez:

- programy symulacyjne,
- narzędzia rysunkowe i wizualizacyjne,
- programy przyspieszające elementy rachunkowe projektu.

2.4. Wymiarowanie obiektów logistycznych

■ Wprowadzenie

Proces ukształtowany to proces, co do którego technologia realizacji została dobrana do zadania logistycznego i odpowiednio opisana. Znana jest lokalizacja przestrzenna obszarów funkcjonalnych i podsystemu transportu wewnętrznego obiektu. Określone zostały typy urządzeń i kategorie pracy ludzkiej. Znane są poszczególne zadania wchodzące w skład PTW i technologie ich realizacji, a także natężenia strumieni materiałowych. Kolejnym etapem jest wymiarowanie procesu, czyli przypisanie mu wartości liczbowych takich jak: liczby urządzeń i pracowników, wskaźników wydajności, kosztów, nakładów i parametrów oceny (rys. 2).

Podobnie jak w przypadku kształtowania, tak i elementy wymiarowania będą przedstawiane na przykładzie obiektów magazynowych, które realizują wszystkie typowe aktywności wypełniające definicję logistyki stosowanej.

■ Wyznaczenie potrzebnych powierzchni i kubatur

Obszar składowania

Na podstawie wielkości przeładunków rocznych na wejściu do obiektu oraz wartości normatywu każdej grupy materiałowej można określić normatywną wielkość zapasu. Obszar składowania w uproszczeniu, można traktować jako system kolejkowy ([64]). Konsekwencją teorii kolejek jest tzw. prawo Little'a dla systemu kolejkowego w stanie ustalonym, postaci:

$$Q = \lambda \cdot W \quad (8)$$

gdzie: Q – średnia długość kolejki [jednostek materiału];
 λ – częstotliwość przybyć [jednostek materiału/jednostkę czasu];
 W – średni czas oczekiwania na obsługę [jednostek czasu].

Obszar składowania może zostać przyrównany do systemu kolejkowego, jeżeli przyjmie się, że jednostki wchodzące do niego są klientami dołączającymi do kolejki (tzn. są składowane) aby oczekiwać na obsługę (tj. wysyłkę/wydanie). Jeżeli obszar jest w stanie zbliżonym do ustalonego (tj. wielkości dostaw i wysyłek w wybranym okresie czasu równoważą się) możliwe jest wyliczenie długości kolejki – czyli wymaganej pojemności obszaru składowania [26]:

$$Z_p = s \cdot \Lambda_{WE}^R \cdot N \cdot \frac{1}{d_r} \quad (9)$$

gdzie: Z_p – wymagana pojemność obszaru składowania [jednostek];
 Λ_{WE}^R – przeładunek roczny na wejściu do obszaru składowania [jednostek/rok];
 N – liczba dni roboczych w roku [dni];
 d_r – liczba dni roboczych w roku [dni];
 s – wskaźnik zapasu bezpieczeństwa.

Dysponując wybranymi w etapie kształtowania technologią składowania, typem urządzenia operującego w obszarze składowania oraz pojemnością obszaru składowania, można określić jego fizyczne rozmiary. Obszar składowania w obiektach logistycznych, takich jak magazyny paletowe musi spełniać dodatkowe wymagania technologiczne co do liczby korytarzy roboczych (zawsze większa lub równa liczbie pracujących w nich urządzeń), liczby i umiejscowienia korytarzy poprzecznych, stosunku długości do szerokości strefy. Do konfiguracji obszaru składowania stosuje się modele symulacyjne oraz optymalizacyjne ([7])

Obszary buforowe

Obszary buforowe mają za zadanie stabilizowanie i wyrównywanie przepływu materiałów pomiędzy obszarami obiektu logistycznego. Im większe różnice w rozkładzie intensywności strumienia materiałów pomiędzy elementami systemu, tym bardziej pojemne muszą być bufory (punkt 3.4). Strefy buforowe na wejściu i wyjściu do obiektu logistycznego wykorzystywane są nie tylko jako miejsca oczekiwania na dalsze przemieszczenie, ale także do realizacji kontroli, przepakowania, konsolidacji, etykietowania, adresowania i innych, które również należy uwzględnić obliczając pojemność tych obszarów. Pojemność buforów wejściowych i wyjściowych można wyznaczyć na podstawie analizy wykresu logistycznego.

Obszar komisjonowania

W przypadku obiektów logistycznych takich jak magazyny dystrybucyjne strefa komisjonowania jest najważniejszym elementem funkcjonalnym całego układu. Wielkość obszaru komisjonowania zależna będzie od:

- wydzielenia fizycznego obszaru komisjonowania od strefy składowania,
- liczby pozycji asortymentu A ,
- liczby oraz struktury zleceń na komisjonowanie (parametry $w \times p$),
- technologii komisjonowania, w tym liczby stopni komisjonowania.

Komisjonowanie może odbywać się w wydzielonej przestrzeni lub obszarze składowania. Wydzielenie fizyczne strefy komisjonowania następuje przy dużym stopniu komisjonowania τ , dużej rotacji asortymentu i względnie stopniu wypełnienia jednostki kompletowanej ρ (def. w punkcie 2.2). Organizacja komisjonowania w obszarze składowania musi być ujęta na harmonogramie PTW i będzie ograniczała ruch w tym obszarze. Decyzja o oddzielnej strefie komisjonowania skutkuje generowaniem nowych cykli transportowych.

Pojemność i wymiary obszaru komisjonowania określa się na podstawie tzw. *Activity Profiling*, czyli analizy liczby oferowanych pozycji asortymentu A oraz rozkładu pracochłonności na kolejne pozycje i grupy materiałowe. ([11], [26], [30], [60]).

Liczba stopni komisjonowania większa niż jeden, będzie wymagała dodatkowej organizacji pracy i/lub dodatkowych przestrzeni i cykli transportowych ([60]). Dokładny opis i systematykę technologii komisjonowania przedstawiono w [26] w punkcie 6.4. Zagadnienie komisjonowania jest zbyt szerokie, aby mogło zostać omówione wyczerpująco.

Ciągi transportu wewnętrznego

Ciągi transportu wewnętrznego organizuje się z uwzględnieniem natężenia ruchu na danej trasie, liczby skrzyżowań z innymi ciągami i typu pracującego urządzenia. W przypadku dużego natężenia ruchu stosuje się ciągi dwukierunkowe lub organizuje się

jednokierunkowe pętle transportowe w celu ukierunkowania ruchu. Szerokość ciągów transportowych musi wynikać z parametrów urządzeń i norm bezpieczeństwa ([49]).

Planując sieć dróg transportu wewnętrznego należy uwzględnić ciągi piesze, (wg. norm bezpieczeństwa [49]) oraz wysokości dróg dobrane ze względu na operujące w nich urządzenia i umieszczane pod sklepieniami instalacje techniczne.

Wymienione aspekty określania pojemności obszarów funkcjonalnych układu logistycznego nie są rozważane w programie SCHED. Celem realizacji programu było odwzorowanie aspektów organizacyjnych procesu transportu wewnętrznego, do czego nie wykorzystuje się informacji o pojemności stref i obszarów. Niemniej jest to ważna część projektu obiektu logistycznego.

■ **Czasy realizacji cykli transportowych**

Cykl transportowy w transporcie wewnętrznym może być prosty lub kombinowany. Cykl prosty oznacza wyłącznie jedną operację podjęcia jednostki, przemieszczanie jednostki, odstawienie jej i powrót tą samą trasą „na pusto”. Cykl kombinowany zakłada więcej niż jedną operację podjęcia i odstawienia jednostki oraz względnie krótszy czas pustych przebiegów. Każdy cykl transportowych będzie jednoznacznie opisany przez:

- miejsce(-a) podjęcia i miejsca(-a) odstawienia materiałów (cykl prosty/kombinowany),
- liczbę powtórzeń cyklu w jednostce czasu (natężenie strumienia materiałów),
- odległość pokonywaną,
- liczbę zakrętów i skrzyżowań występujących na drodze,
- operacje załadunkowo/wyładunkowe, adresowania, kontroli i inne operacje ręczne,
- typ transportowanej jednostki logistycznej.

Urządzenia o ciągłym charakterze pracy

Cykl transportowy w transporcie wewnętrznym może być realizowany przez urządzenia o ciągłym charakterze pracy (np. przenośniki) lub urządzenia o przerywanym charakterze pracy (np. wózki). W pierwszym przypadku czas cyklu transportowego obejmuje:

- czas przemieszczania jednostki materiału wynikający z prędkości liniowej, przy czym jednostka może być fizycznie wydzielona (np.: jłp) lub być jednostką miary (np.: kg, litr),
- czas przeznaczony na oczekiwanie na obsługę w kolejkach przed urządzeniami rozdzielająco-łączącymi (dla jednostek fizycznie wydzielonych),
- czas operacji załadunkowo/wyładunkowych, adresowania, kontroli i operacji ręcznych.

Obliczenie czasu cyklu urządzenia o ciągłym charakterze pracy sprowadza się do wyznaczenia powyższych składowych. Dokonuje się tego na podstawie znanego natężenia

strumieni materiałowych, czasów jednostkowych transportu, rozkładu losowego pojawiania się jednostek na elementach łącząco-rozdzielających i czasów dodatkowych operacji adresowania, kontroli i przeładunku. Dokładne metody wymiarowania takich układów podano w [27] punktach 4.2-4.4.

Urządzenia o przerywanym charakterze pracy

Jeżeli cykl transportowy w transporcie wewnętrznym jest realizowany przez urządzenie jezdniowe o przerywanym charakterze pracy, czas cyklu będzie obejmował:

- czas przemieszczania się środka transportu z ładunkiem i bez ładunku (powrót),
- czas potrzebny na pokonanie zakrętów i ew. opóźnienia spowodowane kongestią ruchu,
- czas operacji załadunkowo/wyładunkowych,
- czasy operacji ręcznych, adresowania i kontroli.

Ogólny wzór na czas cyklu t w transporcie wewnętrznym będzie miał postać:

$$t = mt_z + D_1 t_{vL} + D_2 t_{vE} + t_T + nt_w + t_a + t_k + t_{rs} \quad (10)$$

gdzie: m – liczba miejsc podjęcia ładunku;

t_z – czas trwania operacji podjęcia ładunku [min];

D_1 / D_2 – odległość pokonywana z ładunkiem / bez ładunku [m];

t_{vL} / t_{vE} – czas pokonania 1 m z ładunkiem / bez ładunku [min/m];

t_T – czas pokonania zakrętów oraz czas ewentualnej kongestii [min];

n – liczba miejsc odstawienia ładunku;

t_w – czas trwania operacji odstawienia ładunku [min];

t_a – czas trwania operacji adresowania [min];

t_k – czas trwania operacji kontroli [min];

t_{rs} – czas reakcji sieci radiowej dla obiektów logistycznych sterowanych przez nakazowe systemy informacyjne [min].

Powyższy wzór może zostać dostosowany dla większości przypadków transportu wewnętrznego i wykorzystywany do zwymiarowania czasu trwania jednego powtórzenia cyklu transportowego. Możliwe jest konstruowanie na jego podstawie wzorów na czas cyklu komisjonowania, cyklu pełnopaletowego w obszarze składowania, cyklu prostego, cyklu kombinowanego i innych, tak jak w [7], [25], [26], [27], [53], [54], [60], [75]. Pewne składniki wzoru mogą nie występować lub być pomijalne ze względów technologicznych.

Główne metody wyznaczania składowych czasu cyklu transportowego wykorzystują:

- normy MTM (jednostkowe czasy pracy ludzi i urządzeń);
- parametry techniczne urządzeń transportowych i teleinformacyjnych wg specyfikacji,
- pomiar empiryczny czasu trwania czynności.

MTM (ang. *Methods-time Measurement*) jest zbiorem procedur mających na celu wypracowanie metod pomiaru i ustanowienie standardów czasu realizacji zadań poprzez rozpoznanie, sklasyfikowanie i opisanie ruchów wykonywanych przy realizacji tych zadań. Do ruchów tych przypisuje się czasy jednostkowe realizacji. Istota tego systemu polega na rozłożeniu poszczególnych przebiegów pracy na mniejsze jednostki ruchu. W procedurze MTM-1 wyróżniono i opisano 17 tzw. ruchów podstawowych, z których wykorzystywanych jest głównie 5. Pojedyncze ruchy są wartościowane na podstawie tabel z czasami normatywnymi [85].

Program SCHED oferuje wszystkie podstawowe wzorce cykli transportowych w transporcie wewnętrznym, a także elementy składowe tych cykli. Rolą użytkownika jest dobór urządzeń i podanie typu oraz parametrów cyklu transportowego, na podstawie których automatycznie dokonywane są wyliczenia.

■ Harmonogram procesu transportu wewnętrznego

Dla wyznaczenia wydajności obiektu logistycznego należy określić technologię oraz organizację pracy (rys. 2, etap III str. 30). Doboru technologii dokonano na etapie kształtowania. Organizacja pracy ustalana jest zaś w postaci **harmonogramu PTW**. Do każdego zadania w procesie (definicja „zadania” w punkcie 3.2) przypisuje się typ urządzenia i kategorię pracy ludzkiej oraz ustala czas, w którym może być wykonywane.

W punktach 3.2-3.5 rozprawy rozważono proces transportu wewnętrznego jako przedmiot harmonogramowania i wskazano cechy wyróżniające go spośród innych procesów poddawanych organizacji czasowej w formie harmonogramu. W dalszej części rozprawy (rozdział 4) przedstawiono algorytm i metodę optymalizacyjną budowy harmonogramu, a w rozdziale 5 metody rozwiązania problemu harmonogramowania PTW.

Głównym efektem zastosowania harmonogramu jest określenie tzw. *czasu dysponowanego brutto* t_{dbr}^i wykonywania danego i -tego zadania, tj. czasu w którym zadanie może być wykonywane i powinno zostać zakończone przed upływem tego czasu. Czas ten może być równy bądź mniejszy co do długości dobowemu czasowi pracy obiektu.

■ Pracochłonność procesu przekształcenia strumienia materiałów i informacji

Pracochłonność rzeczywista ze względu na pracę ludzi i urządzeń

Pracochłonność rzeczywista L realizacji zadania jest miarą określającą zaangażowanie środków pracy w realizację tego zadania. Obliczana jest bezpośrednio dla każdego typu urządzenia bądź dla każdej kategorii pracy ludzkiej i mówi, ile jednostek czasu należy

poświęcić, aby dane zadanie zostało wykonane. Jest to zasadnicza miara oceny wariantów projektowych układu logistycznego ze względu na wydajność ([27]).

W celu przybliżenia pojęcia pracochłonności zaproponowano przykład: niech zadanie polega na przemieszczeniu 100 opakowań na zadaną odległość. Pracownik jest w stanie przynieść 1 opakowanie w czasie 1 min, w związku z czym realizacja całego zadania jednemu pracownikowi zajmie 100 min \approx 1,66 h. Pracochłonność realizacji tego zadania wyniesie 1,66 roboczogodziny. Jeżeli zastosujemy urządzenie, które będzie realizowało to zadanie w czasie 20 s, wtedy będzie wymagało ono \approx 0,55 urządzeniogodziny. Do rozważenia pozostaje koszt pracy takiego urządzenia i koszt pracy pracownika.

Proces przepływu materiałów może być realizowany: ręcznie, w sposób zmechanizowany (urządzenia obsługiwane przez pracowników) i automatycznie, przez urządzenia. Zatem należy rozróżnić: pracochłonność procesu ze względu na pracę ludzi L^C oraz ze względu na pracę urządzeń L^U .

Praca obiektów logistycznych organizowana jest przeważnie w cyklu dobowym. Tak więc pracochłonność L^D danego zadania będzie odnosiła się do doby roboczej, której długość jest iloczynem liczby zmian roboczych i długości zmiany. W pewnych przypadkach rozważa się pracochłonność godzinową L^H (przy szczególnie intensywnych cyklach transportowych i szczególnie nierównomiernym natężeniu przepływu materiałów) lub pracochłonność tygodniową i miesięczną dla zadań wykonywanych sporadycznie lub zadań okołoprocessowych (np. inwentaryzacje).

Rzeczywista pracochłonność dobową L^{Du} realizacji procesu przepływu materiałów ze względu na pracę urządzeń u -tego typu obliczana jest ze wzoru:

$$L^{Du} = \sum_{i=1}^{I_U} \lambda_i^{Du} \cdot t_i^u \quad [\text{urządzeniogodzin/dobę}] \quad (11)$$

gdzie: $u = 1, 2, \dots, U$ – typy urządzeń, $u \in U$ (patrz str. 49),

$i = 1, 2, \dots, I_U$ – numer rodzaju zadania zmechanizowanego w procesie,

λ_i^{Du} – liczba powtórzeń i -tego zadania realizowanego w ciągu doby przez urządzenie u -tego typu [cykli/dobę];

t_i^u – czas trwania powtórzenia i -tego zadania (cyklu transportowego) realizowanego przez urządzenie u -tego typu [h];

Rzeczywista pracochłonność dobową L^{Dc} realizacji procesu przepływu materiałów ze względu na pracę pracowników c -tej kategorii pracy obliczana jest ze wzoru:

$$L^{Dc} = \sum_{i=1}^{I_C} \lambda_i^{Dc} \cdot t_i^c \quad [\text{roboczogodzin/dobę}] \quad (12)$$

gdzie: $c = 1, 2, \dots, C$ – kategorie pracy ludzkiej, $c \in C$ (patrz str. 49),

$i = 1, 2, \dots, I_C$ – numer rodzaju zadania ręcznego w procesie,

λ_i^{Dc} – liczba powtórzeń i -tego zadania ręcznego realizowanych w ciągu doby przez pracowników c -tej kategorii pracy [cykli/dobę];

t_i^c – czas trwania powtórzenia i -tego zadania ręcznego realizowanego przez pracowników c -tej kategorii pracy [h];

Występujące we wzorach oznaczenia zbiorów zdefiniowano w punkcie 4.1 (str. 90). Analogicznie wyznacza się pracochłonności rzeczywistą przekształceń strumieni informacji.

Pracochłonność sprowadzona

Dobowa pracochłonność rzeczywista L^D w przeważającej większości wypadków nie może zostać wykorzystana do oceny pracy obiektu logistycznego. Dzieje się tak gdyż urządzeniogodziny bądź roboczogodziny dwóch różnych typów urządzeń lub kategorii pracy ludzkiej nie są porównywalne ze względu na swój koszt. W przypadku urządzeń, o wysokim koszcie godziny pracy k^u , jego roboczogodzina będzie bardziej znacząca niż roboczogodzina urządzenia o niskim koszcie. Z tego względu jedną z głównych zasad harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego jest takie organizowanie pracy, aby urządzenia najdroższe wykorzystywane były w jak największym stopniu.

W celu umożliwienia oceny PTW poprzez jego pracochłonność należy wprowadzić syntetyczny miernik techniczno-ekonomiczny, tzw. *pracochłonność sprowadzoną procesu* L . Pracochłonność sprowadzoną wyznacza się przez wyważenie pracochłonności rzeczywistej kosztem pracy urządzenia lub pracownika. Taka wielkość może być dodawana bez względu na to jaki typ urządzenia, bądź który pracownik realizował zadanie. Ponadto może zostać zapisana w postaci histogramu natężenia pracochłonności sprowadzonej procesu (patrz punkt 3.3 oraz [9], [26], [27], [28], [45]). Histogram ten będzie podstawą rozważań w dalszej części rozprawy. Pracochłonność sprowadzana wyznaczana jest wg wzorów:

dla urządzeń:
$$L_U^D = \sum_{i \in I} \sum_{u \in U} L_i^{Du} \cdot \frac{k^u}{k^b} \text{ [u.h]} \quad (13)$$

dla pracy ludzkiej:
$$L_C^D = \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} L_i^{Dc} \cdot \frac{k^c}{k^b} \text{ [r.h]} \quad (14)$$

gdzie: $u = 1, 2, \dots, U$ – typy urządzeń, $u \in U$,

$c = 1, 2, \dots, C$ – kategorie pracy ludzkiej, $c \in C$,

$i = 1, 2, \dots, I$ – numer rodzaju zadania w procesie, $i \in I$,

L_U^D – dobową pracochłonność sprowadzoną procesu ze względu na pracę urządzeń,

- L_c^D – dobowa pracochłonność sprowadzona procesu ze względu na pracę ludzi,
 k^u – koszt godziny pracy urządzenia u -tego typu [zł/h],
 k^c – koszt godziny pracy pracownika c -tej kategorii pracy ludzkiej [zł/h],
 k^b – koszt bazowy godziny pracy [zł/h].

Koszt bazowy k^b wyznacza się jako najniższy spośród kosztów godzinowych pracy urządzeń i ludzi w systemie. Dla wygody obliczeń, można przyjąć dowolną dostępną wartość. Warianty projektowe należy porównywać przy tym samym koszcie bazowym.

■ Dobowa liczba ludzi i urządzeń

Liczba ludzi i urządzeń

Liczba ludzi i urządzeń wynika z pracochłonności rzeczywistej procesu oraz z długości czasu dysponowanego t_{dbr}^i , w którym i -te zadania mogą być wykonywane. Czas dysponowany odczytuje się z harmonogramu PTW. Czas ten pomniejszony przez wskaźniki wykorzystania czasu pracy ω_t będzie czasem dysponowanym netto, który posłuży do wyznaczenia liczby urządzeń oraz liczby pracowników [27]:

$$n_i^u = \left[\frac{L_i^{Du}}{t_{dbr}^{i/u} \cdot \omega_t^u} \right] = \left[\frac{\lambda_i^{Du} \cdot t_i^u}{t_{dbr}^{i/u} \cdot \omega_t^u} \right] \text{ przy czym } \omega_t^u = \omega_{tz}^u \cdot \omega_{gt}^u \cdot \omega_{zo}^u \quad (15)$$

oraz

$$n^u = \left[\frac{\sum_{i=1}^I \lambda_i^{Du} \cdot t_i^u}{t_{dbr}^{i/u} \cdot \omega_t^u} \right] \quad (16)$$

gdzie: n_i^u – liczba urządzeń u -tego typu realizujących i -te zadanie [szt./dobę],

n^u – liczba urządzeń u -tego typu [szt./dobę],

λ_i^{Du} – dobowy licznik powtórzeń i -tego zadania realizowanego przez urządzenie u -tego typu [cykli/dobę],

t_i^u – czas wykonania powtórzenia i -tego zadania (cyklu transportowego) przez urządzenie u -tego typu [h],

$t_{dbr}^{i/u}$ – czas dysponowany pracy urządzenia u -tego typu wykonującego i -te zadanie [h],

ω_{tz}^u – współczynnik wykorzystania czasu pracy urządzenia u -tego typu, $\omega_{tz}^u \in (0,1)$,

ω_{gt}^u – współczynnik gotowości technicznej urządzenia u -tego typu, $\omega_{gt}^u \in (0,1)$,

ω_{zo}^u – współczynnik zmiany obszaru pracy przez urządzenie u -tego typu, $\omega_{zo}^u \in (0,1)$.

Liczbę pracowników na zmianę roboczą oblicza się wg wzorów:

$$n_i^c = \left\lceil \frac{L_i^{Dc}}{t_{dbr}^{i/c} \cdot \omega_t^c} \right\rceil = \left\lceil \frac{\lambda_i^{Dc} \cdot t_i^c}{t_{dbr}^{i/c} \cdot \omega_{tz}^c \cdot \omega_{zo}^c} \right\rceil \quad (17)$$

oraz

$$n^c = \left\lceil \sum_{i=1}^I \frac{\lambda_i^{Dc} \cdot t_i^c}{t_{dbr}^{i/c} \cdot \omega_{tz}^c \cdot \omega_{zo}^c} \right\rceil \quad (18)$$

gdzie: n_i^c – liczba pracowników c -tej kategorii pracy realizujących i -te zadanie [os./zmianę],

n^c – liczba pracowników c -tej kategorii pracy [os./zmianę],

λ_i^{Dc} – dobowa liczba powtórzeń i -tego zadania realizowanego przez pracownika c -tej kategorii pracy [cykli/dobę],

t_i^c – czas wykonania powtórzenia i -tego zadania przez pracownika c -tej kat. pracy [h],

$t_{dbr}^{c/i}$ – czas dysponowany pracownika c -tej kat. pracy wykonującego i -te zadanie [h],

ω_{tz}^c – wsp. wykorzystania czasu pracy przez pracownika c -tej kat. pracy, $\omega_{tz}^c \in (0,1)$,

ω_{zo}^c – wsp. zmiany obszaru pracy przez pracownika c -tej kategorii pracy, $\omega_{zo}^c \in (0,1)$.

W przypadku wyznaczania liczby pracowników będących operatorami urządzeń można przyjąć, że liczba pracowników na zmianę roboczą będzie równa liczbie urządzeń. Przy dwuzmianowym systemie pracy na każde urządzenie potrzebnych jest dwóch pracowników.

Zasoby pracy (zestawy)

Każde zadanie wchodzące w skład procesu transportu wewnętrznego będzie wykonywane przez pewien typ zasobu pracy. Poprzez *zasób pracy* rozumiany jest układ pracownik-urządzenie w następujących konfiguracjach: pracownik realizuje zadanie *ręcznie*, pracownik realizuje zadanie z wykorzystaniem urządzenia, tj. *mechanicznie* lub urządzenie realizuje zadanie *automatycznie*. Najczęstszym przypadkiem w transporcie wewnętrznym jest realizacja mechaniczna.

Każdy zestaw opisany jest współczynnikiem wykorzystania czasu pracy ω . Dla pracy ręcznej współczynnik oznacza się jako ω_t^c , przy pracy automatycznej ω_t^u . Przy pracy mechanicznej jako współczynnik wykorzystania czasu pracy przyjmuje się wartość mniejszą spośród pary współczynników.

Program SCHED umożliwia automatyczne wyznaczanie liczby urządzeń i pracowników oraz liczby zasobów danego typu wg powyższych wzorów.

■ Nakłady inwestycyjne oraz roczne koszty eksploatacyjne i operacyjne

Koszty są najważniejszym miernikiem oceny jakości rozwiązań logistycznych. Sposoby szacowania kosztów eksploatacyjnych i operacyjnych są szeroko omawiane w literaturze ([1],

[19], [28], [55], [67], [72], [73]). Na potrzeby rozprawy przystosowano metodologię przedstawioną w [27], ze względu na możliwość jej aplikacji do rozpatrywanego problemu harmonogramowania procesu.

Nakłady inwestycyjne

Nakłady E na transport wewnętrzny oraz infrastrukturę w przypadku obiektów logistycznych można wyrazić wzorem:

$$E = E_B + E_P + E_T + E_S \quad (19)$$

gdzie: E_B – nakłady na infrastrukturę, tj. budynki, place itp. [zł],

E_P – nakłady na wyposażenie pomocnicze (regały, doki ładunkowe itp.) [zł],

E_T – nakłady na środki transportowe i urządzenia mechaniczne [zł],

E_S – nakłady na środki sterowania [zł],

Koszty eksploatacyjne

Roczne koszty eksploatacyjne wyrażone są wzorem:

$$K_E^R = K_{LC}^R + K_{LU}^R \quad (20)$$

gdzie: K_{LC}^R – roczne koszty pracy ludzkiej [zł/rok],

K_{LU}^R – roczne koszty utrzymania urządzeń i infrastruktury [zł/rok].

Roczne koszty utrzymania urządzeń i infrastruktury wyznacza się ze wzoru:

$$K_{LU}^R = K_B^R + K_P^R + K_T^R + K_S^R \quad [\text{zł/rok}] \quad (21)$$

gdzie: K_B^R – roczne koszty utrzymania elementów stałych, $K_B^R = E_B \cdot \kappa_B$ [zł/rok],

K_P^R – roczne koszty utrzymania wyposaż. niemechanicznego, $K_P^R = E_P \cdot \kappa_P$ [zł/rok],

K_S^R – roczne koszty utrzymania urządzeń sterowania, $K_S^R = E_S \cdot \kappa_S$ [zł/rok],

K_T^R – roczne koszty utrzymania środków transportowych i urządzeń [zł/rok].

przy czym: $\kappa_B, \kappa_P, \kappa_S$ są odpowiednimi współczynnikami amortyzacji.

Roczne koszty utrzymania środków transportowych i urządzeń wyznaczane są ze wzoru:

$$K_T^R = \sum_{u=1}^U K_T^{Ru} \quad [\text{zł/rok}] \quad (22)$$

gdzie: K_T^{Ru} – roczne koszty utrzymania środka transportowego u -tego typu [zł/rok].

Roczne koszty utrzymania u -tego środka transportowego wyznaczane są ze wzoru:

$$K_T^{Ru} = b_u + f_u + d_u \quad [\text{zł/rok}] \quad (23)$$

w którym:

- koszty zależne od czasu b_u oblicza się jako sumę rocznych odpisów amortyzacyjnych b_{u1} oraz oprocentowania kapitału b_{u2} :

$$b_u = b_{u1} + b_{u2} = E_u \cdot (\alpha_{u1} + \alpha_{u2}) \text{ [zł/rok]} \quad (24)$$

przy czym: E_u – nakłady netto na urządzenie u -tego typu [zł],

α_{u1} – wskaźnik odpisów amortyzacyjnych dla urządzenia u -tego typu,

α_{u2} – wskaźnik oprocentowania kapitału dla urządzenia u -tego typu,

b) koszty zależne od wydajności f_u oblicza się ze wzoru:

$$f_u = E_u \cdot \kappa_{Tu} \text{ [zł/rok]} \quad (25)$$

przy czym: κ_{Tu} – wskaźnik kosztów przeglądów i napraw u -tego typu urządzenia.

c) d_u jest kosztem energii elektrycznej lub paliwa dla urządzeń u -tego typu zależnym od liczby przepracowanych godzin.

Roczne koszty robocizny w obiekcie logistycznym wyznacza się ze wzoru:

$$K_{LC}^R = \sum_{c=1}^C K^{Rc} \text{ [zł/rok]} \quad (26)$$

przy czym: $K^{Rc} = k^c \cdot (1 + \kappa_k) \cdot g^c \cdot n^c \text{ [zł/rok]}, \quad (27)$

gdzie: k^c – stawka godzinowa pracownika c -tej kategorii pracy [zł/h],

κ_k – wskaźnik kosztów zakładowych, tj. kosztów zapewnienia pracownikowi odpowiednich warunków pracy,

g^c – nominalna liczba godzin pracy pracownika c -tej kategorii pracy w roku [h],

n^c – liczba pracowników c -tej kategorii pracy [os.].

Koszty operacyjne

Roczne koszty eksploatacyjne opisane wzorem (20) obejmują:

- *koszty utrzymania*, w tym: koszty utrzymania infrastruktury i urządzeń niemechanicznych, zamrożenia kapitału, amortyzacji urządzeń, działki i budynków, serwisu i przeglądów.
- *koszty operacyjne*, tj. zależne od wydajności, w tym koszty pracy ludzkiej i pracy urządzeń związane z przekształcaniem strumieni materiałów i informacji. Są to koszty generowane przez tzw. dynamiczną część PTW (definicja w punkcie 3.1). Przykładowe koszty tego typu to koszt energii elektrycznej i paliwa lub koszt godziny pracy operatora urządzenia.

Roczne koszty utrzymania zależne są od czasu i nakładów. Są to koszty o stosunkowo małej dynamice zmian, niezależne wprost od natężenia strumieni materiałów. Zaś roczne koszty operacyjne K^{Ro} są funkcją natężenia strumieni materiałów i składają się z kosztów pracy urządzeń K_{LU}^{Ro} i kosztów pracy ludzi K_{LC}^{Ro} :

$$K^{Ro} = K_{LU}^{Ro} + K_{LC}^{Ro} \text{ [zł/rok]}, \quad (28)$$

Koszty operacyjne pracy urzędzeń określa się na podstawie wzoru:

$$K_{LU}^{Ro} = d_r \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{u=1}^U \lambda_i^{Du} \cdot t_i^u \cdot k^u \quad [\text{zł/rok}], \quad (29)$$

gdzie: λ_i^{Du} – dobową liczbę powtórzeń cyklu zadania i -tego wykonywanego przez urządzenie u -tego typu [cykli/dobę],

t_i^u – czas wykonania cyklu tr. i -tego zadania przez urządzenie u -tego typu [h/cykl],

d_r – liczba dni roboczych w roku [dni/rok],

k^u – koszt godziny pracy urzędzeń u -tego typu [zł/h].

Roczne koszty operacyjne pracy ludzi określa się na podstawie wzoru:

$$K_{LC}^{Ro} = d_r \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{c=1}^C \lambda_i^{Dc} \cdot t_i^c \cdot k^c \quad [\text{zł/rok}], \quad (30)$$

gdzie: λ_i^{Dc} – dobową liczbę powtórzeń cyklu zadania i -tego wykonywanego przez pracownika c -tej kategorii pracy [cykli/dobę],

t_i^c – czas wykonania powtórzenia cyklu i -tego zadania przez pracownika c -tej kategorii pracy [h/cykl],

d_r – liczba dni roboczych w roku [dni/rok],

k^c – koszt godziny pracy pracownika c -tej kategorii pracy [zł/h],

Program SCHED oferuje możliwość liczenia kosztów operacyjnych i nakładów na transport wewnętrzny wg powyższych wzorów.

2.5. Ocena rozwiązań projektowych

Zagadnienie projektowania obiektów logistycznych związane jest z opracowywaniem wariantów projektowych. *J. Fijałkowski* [27] wyróżnia 23 różne kryteria oceny takich układów. Taka liczba potencjalnych parametrów oceny wymaga wykorzystania metod oceny cząstkowej, kompleksowej bądź wielokryterialnej ([7], [46], [47], [81]).

Ocena cząstkowa [27] zakłada porównywanie wariantów projektowych ze względu na parametry i mierniki jednorodne, czyli mające te same miana. Wynikiem takiej oceny jest zbiór list preferowanych kolejności wariantów projektowych, ze względu na wybrane kryteria. Przy ocenie cząstkowej nie uwzględnia się hierarchii celów. Ocena kompleksowa [27] uwzględnia hierarchię celów, na którą składają się parametry i mierniki mierzalne i trudnomierzalne. Wybór kryteriów oceny danego zbioru wariantów projektowych zależy od dostępności danych i wymagań inwestora. Przyjmuje się zasadę, że należy stosować kryteria, których wartości mogą zostać wyznaczone dla wszystkich wariantów.

W celu dokonania oceny należy obliczyć wartości mierników i parametrów technologicznych oraz ekonomicznych obiektu logistycznego., które będą kryteriami oceny wariantu. Poniżej przedstawiono zestaw wybranych z literatury ([7], [11], [26], [27], [28], [45]) parametrów rozwiązań projektowych i mierników oceny jakości rozwiązania:

Parametry techniczne rozwiązania projektowego

- Dobowa pracochłonności sprowadzona procesu przepływu materiałów i informacji ze względu na pracę urządzeń: L_U^D [urządzenie-godzin] i ludzi L_C^D [roboczo-godzin].
Jest kluczowym parametrem oceny jakości projektu oraz harmonogramu PTW. Jest ona podstawą budowy wybranych funkcji celu zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW przedstawionego w punkcie 4.3.
- Liczba urządzeń transportu wewnętrznego: n^u [szt./dobę].
- Liczba pracowników na zmianę: n^c [os./zmianę].
- Dobowy wysiłek fizyczny pracowników F^D [punktów/dobę]. Określany na podstawie katalogów przypisujących pracom ręcznym punkty odpowiadające wysiłkowi fizycznemu.

Parametry ekonomiczne rozwiązania projektowego

- Nakłady na transport wewnętrzny oraz infrastrukturę E [zł].
- Roczne koszty eksploatacyjne K_E^R [zł/rok].
- Roczne koszty robocizny K_{LC}^R [zł/rok].
- Roczne koszty pracy urządzeń K_{LU}^R [zł/rok].

Mierniki rozwiązania projektowego

- Pojemności Z_p obszarów funkcjonalnych obiektu logistycznego [jednostek].
- Miernik kubaturowy β_M – określa stopień wykorzystania przestrzeni obudowanej V_M , którą trzeba utrzymywać (ogrzewać, chronić, oświetlać) przy zapasie Z_p ;

$$\beta_M = V_M : Z_p \text{ [m}^3\text{/jednostkę].} \tag{31}$$

- Miernik powierzchniowy α_M – określa stopień wykorzystania powierzchni składowania F_M przy zapasie Z_p , szczególnie przydatny w sytuacji ograniczonych zasobów terenowych;

$$\alpha_M = F_M : Z_p \text{ [m}^2\text{/jednostkę].} \tag{32}$$

- Nakłady na jedno miejsce paletowe θ_{Nmp} [zł/mp] – wynikające z nakładów na zastosowane technologie obsługi ładunku, konstrukcję regałów i cenę gruntu oraz pojemności strefy Z_p ;

$$\theta_{Nmp} = \frac{E}{Z_p} \tag{33}$$

- Koszt przejścia średniej jednostki materiału przez obiekt logistyczny θ_{kp} [zł/jednostkę] przy rocznych kosztach eksploatacyjnych K_E^R oraz przeładunku rocznym na wejściu Λ_{WE}^R :

$$\theta_{kp} = \frac{K_E^R}{\Lambda_{WE}^R} \quad (34)$$

Jeden z najważniejszych, uniwersalnych mierników oceny rozwiązań projektowych. Określa jednocześnie skalę realizowanego zadania logistycznego (Λ_{WE}^R) oraz efektywność ekonomiczną (K_E^R). Porównywanie tego wskaźnika dla różnych obiektów logistycznych obsługujących jednakowe jednostki logistyczne i zbliżone wielkości przepływu materiałów wskazuje, czy użyte technologie są efektywne.

- Stopień mechanizacji i automatyzacji procesów przepływu ładunków i informacji θ_k :

$$\theta_k = \frac{K_{LC}^R}{K_E^R - K_B^R} \quad (35)$$

- Wskaźnik organizacyjny θ_{oz} mówiący o jakości organizacji pracy w obiekcie logistycznym poprzez ocenę stopnia wykorzystania zainstalowanych urządzeń:

$$\theta_{oz} = \frac{K^{Ro}}{K_{E_{upr}}^R} \quad (36)$$

gdzie: K^{Ro} – roczne koszty operacyjne określone na podstawie wzoru (28) [zł/rok],

$K_{E_{upr}}^R$ – roczne koszty eksploatacyjne uproszczone [zł/rok],

Roczne koszty eksploatacyjne uproszczone składają się wyłącznie z rocznych kosztów utrzymania środków transportowych i środków sterowania oraz rocznych kosztów robocizny. Nie zawierają one składowych związanych z utrzymaniem infrastruktury (por. wzór (20)). Koszty te wyrażane są zależnością:

$$K_{E_{upr}}^R = K_T^R + K_S^R + K_{LC}^R \quad [\text{zł/rok}] \quad (37)$$

gdzie: oznaczenia w tekście.

Wskaźnik organizacyjny odgrywa znaczną rolę na etapie harmonogramowania PTW. Najlepsza możliwa wartość tego wskaźnika, tj. 1, oznacza, że wszystkie urządzenia wykorzystywane są w 100% w ciągu doby roboczej.

- Wskaźnik równomierności wykorzystania p -tego zasobu pracy θ_{oz}^p , u -tego typu urządzenia θ_{oz}^u lub c -tej kategorii pracy ludzkiej θ_{oz}^c :

$$\theta_{oz}^p = \frac{L^{Dp}}{l \cdot l_z \cdot \max_{h \in T} \{L^{hp}\}} \quad (38)$$

- gdzie: L^{Dp} – dobowa pracochłonność rzeczywista dla p -tego zasobu pracy [r.h],
 L^{hp} – chwilowa pracochłonność rzeczywista dla p -tego zasobu pracy odczytana z wykresu pracochłonności rzeczywistej procesu [r.h/h],
 T – zbiór numerów odcinków czasu (ziarnistość harmonogramu PTW),
 $l \cdot l_z$ – iloczyn liczby i długości zmiany roboczych na dobę [h],

Wskaźnik ten liczony jest oddzielnie dla każdego zasobu pracy lub typu urządzenia czy kategorii pracy ludzkiej. W takich przypadkach należy zastąpić indeks p odpowiednim indeksem u lub c . Wartość wskaźnika równa 1 oznacza, że zasoby są wykorzystywane równomiernie w całym czasie dysponowanym pracy.

- Wskaźnik równomierności wykorzystania wszystkich środków pracy θ_{oz}^{zas} :

$$\theta_{oz}^{zas} = \sum_{p \in P} \frac{L^{Dp} \cdot k^p}{\sum_{z \in P} k^z \cdot l \cdot l_z \cdot \max_{h \in T} \{L^{hp}\}} \quad (39)$$

- gdzie: k^p, k^z – koszt godziny pracy zasobu p -tego lub z -tego typu należącego do zbioru P typów zasobów pracy [zł/h], $p, z \in P$,

pozostałe oznaczenia jak we wzorze (38).

Wskaźnik ten jest pochodną wskaźnika organizacyjnego θ_{oz} , jednakże dawać będzie inne wyniki, gdyż ocenia organizację PTW ze względu na równomierność zaangażowania wszystkich środków pracy w ciągu doby roboczej. W celu zwiększenia rangi środków najdroższych, wartość wskaźników cząstkowych θ_{oz}^p wyważa się kosztem godziny ich pracy. Przykłady porównujące wartość obu wskaźników podano w dalszej części rozprawy. Wskaźnik ten opracowany został przez autora rozprawy w celu sformułowania funkcji kryterium oceny harmonogramu PTW i w ten sposób został opisany m.in. w punktach 3.3 oraz 4.3.

- Dynamiczny miernik nakładów – ocenia projekt obiektu ze względu na koszty kompleksowego rozwiązania techniczno organizacyjnego:

$$\theta_{Nd} = \frac{E}{\Lambda_{WE}^R} \text{ [zł/jedn.]} \quad (40)$$

- gdzie: Λ_{WE}^R – przeładunek roczny na wejściu [jednostek/rok].

- Maksymalna godzinowa wydajność obszarów funkcjonalnych λ_{\max}^H wyrażana liczbą operacji (cykli), które w danym obszarze można wykonać w sprzyjających warunkach w jednostce czasu.
- Stopień uniwersalności urządzeń transportu wewnętrznego s_M przyjmujący wartości z przedziału $\langle 0,1 \rangle$. Wskaźnik przyjmuje wartość 1, kiedy urządzenia są w pełni uniwersalne ze względu na możliwość ich wykorzystania we wszystkich obszarach funkcjonalnych obiektu logistycznego.

Czynniki trudnomierzalne rozwiązania projektowego

- Niezawodność funkcjonalna NF , w głównej mierze wynika z wykorzystania wyposażenia standardowego i uniwersalnego z szerokim i szybkim dostępem do serwisu. Na niezawodność układu logistycznego ma wpływ możliwość podziału tego układu na niezależne podukłady, które mogą funkcjonować nawet w przypadku awarii podukładów sąsiadujących. Istotnym elementem jest redundancja.
- Zdolność adaptacji układu do zmian ZA , wyrażana jako możliwość realizacji zadań szczytowych, możliwości zmiany strategii pracy, możliwości długotrwałego użytkowania z maksymalną wydajnością, możliwość zmiany obszaru pracy.
- Możliwość rozbudowy MR , rozumiana jako możliwość powiększenia powierzchni stref układu logistycznego lub jako możliwość zwiększenia wydajności pracy.

Wymienione czynniki trudnomierzalne mogą zostać opisane wartościami liczbowymi przy zastosowaniu ilościowych metod określania jakości ([51]).

Ocena wielokryterialna

Wykorzystanie metod wielokryterialnej oceny ułatwia podejmowanie decyzji w problemach o dużej liczbie potencjalnych ścieżek decyzyjnych. Takim problemem jest projektowanie obiektów logistycznych. Łatwość aplikacji metod wielokryterialnych umożliwi opracowanie narzędzi wspomagających ocenę wariantów projektowych.

Opracowania *M. Jacyny* z zakresu oceny wielokryterialnej i modelowania wielokryterialnego zawarte m.in. w pracach [47] i [46] dają podstawy do wykorzystania tej metody do oceny wariantów projektowych obiektów logistycznych. Metoda oceny MAJA została wykorzystana przez autora rozprawy do oceny rozwiązań z zakresu projektowania obszarów składowania magazynów dystrybucyjnych w pracy [7]. Metodologia ta może zostać przystosowana do oceny kompleksowej rozwiązań układów logistycznych z zastosowaniem w/w kryteriów.

3. HARMONOGRAMOWANIE PROCESU TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO

3.1. Proces transportu wewnętrznego

Procesy logistyczne realizowane przez obiekty logistyczne składają się z procesów przepływu materiałów i informacji. Wykonywane są przez ludzi i urządzenia, począwszy od rozładunku i przeładunku środków transportu zewnętrznego, poprzez przyjęcie, wprowadzanie, składowanie, komisjonowanie, pakowanie i wydanie, aż do załadunku do środków transportu zewnętrznego na wyjściu. Kształt procesu zależy od wykorzystanych technologii oraz rozwiązań organizacyjnych. Procesy logistyczne obejmują także składowanie materiałów. Można jednak uznać, że składowanie nie obciąża dodatkową pracochłonnością urządzeń i dróg transportu wewnętrznego, gdyż oznacza jedynie zapewnianie przez wymagany czas odpowiednich warunków przechowalniczych. Miejsca składowania są traktowane jako źródła oraz ujścia strumieni materiałów w obiekcie logistycznym. W świetle takiej obserwacji wydaje się konieczne wyróżnienie pojęcia *procesu transportu wewnętrznego*, który będzie obejmował wyłącznie najbardziej kosztotwórczą część procesu logistycznego, którą jest przemieszczanie materiałów w przestrzeni obiektu ([9] [8]).

Proces transportu wewnętrznego (PTW) zdefiniowano jako układ zadań związanych z *przemieszczaniem* i/lub *zmianą postaci fizycznej*⁴ jednostek materiału za pomocą odpowiedniego sprzętu i pracowników, zorganizowany i sterowany przez specjalistyczne narzędzia informacyjne. PTW jest składową integralną procesu logistycznego realizowanego w obiekcie logistycznym.

Proces logistyczny zawiera w sobie wszystkie aktywności wynikające z definicji, zaś PTW obejmuje tylko transport jednostek pomiędzy obszarami funkcjonalnymi obiektu oraz wewnątrz nich, a także *buforowanie* tych przepływów. Elementy składowania długo i krótkookresowego, w przypadku PTW nie są rozważane [8].

⁴ Zmiana wybranych cech oznacza prostą produkcję i montaż materiałów, etykietowanie, kompletowanie, konfekcjonowanie, przepakowywanie itp. Są to operacje generujące koszty poprzez bezpośrednie angażowanie ludzi i urządzeń przy jednoczesnym braku przemieszczania materiałów.

W procesie logistycznym realizowanym w obiekcie logistycznym wyróżniono dwa rodzaje składowych:

- transport i jego składniki pomiędzy obszarami funkcjonalnymi obiektu oraz wewnątrz nich, które dalej będą nazywane *składowymi dynamicznymi procesu*,
- elementy składowania długo i krótkookresowego, buforowania i oczekiwania wraz z przetwarzaniem, zmianą postaci materiałów i komisjonowaniem, które dalej będą występowały jako *składowe statyczne procesu logistycznego*. Przykłady wymienionych elementów przedstawiono na rys. 11.

Składowe statyczne będą miały wpływ na fizyczne rozmiary obiektu, a w konsekwencji na długość dróg transportowych. Koszty generowane przez te składowe obejmują koszty zamrożenia kapitału w postaci towarów przechowywanych, kosztów utrzymania przestrzeni, i amortyzację działki budowlanej i budynku. Składowe statyczne nie są uwzględniane w organizacji czasowej pracy obiektu. Traktowane są raczej w kategoriach miejsc powstawania i zanikania potoków ruchu dla transportu wewnętrznego, a co za tym idzie determinują parametry cykli transportowych. Są także odpowiedzialne za zdolności buforowania spiętrzeń w przepływach materiałów.

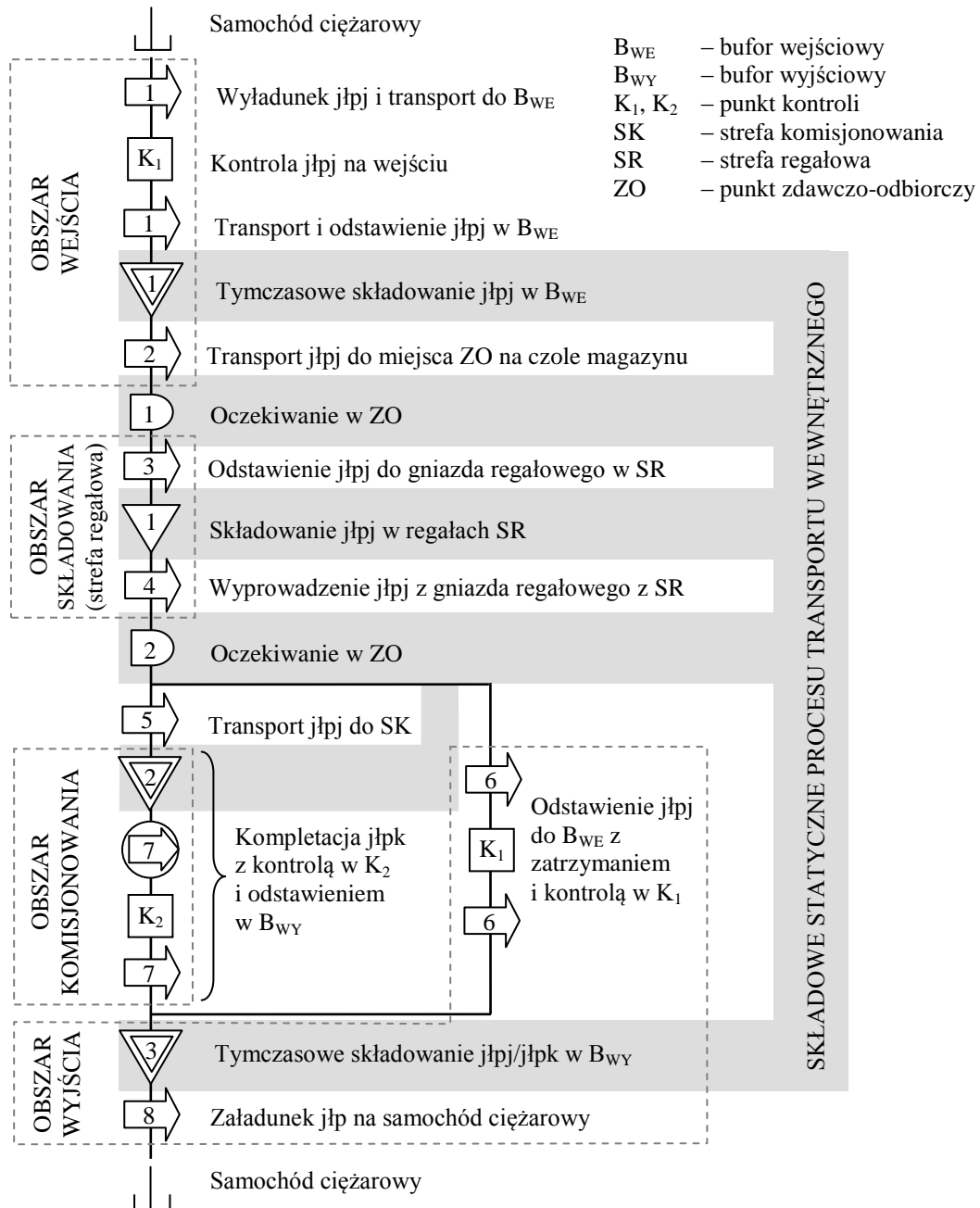
Składowe dynamiczne procesu logistycznego, czyli przemieszczanie i transport, generują większość kosztów operacyjnych obiektu. Odpowiednia organizacja pracy w tym zakresie decyduje o jakości i efektywności procesu oraz o ponoszonych kosztach. Składowe te będą poddawane organizacji – harmonogramowaniu, w celu jak najlepszego wykorzystania urządzeń i minimalizacji kosztów.

Na rys. 11 przedstawiono przykładowy proces transportu wewnętrznego. Zaciemnione zostały te elementy procesu, które nie podlegają harmonogramowaniu (statyczne). W przykładzie: kontrola K_1 i K_2 odbywają się w trakcie operacji transportowej, tj. bez wyładunku jednostki ze środka transportowego, zaś komisjonowanie zamówień (cykl 7) bazuje na przemieszczaniu komisjonującego w strefie (zasada „człowiek do materiału”), dlatego jest składową dynamiczną.

Proces logistyczny realizowany przez obiekt logistyczny może być rozważany dwojako:

- Jako przedmiot *organizacji i zarządzania*; w tym przypadku znaczenie mają sterowanie realizacją procesu, kontrola, przepływ dokumentacji, procedury bezpieczeństwa, przydział obowiązków, zakresy odpowiedzialności osób i działów, kompetencje decyzyjne itd.
- Jako przedmiot *projektowania/analizy*; w tym przypadku znaczenie mają aspekty inżynieryjne, technologiczne, czasowe i przestrzenne wykonywanych operacji,

pracochłonność, wydajność i niezawodność. W tym obszarze ważne jest harmonogramowanie PTW.



Rys. 11. Przykładowa karta procesu transportu wewnętrznego z wyróżnionymi elementami statycznymi

Źródło: opracowanie własne.

Typowy proces logistyczny rozważany wg drugiego podejścia będzie składał się z elementów przedstawionych w tabeli 6. Zadania opisane w tabeli mogą pojawiać się w procesach logistycznych w różnych konfiguracjach. Proces przepływu informacji w powyższym zestawieniu jest zaznaczony wyrywkowo, niemniej musi zostać uwzględniony jako wymagający czasu i generujący pewną pracochłonność. Projekt funkcjonalno-organizacyjny przepływu informacji powinien być zrealizowany równoległe z projektem

procesu przepływu materiałów tak, aby przekształcenia informacji mogły zostać doliczone jako składowe czasów cykli transportowych i uwzględnione w obliczeniach.

Tabela 6. Składowe typowego procesu realizowanego w obiekcie logistycznym

Obszar funkcjonalny	Typy operacji logistycznych
Wejście do obiektu logistycznego	<ul style="list-style-type: none"> - Wyładunek jednostek ładunkowych ze środków transportu zewnętrznego - Operacje identyfikacji, kontroli jakościowej i ilościowej, adresowania, potwierdzania i raportowania. - Sortowanie, dekonsolidacja. - Tworzenie jednostek magazynowych (przeformowywanie, pakowanie, zabezpieczanie, etykietowanie). - Zarządzanie opakowaniami zwrotnymi. - Przygotowanie miejsca w buforach wejściowych i obszarach składowania
Buforowanie na wejściu	<ul style="list-style-type: none"> - Tymczasowe składowanie (oczekiwanie na obsługę, zatrzymanie w buforze ze względów technologicznych, np.: kontroli jakościowej). - Etykietowanie. - Sortowanie.
Wprowadzenie do obszarów składowania	<ul style="list-style-type: none"> - Bezpośrednie wprowadzenie do obszaru składowania. - Wprowadzenie do obszaru składowania z oczekiwaniem w miejscu ZO*. - Bezpośrednie wprowadzenie do strefy komisjonowania bądź przetwarzania. - Wprowadzenie do stref komisjonowania bądź przetwarzania z oczekiwaniem w miejscu ZO*. - Operacje kontroli wprowadzenia, zarządzanie miejscami składowania.
Składowanie rezerwowe	<ul style="list-style-type: none"> - Składowanie długotrwałe. - Blokowanie wybranych asortymentów (np. rozliczenia celne, FIFO). - Okresowe zmiany lokalizacji jednostek wynikające z inwentaryzacji lub konsolidacji zapasów. - Zarządzanie miejscami składowania.
Wyprowadzenie ze strefy składowania rezerwowego	<ul style="list-style-type: none"> - Bezpośrednie wyprowadzenie do strefy wyjściowej obiektu. - Wyprowadzenie do strefy wyjściowej z oczekiwaniem w miejscu ZO* - Wyprowadzenie do strefy komisjonowania bądź przetwarzania bezpośrednio lub pośrednio z oczekiwaniem w ZO* - Operacje kontroli wyprowadzenia, zarządzanie miejscami składowania
Przetwarzanie	<ul style="list-style-type: none"> - Rozformowywanie jednostek magazynowych. - Zarządzanie opakowaniami zwrotnymi. - Proces zmiany postaci fizycznej materiałów (np. co-packing, konfekcjonowanie, etykietowanie, serwisowanie itd.) o cechach prostego procesu produkcyjnego. - Formowanie nowych jednostek magazynowych lub wysyłkowych (pakowanie, zabezpieczanie, etykietowanie). - Operacje rejestrowania, kontroli przetwarzania i adresowania.
Komisjonowanie	<ul style="list-style-type: none"> - Rozformowywanie jednostek magazynowych. - Zarządzanie opakowaniami zwrotnymi. - Uzupełnianie miejsc oferowania w strefie komisjonowania. - Proces komisjonowania zamówień klientów w oddzielnej strefie lub w wydzielonej części strefy składowania rezerwowego. - Formowanie nowych jednostek magazynowych lub wysyłkowych (pakowanie, zabezpieczanie, etykietowanie). - Operacje rejestrowania, kontroli komisjonowania i adresowania.

Obszar funkcjonalny	Typy operacji logistycznych
Wyprowadzenie ze stref przetwarzania i komisjonowania	<ul style="list-style-type: none"> - Bezpośrednie wyprowadzenie do strefy wyjściowej obiektu. - Wyprowadzenie do strefy wyjściowej z oczekiwaniem w miejscu ZO*. - Wyprowadzenie do strefy składowania rezerwowego bezpośrednio lub pośrednio z oczekiwaniem w ZO*. - Przygotowanie miejsca w buforach wyjściowych i obszarach składowania. - Operacje kontroli wyprowadzenia i raportowania.
Buforowanie na wyjściu	<ul style="list-style-type: none"> - Tymczasowe składowanie (także zatrzymanie w buforze ze względów technologicznych, np.: kontroli jakościowej, rozliczeń celnych, oczekiwania na pozostałą część wysyłki). - Etykietowanie. - Sortowanie i konsolidacja zamówień.
Wyjście z obiektu	<ul style="list-style-type: none"> - Tworzenie jednostek wysyłkowych (przeformowywanie, pakowanie, zabezpieczanie, etykietowanie). - Zarządzanie opakowaniami zwrotnymi. - Załadunek jednostek ładunkowych do środków transportu zewnętrznego. - Operacje identyfikacji, kontroli jakościowej i ilościowej, adresowania, potwierdzania i raportowania.
<i>Cross-docking</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Wylądunek jednostek ładunkowych ze środków transportu zewnętrznego. - Sortowanie, dekonsolidacja, przepakowanie. - Zarządzanie opakowaniami zwrotnymi. - Tymczasowe składowanie w specjalnie przeznaczonych do tego miejscach (także zatrzymanie ze względów technologicznych, np.: kontroli jakościowej, oczekiwania na pozostałą część wysyłki). - Konsolidacja wysyłek. - Załadunek jednostek ładunkowych do środków transportu zewnętrznego. - Operacje identyfikacji, kontroli jakościowej i ilościowej, adresowania, potwierdzania i raportowania.

(* na styku obszarów operowania urządzeń transportu wewnętrznego)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [11], [12], [21], [23], [26], [27], [34], [45], [54], [60].

3.2. Proces transportu wewnętrznego jako przedmiot harmonogramowania

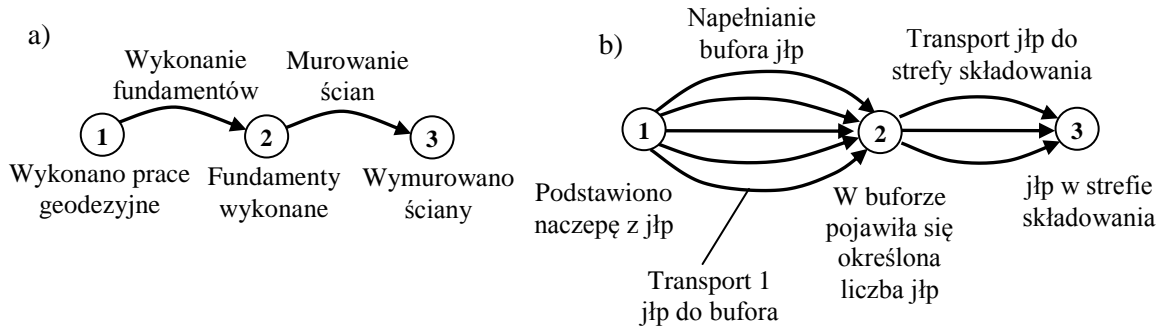
■ Specyfika zadań procesu transportu wewnętrznego

Operacje technologiczne i przemieszczania mogą być rozpatrywane dwojako [9]:

- Operacja (zadanie) ma *charakter jednorazowy* – niecykliczny. Istotne są moment rozpoczęcia i zakończenia wykonywania tego zadania. Wykonanie zadania w całości jest warunkiem rozpoczęcia kolejnego zadania (przykład – rys. 12a).
- Operacja (zadanie) składa się z czynności mających *charakter powtarzalny* – cykliczny, istotna jest liczba powtórzeń czynności i czas trwania jednego powtórzenia. Wykonywanie kolejnego zadania w procesie może rozpocząć się po wykonaniu określonej liczby powtórzeń czynności w zadaniu poprzedzającym (przykład – rys. 12b).

Operacje w transporcie wewnętrznym wykazują cechy drugiej grupy, tj. składają się z pewnej liczby powtórzeń jednej, przeważnie krótkiej czynności – cyklu transportowego. Cykl ten jest na tyle krótki względem dobowego czasu pracy obiektu, że możliwe jest

wykonywanie dużej liczby powtórzeń. Z tego powodu możliwe jest przesunięcie akcentu z konieczności przydzielania konkretnego egzemplarza urządzenia do konkretnej operacji (pojedynczego cyklu) na przydzielanie grupy urządzeń danego typu do czynności wielokrotnej – zadania. Oznacza to, że nie przydziela się konkretnego wózka do przewiezienia konkretnej jednostki, ale raczej przydziela się dany typ urządzenia (przeważnie kilka egzemplarzy wózka) do danego obszaru funkcjonalnego i pewnego typu zadań, które ma tam wykonywać.



Rys. 12. Odzworowanie przykładowego procesu: a) czynności pojedyncze, b) czynności wielokrotne
Źródło: opracowanie własne.

W obiektach logistycznych wyposażonych w nakazowe systemy kierowania przepływem materiałów, takie jak WMS lub MFC⁵, w ramach realizacji funkcjonalności *stock locator system* oraz *direct flow*, następuje przydzielanie realizacji konkretnego cyklu transportowego do konkretnego numeru urządzenia. Dzieje się to jednak dopiero w fazie eksploatacji gotowego obiektu i jest to element sterowania przepływem materiałów. W fazie projektowania i analizy nie jest możliwe rozważenie procesu na tak szczegółowym poziomie.

W związku z powyższym *zadanie* w procesie transportu wewnętrznego definiowane jest jako konieczność przemieszczenia wybranych materiałów pomiędzy dwoma punktami w przestrzeni obiektu. Jednostką zadania PTW jest ilość materiału, która musi zostać przemieszczona. Technologia wykonania zadania zakłada realizację określonej liczby tzw. *cykli transportowych*, przy czym zakłada się, że w czasie jednego cyklu transportowana jest znana liczba jednostek materiału. Cykl jest powtarzany wielokrotnie w ciągu czasu pracy (np. zmiany roboczej). Czas trwania powtórzenia jest względnie krótki i jego długość nie jest znaczącą częścią czasu dysponowanego pracy. A więc zadanie jest określane przez ([8]):

- dobową liczbę powtórzeń cyklu transportowego dla i -tego zadania λ_i^D [cykli/dobę],
- czas trwania jednego powtórzenia cyklu transportowego i -tego zadania t_{ci} [h],
- realizujący je, p -ty zasób pracy.

Zadania PTW podlegają harmonogramowaniu.

⁵ WMS – (ang.) Warehouse Management System, MFC – (ang.) Material Flow Control.

■ Klasyczne zagadnienie harmonogramowania w odniesieniu do transportu wewnętrznego

Problemy harmonogramowania, nazywane też problemami szeregowania zadań zaliczają się do problemów sterowania w kompleksie operacji. Kompleks operacji definiowany jest jako system składający się z elementów należących do dwóch zbiorów: *zbioru operacji* i *zbioru zasobów* ([13], [14], [18]). W klasycznym ujęciu problemu operacja określana jest jako pewne działanie, co do którego nie zachodzi potrzeba poznania jego istoty. Konieczne jest jedynie określenie czasu wykonania takiej operacji za pomocą zasobów ze zbioru zasobów. W ujęciu klasycznym operacja podlegająca harmonogramowaniu scharakteryzowana jest poprzez: wymagania zasobowe, model matematyczny, priorytet, informację o możliwości przerwania wykonania, wymagany czas zakończenia. Ponadto operacja jest *niepodzielna*, tj. *nie może być rozłożona na podoperacje*, dla których możliwe jest podanie wyżej wymienionych cech. Zbiór operacji określa się przez podanie liczby elementów zbioru oraz informacji o momentach czasowych rozpoczęcia wykonania.

Jednostka zasobu jest określona przez dopuszczalną liczbę jednocześnie wykonywanych operacji (obciążenie) i ewentualną możliwość magazynowania. Zbiór zasobów określony jest przez liczbę jednostek zasobu danego typu.

Niepodzielność operacji w ujęciu klasycznym harmonogramowania jest podstawową różnicą w stosunku do harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego. Zadanie PTW składa się z wielu powtórzeń względnie krótkiego cyklu transportowego. Każdy taki cykl można opisać wymienionymi wyżej cechami. Zadanie PTW może być więc podzielone na części realizowane w różnych okresach czasu. Nie oznacza to, że niemożliwe jest formalne skonstruowanie klasycznego harmonogramu dla wszystkich powtórzeń cykli transportowych wchodzących w skład wszystkich zadań procesu w ciągu doby. Podejście takie jednak jest nieracjonalne, praktycznie niewykonalne ze względu na kolosalne potencjalne rozmiary takiego zadania oraz niemożliwe do rzeczywistej realizacji w obiekcie logistycznym.

W przypadku harmonogramowania PTW nie stosuje się również ścisłego rygoru przydziału zasobu do zadania, co ma miejsce w podejściu klasycznym. W tym przypadku znaczenie ma przydział grupy urządzeń – zasobów do kilku zadań jednocześnie, przy czym nie precyzuje się kiedy konkretny egzemplarz urządzenia ma rozpocząć i zakończyć realizację pojedynczego cyklu transportowego. Działanie takie wyczerpuje wymagania praktyki. Charakter pracy obiektu logistycznego umożliwia samoregulację w tym zakresie.

Klasyczne zadanie harmonogramowania polega na takim szeregowaniu operacji, aby przy posiadanych zasobach zakończyć realizację kompleksu operacji w jak najkrótszym

czasie. To wymaganie nie obowiązuje w obiekcie logistycznym w sposób ścisły. Ważniejsze dla pracy obiektu jest takie skonstruowanie harmonogramu, aby wszystkie zadania zostały wykonane w ciągu całego zadanego czasu dysponowanego pracy i przy minimalnym koszcie.

Harmonogram PTW rozkłada zadania w czasie i odpowiada na pytanie: kiedy dane zadanie może być wykonywane? Od sposobu rozłożenia zadań w czasie zależeć będzie liczba zasobów (tj. urządzeń z operatorami, bądź wyłącznie urządzeń lub pracowników) zaangażowanych do realizacji procesu, a w konsekwencji koszt realizacji PTW.

3.3. Konstruowanie harmonogramu PTW

■ Odzwierciedlenie zadań na harmonogramie PTW

Harmonogram PTW będzie budowany w dwóch sytuacjach:

- analizowany proces istnieje i funkcjonuje; zadaniem jest poprawa sytuacji przy ograniczeniach istniejącej infrastruktury i suprastruktury (np. liczba urządzeń danego typu, ograniczenia przestrzenne, ograniczenia produkcji itd.),
- analizowany proces jest w fazie projektowania; ograniczenia nie występują.

Pierwsza sytuacja jest bardziej złożona ze względów obliczeniowych i pewne przypadki zostaną omówione w punkcie 4.2 dotyczącym ograniczeń harmonogramowania. Poniżej omówiono drugi z przypadków.

Wiele zadań transportu wewnętrznego nie może być wykonywane przez cały dobowy czas pracy. Wynika to z charakteru przekształceń i występowania następujących czynników:

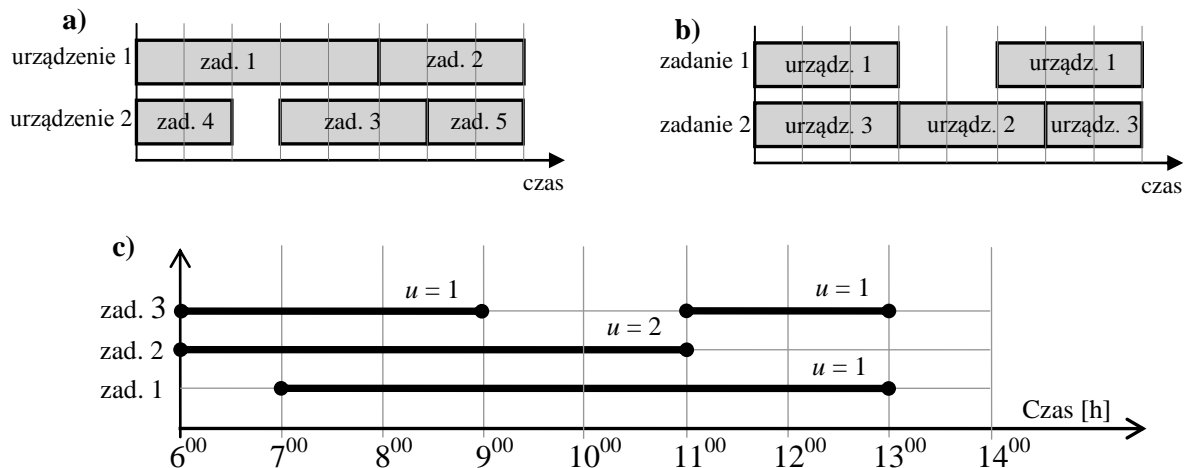
- zależność wykonania zadań transportu wewnętrznego od *uwarunkowań zewnętrznych* pracy obiektu (np. współpraca z dostawcami/kooperantami, ustalone godziny dostaw i wysyłek, funkcjonowanie w zorganizowanym łańcuchu dostawczym itp.),
- zadania związane bezpośrednio z *realizacją zamówień* klientów powinny być realizowane priorytetowo, np. komisjonowanie, załadunek, różnicowanie, konfekcjonowanie,
- zadania należące do grupy *pozostałych* (tzn. nie związanych bezpośrednio z realizacją zamówień klientów) mogą być realizowane w drugiej kolejności;
- *względy bezpieczeństwa* (wykluczenie pewnych zadań w czasie realizacji innych, np. komisjonowanie i uzupełnianie strefy komisjonowania),
- zależność procesu transportu wewnętrznego od procesu *produkcyjnego* (dla układu logistycznego obsługującego zakład produkcyjny lub linię produkcyjną),
- *dostępność* danego typu sprzętu/pracowników.

Przy budowie harmonogramu PTW należy też uwzględnić dwie ważne zasady dotyczące urządzeń:

- najdroższe urządzenie powinno być wykorzystywane w jak najwyższym stopniu w celu uzyskania zwrotu nakładów poniesionych na jego zakup,
- należy tak rozkładać w czasie zadania procesu, aby w miarę możliwości unikać przestojów w pracy urządzeń oraz jednocześnie unikać spiętrzeń pracy.

Im wyższa będzie zbieżność organizacji pracy obiektu logistycznego z powyższymi dwoma warunkami, tym niższe będą koszty eksploatacyjne i operacyjne pracy. W sytuacji optymalnej minimalna liczba urządzeń będzie realizowała proces na zadanym poziomie efektywności przy minimalnych nakładach i kosztach operacyjnych.

Harmonogramowanie jest przydzieleniem dla każdego zadania odcinków czasu w dobowym czasie pracy obiektu logistycznego oraz jednego lub więcej typów urządzenia do realizacji. W tym celu wygodnie jest posłużyć się tzw. wykresem Gantt'a zorientowanym na zadanie lub na urządzenie (rys. 13a i b).



Rys. 13. Przykład harmonogramu zorientowanego na: a) urządzenie, b, c) zadanie

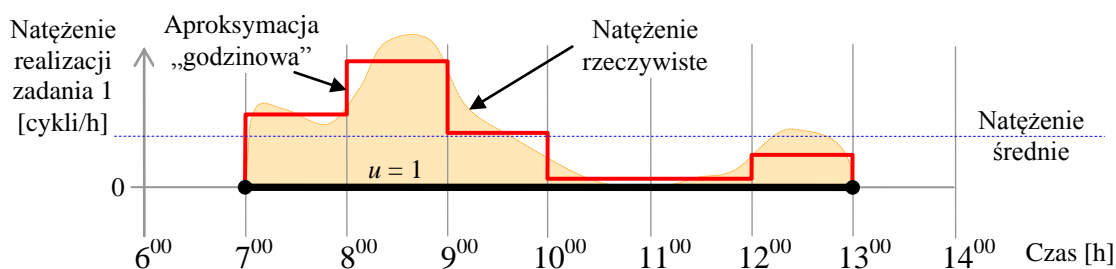
Źródło: opracowanie własne na podstawie [16].

Ze względu na charakter zadań proces transportu wewnętrznego w fazie projektowej wykorzystuje się wykres podobny do zaprezentowanego na rys. 13b. Wykres ten jest zorientowany na zadanie, jednakże do zadania tego przydzielony jest tylko jeden typ urządzenia (rys. 13c). Konieczność użycia więcej niż jednego typu urządzenia będzie oznaczała konieczność wyróżnienia nowego zadania tak, aby spełniony był warunek: jedno zadanie – jeden typ urządzenia (patrz ograniczenia harmonogramowania PTW, punkt 4.1).

Wymiarowania obiektów logistycznych dokonuje się przeważnie dla wartości dobowych przepływu materiałów i informacji. Praca obiektu logistycznego będzie zorganizowana w jedną, dwie lub trzy zmiany robocze w ciągu doby zależnie od zadania

logistycznego i dnia tygodnia. Czas ten będzie ograniczał harmonogram do maksymalnie 24 h. Czas pracy obiektu jest podzielony na odcinki, które będą przydzielane do zadań procesu transportu wewnętrznego. Możliwe jest wymiarowanie obiektów pod wartości kilkudniowe, tygodniowe bądź większe w przepływach materiałów. Wtedy harmonogram będzie odpowiednio wydłużony. Sytuacje takie mają miejsce kiedy obiekt spełnia funkcje silnie zależne od m.in. zmian sezonowych, długodystansowego transportu zewnętrznego lub przygotowuje duże partie wysyłkowe dla transportu masowego. Ogólne zasady harmonogramowania nie podlegają jednak zmianie.

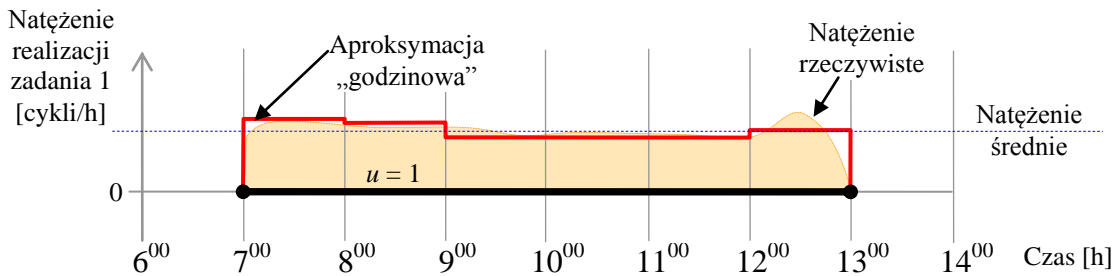
Przydzielony dla każdego zadania czas, kiedy *może* ono być wykonywane jest *czasem dysponowanym brutto*. Ze względu na specyfikę projektowania obiektów logistycznych zakłada się, iż natężenie wykonywania danego zadania w całym czasie dysponowanym jest stałe. W rzeczywistym obiekcie może okazać się, że zapotrzebowanie na realizację danego cyklu transportowego jest różne w różnych porach doby (np. duża liczba dostaw, które trzeba rozładować w godzinach porannych i mniejsza w godzinach popołudniowych – rys. 14).



Rys. 14. Natężenie realizacji danego cyklu transportowego w ciągu jednej zmiany roboczej – przykład
Źródło: opracowanie własne.

Dla przypadku przedstawionego na rys. 14 (wyładunek jednostek ładunkowych paletowych z naczepy do strefy wejścia w magazynie) wymiarowanie układu ze względu na średnie godzinowe natężenie zapotrzebowania na ten cykl transportowy mogłoby doprowadzić do niedostatku wydajności w godzinach 8⁰⁰–9⁰⁰ i powodować piętrzenie pracy. Ponadto w godzinach 8⁰⁰–9⁰⁰ urządzenia typu $u = 1$ będą musiałyby być sprowadzone z innych części magazynu (jeżeli w ogóle będą dostępne!) i pracować w strefie wejścia w celu wykonania zadania. Może to spowodować ich niedostatek w innych miejscach. Zwymiarowanie układu pod wartość średnią byłoby dopuszczalne jeżeli obiekt dysponowałby odpowiednią liczbą miejsc postojowych na placu dla pojazdów oczekujących na rozładunek i możliwe byłoby przesunięcie wyładunku tych pojazdów na godziny 10⁰⁰–12⁰⁰ (patrz punkt 3.4 oraz rys. 15). Ponadto wymiarowanie tego cyklu pod wartość średnią spowoduje w efekcie zaplanowanie niedostatecznej wydajność obszarów buforowych (niedostateczna liczba pól odkładczych) na wejściu do magazynu. Ponieważ jednym z zadań strefy buforowej

jest regulowanie przepływu materiałów poprzez tworzenie kolejek, to przy niedostatku miejsca cykl transportowy realizujący opróżnianie stref buforowych musiałby mieć zwiększoną wydajność aby nie dopuścić do wydłużania się kolejki.

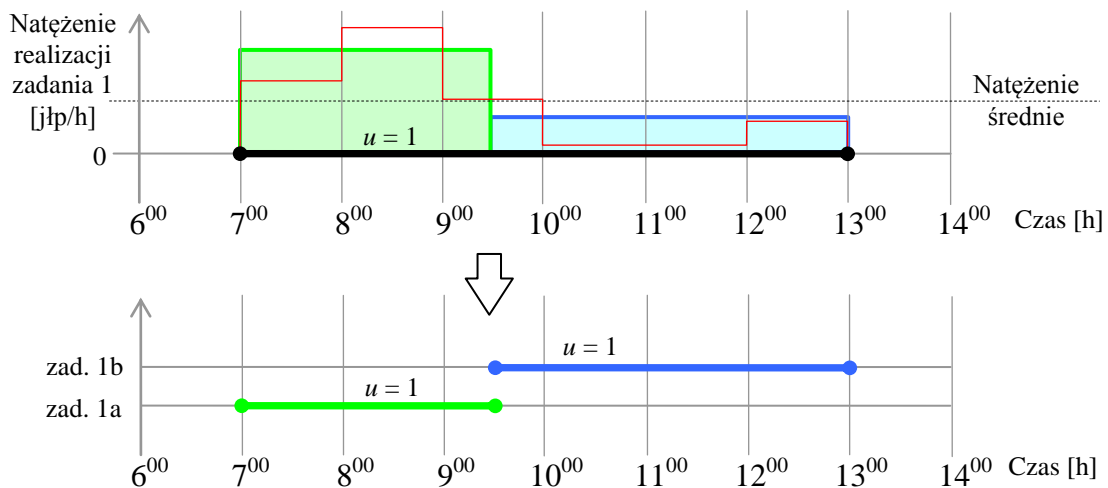


Rys. 15. Modyfikacja natężenia zapotrzebowania na realizację danego cyklu transportowego poprzez buforowanie – przykład

Źródło: opracowanie własne.

Zwymiarowanie omawianego cyklu pod wartość maksymalną natężenia występującą w godzinach 8⁰⁰–9⁰⁰ doprowadzi do przewymiarowania układu i nie wykorzystywania jego możliwości, szczególnie w godzinach 10⁰⁰–12⁰⁰.

Rozpatrywanie tak zadanego rozkładu natężenia jak na rys. 14 byłoby kłopotliwe przy próbie optymalizacji całego procesu. W takim przypadku, w celu zbudowania harmonogramu dla tego zadania, można dokonać jego rozdziału na *podzadania*, których histogram natężenia będzie miał postać prostokątów (rys. 16).



Rys. 16. Podział zadania na podzadania ze względu na nierównomierność natężenia godzinowego

Źródło: opracowanie własne.

Tak podzielone zadanie będzie podlegało ograniczeniom ze względu na czas wykonywania obu części i musi mieć ustalone granice czasowe. Niedokładność wynikająca z aproksymacji krzywej natężenia za pomocą figur płaskich – prostokątów, nie będzie miała znacznego wpływu na jakość harmonogramu. Obiekt logistyczny projektowany jest pod miarodajne natężenia przepływu materiałów, które z racji zastosowania współczynników

spiętrzeń są wyższe od średnich (punkt 2.2). Różnica ta z założenia niweluje pewne niedoskonałości procesu decyzyjnego, takie, jak opisana powyżej.

■ Wykres dobowej pracochłonności sprowadzonej procesu transportu wewnętrznego

Posiadając określone:

- zbiór zadań PTW,
- sekwencję zadań PTW w postaci karty procesu przepływu materiałów,
- zbiór zasobów pracy, typów urządzeń oraz kategorii pracy ludzkiej realizujące PTW,
- ograniczenia nakładane na czas wykonania zadań,
- przypisanie urządzeń i/lub kategorii pracy ludzkiej do zadań,
- czas dobowy pracy obiektu logistycznego,

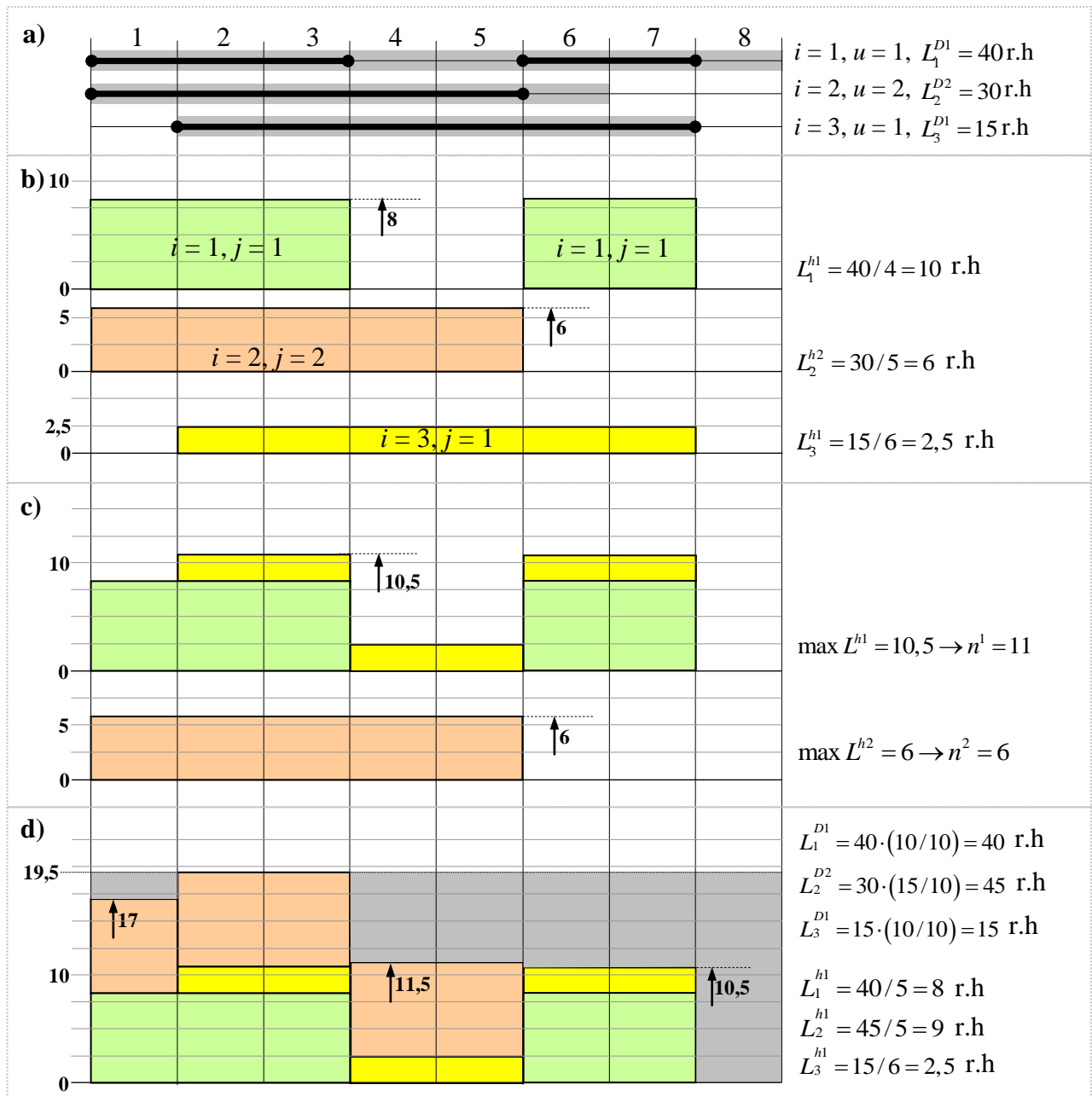
można konstruować harmonogram PTW. Poniżej przedstawiono kolejne kroki konstruowania harmonogramu PTW na przykładzie liczbowym (algorytm konstruowania harmonogramu na bazie [27], str. 108).

(1) Założenia ogólne – na przykładzie obiektu magazynowego

Długość osi czasu harmonogramu wynosi 8 jednostek czasu. Na osi należy rozłożyć zadania PTW. Zależnie od zapotrzebowania, należy ustalić *ziarnistość* harmonogramu, tj. długość elementarnego odcinka czasu, poprzez krotność którego wyrażane będą wszelkie miary czasowe na harmonogramie. Najczęściej stosowana wartość to 30 min, a praktyka wykazuje że jest ona wystarczająca. Użycie krótszego odcinka czasu nie jest uzasadnione ze względu na charakter pracy większości obiektów logistycznych, w których przesunięcia czasowe realizacji operacji będą następowały ze względów losowych. Dodatkowo stosowanie buforów w transporcie wewnętrznym pozwala w pewnym zakresie na bieżącą reorganizację pracy obiektu. W rozważanym przypadku ziarnistość harmonogramu jest równa 1 h.

Na rys. 17 zaprezentowano przykład konstrukcji harmonogramu, w którym:

- Wykonywane są trzy typy zadań:
 - $i = 1$: rozładunek naczep do bufora wejściowego, realizowany przez wózki $u = 1$ typu,
 - $i = 2$: odstawienie jłp do obszaru składowania, realizowane przez urządzenie $u = 2$ typu,
 - $i = 3$: przewiezienie jłp do obszaru komisjonowania, realizowane przez urządzenie $u = 1$.
- Znana jest pracochłonność dobową zadań: $L_1^{D1} = 40$ r.h, $L_2^{D2} = 30$ r.h, $L_3^{D1} = 15$ r.h.
- Przyjęto, że minimalna jednostka czasu na harmonogramie wynosi 1 h (stąd liczba odcinków dla jednej zmiany roboczej $T = 8$).
- Koszt godziny pracy urządzeń ustalono na: $u = 1$; $k^1 = 10$ [zł/h], $u = 2$; $k^2 = 15$ [zł/h].



Rys. 17. Etapy konstruowania wykresu pracochłonności sprowadzonej procesowi: a) harmonogram zadań, b) wykres pracochłonności rzeczywistej, c) wykres pracochłonności rzeczywistej ze względu na typy urządzeń, d) wykres pracochłonności sprowadzonej procesowi

Źródło: [9].

(2) Harmonogram PTW

Dla określonych zadań wyznaczono harmonogram PTW (rys. 17a). Do każdego zadania przypisano ograniczenia wynikające z uwarunkowań zewnętrznych (szare pole na rysunku). Następnie przydzielono do każdego zadania odcinki czasu, w których zadanie ma być realizowane (czarne linie). W ten sposób otrzymano czasy dysponowane dla poszczególnych zadań, i tak: $t_{dbr}^1 = 5 \text{ h}$, $t_{dbr}^2 = 5 \text{ h}$, $t_{dbr}^3 = 6 \text{ h}$.

(3) Wykres pracochłonności rzeczywistej procesu transportu wewnętrznego

Wykres pracochłonności rzeczywistej PTW jest pochodną harmonogramu PTW oraz dobowej liczby powtórzeń cyklu transportowego w danym zadaniu. Budowę wykresu pracochłonności rzeczywistej rozpoczyna się od wyznaczenia wartości pracochłonności zadań (wzory (11) i (12)). Otrzymano następujące wartości pracochłonności: $L_1^{D1} = 40$ r.h, $L_2^{D2} = 30$ r.h, $L_3^{D1} = 15$ r.h. Wartości naniesiono na rys. 17b.

Pracochłonności rzeczywiste procesu w danej t -tej chwili czasu nie mogą być sumowane, jeżeli praca wykonywana jest przez różne typy urządzeń. W przykładzie można zsumować jedynie pracochłonności rzeczywiste zadań $i = 1$ i $i = 3$, gdyż oba wykonywane są przez urządzenie $u = 1$ (rys. 17c). Wyważenie pracochłonności rzeczywistej kosztem pracy urządzenia/kategorii pracy ludzkiej umożliwi sumowanie pracochłonności całego procesu.

(4) Wykres pracochłonności sprowadzonej procesu transportu wewnętrznego

Po zrealizowaniu etapu harmonogramowania PTW projektant dysponuje przydzielonymi do każdego i -tego zadania czasami dysponowanymi brutto t_{dbr}^i , które posłużą następnie do obliczeń wydajnościowych. Dysponując znanymi pracochłonnościami rzeczywistymi i jednostkowymi kosztami pracy, ze wzorów (13) oraz (14) należy wyznaczyć pracochłonność sprowadzoną, którą można sumować dla całego procesu (rys. 17d).

Wykres pracochłonności sprowadzonej jest graficzną reprezentacją zaangażowania zasobów w realizację procesu transportu wewnętrznego i ukazuje jakość harmonogramu PTW. Minimalizowanie wartości godzinowej pracochłonności sprowadzonej procesu (wartość 19,5 na rys. 17d) będzie oznaczało ulepszenie organizacji PTW i niższe koszty eksploatacyjne. Minimalizacja pola powierzchni obszaru koloru szarego na rys. 17d oznacza lepsze wykorzystanie urządzeń. Stosunek sumy pól powierzchni wszystkich słupków na wykresie pracochłonności sprowadzonej do pola powierzchni prostokąta o bokach wyznaczonych przez długość osi czasu i wysokość najwyższego ze słupków jest wartością wskaźnika organizacyjnego θ_{oz} danego wzorem (36). W tym przypadku $\theta_{oz} = 0,64$.

Rola harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego

Harmonogramowanie PTW jest etapem, od którego zależy liczba urządzeń, które należy pozyskać, pracowników, których należy zatrudnić oraz powierzchnie buforowe. Maksymalna godzinowa wartość pracochłonności rzeczywistej procesu dla danego typu urządzenia (jako suma – patrz wzór (11)), będzie również co do wartości, po zaokrągleniu w górę, niezbędną liczbą urządzeń danego typu/pracowników danej kategorii pracy (rys. 17c). Dla $u = 1$: $\max L^{h1} = 10,5$ stąd $n^1 = 11$ urządzeń oraz dla $u = 2$: $\max L^{h2} = 6$ stąd $n^2 = 6$ urządzeń.

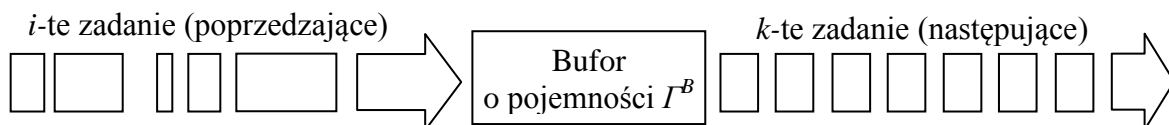
Wskaźnik organizacyjny

Wartości wskaźnika organizacyjnego obliczonego ze wzoru (36) oraz odczytanego bezpośrednio z wykresu pracochłonności prowadzonej będą różne. Wskaźnik obliczony ze wzoru będzie miał wartość nieznacznie większą ze względu na występujące w jego składowych zaokrąglenia w górę do liczb całkowitych. Zaokrąglenia te wynikają z liczenia liczby urządzeń i pracowników. Do celów rozprawy przyjęto, że wartość wskaźnika organizacyjnego będzie odczytywana z wykresów pracochłonności i tak też została ujęta w funkcji celu zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW. Program SCHED również oblicza wartość tego wskaźnika na podstawie stosunku pól powierzchni. Dodatkowo oddzielnie liczone będą wskaźniki organizacyjne wykorzystania poszczególnych zasobów pracy (wzór (65)), urządzeń transportu wewnętrznego (wzór (66)) i pracowników (wzór (67)).

Obliczanie wskaźników organizacyjnych poprzez porównanie odpowiednich pól na wykresie pracochłonności jest nowym podejściem. W punkcie 4.3 podano analityczny zapis wskaźników oparty na zadaniu optymalizacyjnym harmonogramowania PTW.

3.4. Buforowanie przepływu materiałów a harmonogram PTW

Harmonogramowanie PTW jest ściśle związane z buforowaniem przepływu materiałów. Przez *buforowanie* rozumie się niwelowanie różnic w natężeniu dwóch strumieni materiałów na dwóch kolejnych odcinkach drogi transportowej. Niwelowanie następuje poprzez spiętrzanie w węźle nadmiaru jednostek „wchodzących” lub stopniowym „wypuszczaniu” jednostek przechowywanych w czasie przerw w dostawach (rys. 18, [8]).



Rys. 18. Buforowanie na styku dwóch cykli transportowych

Źródło: opracowanie własne.

Buforowanie w procesie transportu wewnętrznego następuje w miejscach, w których stykają się cykle transportu wewnętrznego o różnych intensywnościach realizacji. Bufory w PTW charakteryzują się pojemnością:

- jednostkową (kiedy są jedynie przekaźnikami jednostek bez możliwości piętrzenia) – np. elementy rozdzielająco-łączące systemów transportu przenośnikowego,
- nieograniczoną, np. zewnętrzna droga dojazdowa do obiektu – jako bufor dla pojazdów transportu zewnętrznego.

– ograniczoną – np. buforów wejściowo-wyjściowe w obiektach logistycznych,

Należy podkreślić różnice pomiędzy funkcjami przechowalniczymi realizowanymi przez obszary składowania a buforowaniem w PTW. Przechowywanie jest statycznym elementem procesu, generującym koszty wynikające z utrzymania przestrzeni. Buforowanie może być elementem dynamicznym i wpływa znacznie na koszty transportu wewnętrznego.

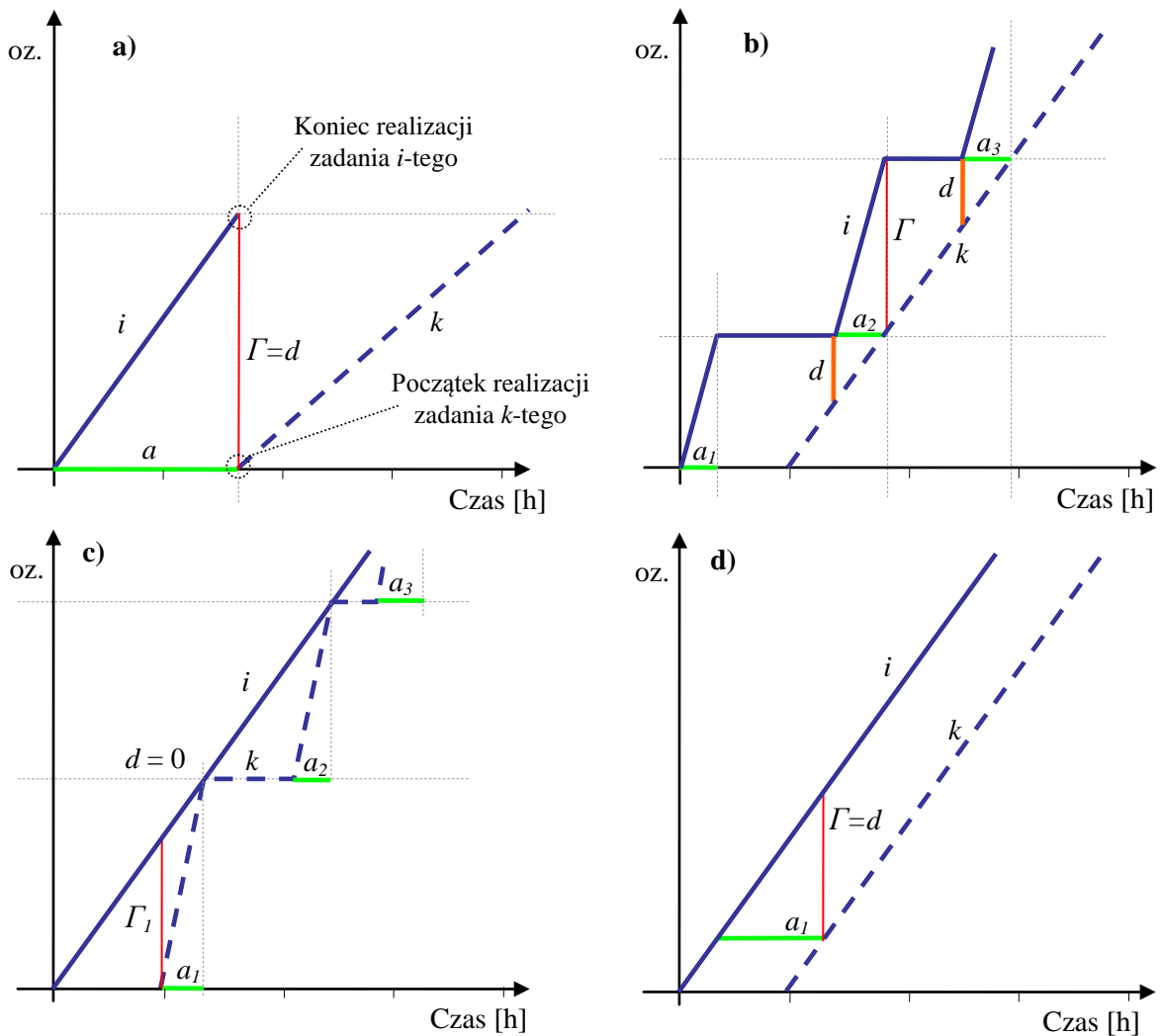
Pojemności (powierzchnie) buforów planowane w fazie kształtowania procesu transportu wewnętrznego także będą wpływały na koszty związane z utrzymaniem przestrzeni i utratę potencjalnych możliwości realizacji innych funkcji w tych miejscach. W przypadku obszarów komisjonowania, które w obiektach magazynowych są miejscami o największej „wartości” ze względu na swoje dogodne cechy dostępowe, określenie wielkości buforów będzie miało duże znaczenie dla projektu. Niedostateczne pojemności buforów mogą prowadzić do przestojów i opóźnień i tym samym powodować straty finansowe.

Na rys. 19 zaprezentowano wykresy logistyczne typowych sytuacji zachodzących w transporcie wewnętrznym, w których konieczne jest zastosowanie buforów. Sytuacje te wynikają ze wzajemnej *zależności buforowania*, w jakiej mogą znajdować się dwa kolejne zadania procesu. Charakterystyczna dla tych zadań jest nierównomierność realizacji zadania poprzedzającego: *i*-tego (linia ciągła), oraz zadania następującego: *k*-tego (linia przerywana).

W przypadku a) na rys. 19, *i*-te zadanie musi zostać wykonane w całości i dopiero wtedy *k*-te zadanie może być realizowane. Przykładem takiego działania jest zestawianie całej wysyłki dla odbiorcy, składającej się z wielu jednostek, przed realizacją kontroli i załadunku. W tym przypadku potrzebny jest bufor o pojemności Γ jednostek, natomiast realizacja zadania *k*-tego nastąpi po upływie czasu a , co wynika z harmonogramu PTW.

W przypadku b) założono, że zadanie *i*-te będzie realizowane zawsze od momentu, w którym w buforze pozostanie d jednostek „wychodzących” z bufora poprzez realizację zadania *k*-tego. Pojemność Γ bufora będzie maksymalną odległością pomiędzy liniami napełniania bufora w drodze realizacji zadania *i*-tego oraz opróżniania w drodze realizacji zadania *k*-tego. Przykładem takiego zadania w procesie transportu wewnętrznego może być uzupełnianie miejsca oferowania materiału w obszarze komisjonowania. Kiedy poziom zapasu w miejscu oferowania spada do granicznej wartości d jednostek, należy dopełnić to miejsce. Momenty rozpoczęcia *i*-tego zadania, czyli początki odcinków a_1, a_2, a_3 , określone są przez harmonogram PTW.

W przypadku c) graniczny zapas przerywający realizację zadania następującego *k*-tego wynosi $d = 0$, czyli będzie ono kontynuowane aż do opróżnienia bufora. Momenty rozpoczęcia *k*-tego zadania, (odcinków a_1, a_2, a_3) określone są przez harmonogram PTW.



Rys. 19. Wykresy logistyczne przepływu materiałów dla określenia pojemności buforów – przykłady
 Źródło: opracowanie własne.

Przypadek d) na rysunku przedstawia przykład dwóch zadań o jednakowym tempie realizacji. Występuje tu jedynie przesunięcie w czasie o odcinek a wynikające z harmonogramu PTW. Pojemność bufora będzie wynosiła Γ .

Przedstawione sytuacje są wybranymi przypadkami, jednakże na ich podstawie można określić rolę harmonogramu PTW jako narzędzia ustalającego początek i koniec odcinków, w których realizowana jest zadanie, a tym samym przez proste zależności geometryczne długość odcinków Γ , czyli pojemności buforów.

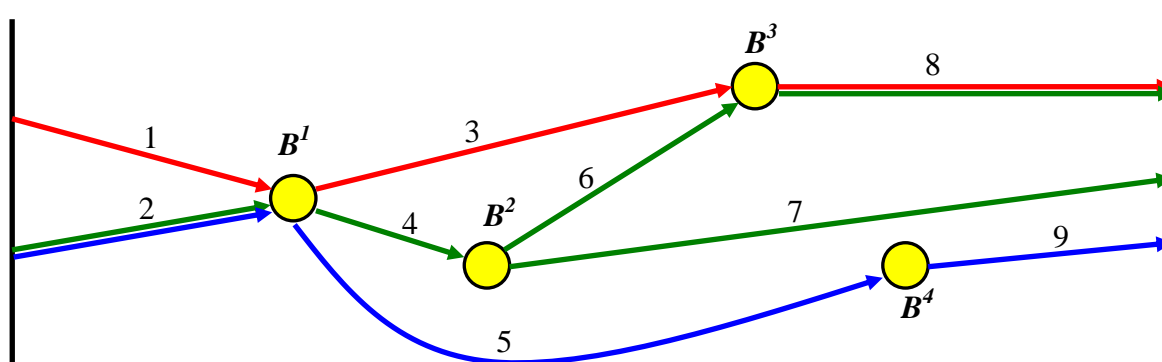
Zależność buforowania pomiędzy dwoma zadaniami

Pomiędzy dwoma zadaniami PTW będzie zachodziła *zależność buforowania*, jeżeli zadania te tworzą sekwencję oraz mają różne intensywności realizacji i/lub przesunięcie w czasie początków realizacji. Wówczas rozłożenie w czasie realizacji zadań będzie skutkowało koniecznością zapewnienia buforów o odpowiedniej pojemności, przy czym niektóre warianty harmonogramu pozwolą na uzyskanie mniejszych powierzchni buforowych,

a w konsekwencji mniejszych kosztów.

Dla wybranych przypadków PTW można przyjąć założenie, że suma pojemności buforów dla całego procesu (przy zachowaniu jednolitej jednostki tejże pojemności) ma być minimalna lub dążyć do określonej wartości. W takim przypadku możliwa staje się ocena harmonogramu PTW poprzez wielkość koniecznych buforów, czyli ocena organizacji procesu poprzez ocenę koniecznych do jego realizacji powierzchni. Kwestią oddzielną jest czy dana powierzchnia buforowa może być wykorzystywana przez zadania należące do różnych sekwencji w procesie, a nie wykonywane w tym samym czasie (punkt 3.5).

Na rys. 20 przedstawiono przykładową strukturę PTW zapisaną w postaci grafu, która składa się z zadań $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ oraz buforów B^1, B^2, B^3, B^4 . Łuki grafu odpowiadają zadaniom w procesie, a wierzchołki reprezentują bufory na styku kolejnych zadań (cykli transportowych). Odpowiednio pary zadań (1,3), (3,8), (2,4), (4,6), (6,8), (4,7), (2,5), (5,9) znajdują się w *zależności buforowania*, tj. zadania poprzedzające napelnią bufor, a zadanie następujące opróżnia go. W niektórych przypadkach jedno zadanie jest następującym dla kilku poprzedzających jednocześnie (np. $i = 8$ jest następujące względem zadania $i = 3$ oraz $i = 6$) lub odwrotnie (np. zadanie $i = 2$ jest poprzedzające dla zadania $i = 4$ oraz $i = 5$).



Rys. 20. Lokalizacja buforów w procesie transportu wewnętrznego

Źródło: opracowanie własne.

3.5. Harmonogram PTW a projekt obiektu logistycznego

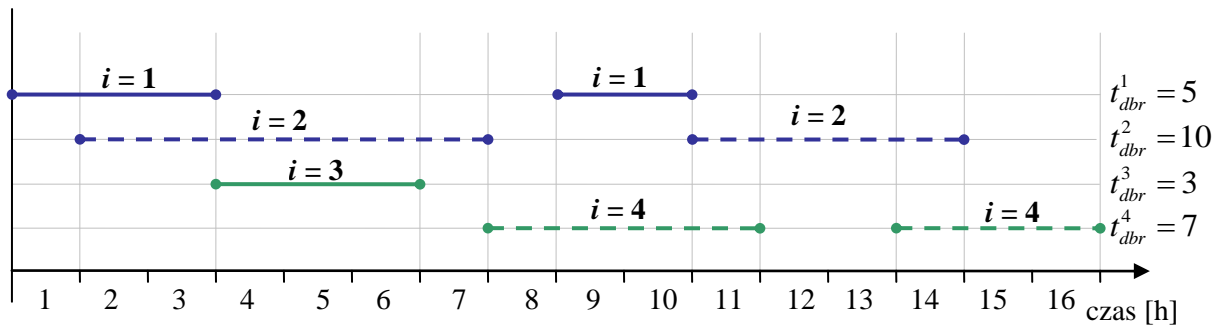
Na przestrzeń obiektu logistycznego składają się:

- przestrzeń zajmowana przez materiały, wyznaczona przez urządzenia do składowania,
- przestrzeń przeznaczona na drogi transportowe i korytarze robocze,
- przestrzenie przeznaczone na operacje dodatkowe, nie będące transportem wewnętrznym,
- przestrzenie buforowe.

Wielkość przestrzeni buforowych zależy od intensywności i różnorodności strumieni materiałów, a także od wzajemnego rozłożenia zadań w czasie. Przestrzenie buforowe będą

miały znaczenie dla efektywności pracy obiektu logistycznego. Poprzez odpowiednie rozłożenie zadań PTW w czasie można zmniejszać potrzebne bufory zachowując żadaną wydajność i efektywność procesu.

Na rys. 21 przedstawiono harmonogram realizacji czterech zadań, przy czym zadania $i = 1$ oraz $i = 3$ są zadaniami poprzedzającymi odpowiednio dla zadań $i = 2$ oraz $i = 4$. Zadania $i = 1$ i $i = 3$ napęniają bufor B , zaś $i = 2$ i $i = 4$ czerpią z niego jednostki i powodują jego opróżnianie. Przy założeniu, że wszystkie cztery zadania używają tego samego typu jednostek logistycznych (oz – opakowań zbiorczych) i przy znanych wielkościach przepływu, należy oszacować wymaganą pojemność Γ^B bufora B .



Rys. 21. Harmonogram zadań powiązanych zależnością buforowania – przykład

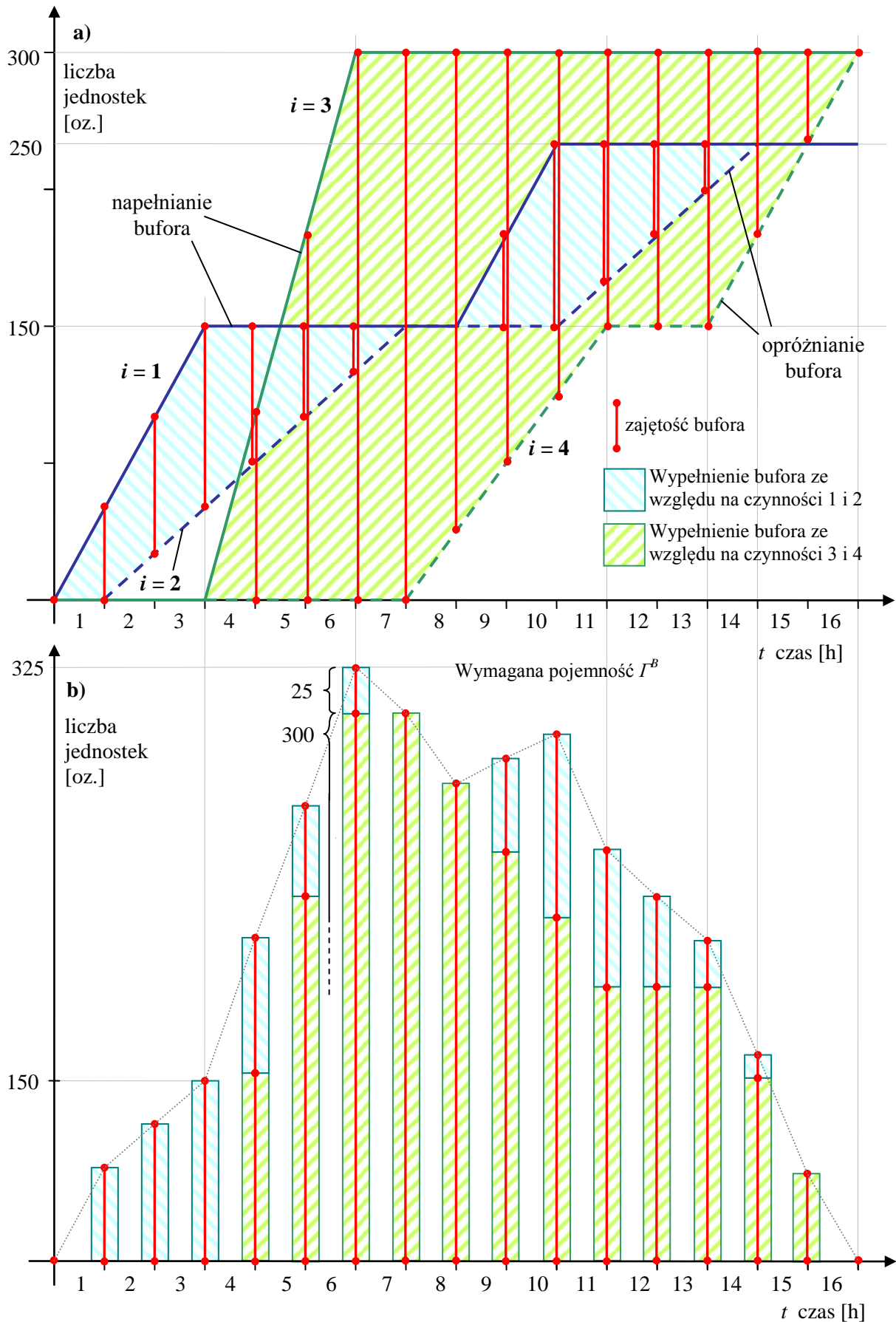
Źródło: opracowanie własne.

Przyjęto, że zadanie $i = 1$ jest rozładunkiem jednostek do bufora, a $i = 2$ jest wprowadzeniem tych jednostek do obszaru składowania. Zadanie $i = 3$ jest odstawianiem jednostek skompletowanych do bufora, a $i = 4$ jest załadunkiem tych jednostek do środka transportu zewnętrznego. Dobowa liczba cykli tych zadań wynosi odpowiednio: $\lambda_1^D = \lambda_2^D = 250$ cykli/dobę oraz $\lambda_3^D = \lambda_4^D = 300$ cykli/dobę.

W celu zobrazowania stanu bufora B w ciągu jednej 16-sto godzinnej doby pracy posłużono się wykresem logistycznym napełniania i opróżniania bufora (rys. 22) zgodnie z harmonogramem przedstawionym na rys. 21. Z rys. 22a odczytano funkcje $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ i $f_4(t)$ będące zapisem przebiegu napełniania lub opróżniania bufora B :

$$f_1(t) = \begin{cases} 50t & \text{dla } t \in (0,3) \\ 150 & \text{dla } t \in (3,8) \\ 50t - 250 & \text{dla } t \in (8,10) \\ 250 & \text{dla } t \in (10,16) \end{cases} \quad f_2(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \in (0,1) \\ 25t - 25 & \text{dla } t \in (1,7) \\ 150 & \text{dla } t \in (7,10) \\ 25t - 100 & \text{dla } t \in (10,14) \\ 250 & \text{dla } t \in (14,16) \end{cases}$$

$$f_3(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \in (0,3) \\ 100t - 300 & \text{dla } t \in (3,6) \\ 300 & \text{dla } t \in (6,16) \end{cases} \quad f_4(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \in (0,7) \\ 37,5t - 262,5 & \text{dla } t \in (7,11) \\ 150 & \text{dla } t \in (11,13) \\ 37,5t - 375 & \text{dla } t \in (13,16) \end{cases}$$



Rys. 22. a) Wykres logistyczny napętniania i opróżniania bufora B , b) histogram zajętości bufora B
 Źródło: opracowanie własne.

Pojemność Γ^B bufora będzie wynikała z jego maksymalnego dobowego obciążenia, które w rozważanym przykładzie następuje w chwili $t=7$ (rys. 22b) i jest sumą różnic wartości funkcji $f_1(t)$ i $f_2(t)$ oraz $f_3(t)$ i $f_4(t)$. Pojemność Γ^B bufora wyznacza się jako:

$$\Gamma^B = \max_{t \in T} \{f_1(t) - f_2(t) + f_3(t) - f_4(t)\}. \quad (41)$$

W ogólności, dla każdego b -tego bufora, zbiór Z^b par (i, k) zadań, dla których zachodzi zależność buforowania jest podzbiorem zbioru par określonych przez iloczyn kartezjański $Z^b \subset I \times I$ (definicja zbioru I w punkcie 4.1). Jeżeli i jest zadaniem poprzedzającym, a k jest zadaniem dla niego następującym można wyznaczyć niezbędną pojemność b -tego bufora:

$$\Gamma^b = \max_{t \in T} \left\{ \sum_{(i,k) \in Z^b} (f_i(t) - f_k(t)) + S^b \right\} \quad \forall (i,k) \in Z^b \quad (42)$$

przy czym S^b jest liczbą jednostek, które znajdowały się w buforze przed rozpoczęciem pracy.

Ze względu na zasady budowania wykresu logistycznego, funkcje $f_i(t)$ zawsze będą miały postać $f(t) = at + b$ lub $f(t) = c$, gdzie c jest stałą. Znając dobowe liczby powtórzeń cykli transportowych λ_i^D i czasy dysponowane t_{dbr}^i zadań odczytane z harmonogramu PTW można wyznaczyć wartość parametru a funkcji dla każdego i -tego zadania:

$$a_i = \lambda_i^D / t_{dbr}^i. \quad (43)$$

Korzystając z harmonogramu PTW można podejmować próby minimalizacji potrzebnych powierzchni buforowych. Dokonuje się tego poprzez takie rozłożenie zadań w czasie dysponowanym, aby dany bufor obsługiwał równocześnie jak najmniejszą liczbę par zadań będących w zależności buforowania (np. przyspieszenie opróżniania bufora – zadania $i=2$ na rys. 22a z momentu $t=2$ na moment $t=1$ doprowadzi do zmniejszenia wymaganej pojemności bufora B z 325 na 300 jednostek).

W punkcie 4.2 rozprawy przedstawiono formalny zapis problemu buforowania jako ograniczenia w problemie harmonogramowania PTW. W punkcie 4.3 przedstawiono funkcję celu zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW opartą na ocenie pojemności buforów w transporcie wewnętrznym.

4. OPTIMALIZACJA HARMONOGRAMOWANIA PROCESU TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO

4.1. Dane i zmienne decyzyjne problemu harmonogramowania PTW

■ Formalizacja problemu harmonogramowania PTW

Harmonogramowanie jako dokonywanie przydziału czasu do zadań zostało omówione w rozdziale 3.3 rozprawy. Szerokie zastosowanie harmonogramów determinuje różny poziom złożoności tych problemów oraz rozmiary ich przestrzeni stanów. W przypadku procesu transportu wewnętrznego przestrzeń stanów zagadnienia harmonogramowania będzie miała kilka wymiarów związanych ze sformułowanymi poniżej danymi. Problem harmonogramowania może być sformalizowany na kilka różnych sposobów w zależności od metody optymalizacyjnej, jaką wybrano do rozwiązania.

Ze względu na obecności w strukturze zagadnienia zależności czasowej należy rozważyć, czy problem reprezentowany będzie w ciągłej, czy dyskretnej przestrzeni stanów ze względu na czas. Ciągłość przynajmniej jednego wymiaru przestrzeni stanów oznacza ciągłość samej przestrzeni, tj. możliwość istnienia nieskończonej liczby rozwiązań.

Z kolei kwantyfikacja czasu pozwala na ograniczenie liczby możliwych rozwiązań dopuszczalnych problemu. Kwantyfikacja czasu jest ponadto naturalną konsekwencją działalności ludzkiej, dla której charakterystyczne jest dokonywanie pomiarów, podziałów i operowanie jednostkami, takimi jak godzina, minuta itp. W takim przypadku organizacja procesów w drodze harmonogramowania będzie polegała na przydzielaniu pewnej liczby jednostek czasu o określonej długości do zadań, urządzeń lub stanowisk pracy czy też kombinacji powyższych.

■ Dane wejściowe

W zagadnieniu harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego należy uwzględnić następujące zbiory danych wejściowych:

- Zbiór I numerów zadań procesu transportu wewnętrznego $i \in I$; $I = \{1, 2, \dots, i, \dots, k, \dots, I\}$, które będą podlegać harmonogramowaniu. Elementy zbioru są numerami cykli

transportowych wyróżnionych w procesie i zapisanych w postaci karty procesu przepływu materiałów (punkt 2.3 oraz przykład: rys. 11 str. 71).

- Zbiór typów urządzeń $U = \{0, 1, 2, \dots, u, \dots, U\}$. Każde zadanie ma przypisany typ urządzenia $u \in U$ (punkt 2.3 str. 49). Przypisanie i -temu zadaniu typu urządzenia $u = 0$ oznacza, że do tego zadania nie wykorzystuje się żadnego urządzenia.
- Zbiór kategorii pracy ludzkiej $C = \{0, 1, 2, \dots, c, \dots, C\}$. Każde zadanie może mieć przypisaną kategorię pracy ludzkiej $c \in C$, która będzie je realizowała bezpośrednio lub pośrednio poprzez obsługę odpowiedniego urządzenia. Przypisanie i -temu zadaniu kategorii pracy ludzkiej $c = 0$ oznacza, że to zadanie realizowane jest automatycznie przez urządzenie bez udziału człowieka (punkt 2.3 str. 49).
- Zbiór typów zasobów pracy $P = \{1, 2, \dots, p, \dots, z, \dots, P\}$, przy czym $p \equiv (u, c) : u \in U; c \in C$. Każde zadanie ma przypisany element ze zbioru typów zasobów. Poprzez typ zasobu rozumie się:
 - $(0, c)$ → pracownika c -tej kategorii pracy realizującego dane zadanie ręcznie, lub
 - (u, c) → pracownika c -tej kategorii pracy realizującego zadanie z wykorzystaniem urządzenia u -tego typu (mechanicznie), lub
 - $(u, 0)$ → urządzenie u -tego typu realizujące zadanie automatycznie.
- I^p jest zbiorem numerów zadań wykonywanych przez p -ty typ zasobu pracy, $I^p \subset I$.
- I^u jest zbiorem numerów zadań wykonywanych przez u -ty typ urządzenia, $I^u \subset I$.
- I^c jest zbiorem numerów zadań wykonywanych przez c -tą kat. pracy ludzkiej, $I^c \subset I$.
- Zbiór numerów buforów procesu transportu wewnętrznego $B = \{1, 2, \dots, b, \dots, B\}$. Zadania PTW składają się z cykli transportowych o początkach i końcach w buforach PTW. Jedne cykle kończą się w buforze (zasilają go), inne rozpoczynają się w nim (punkt 3.4).
- Każdy b -ty bufor może dysponować ograniczoną pojemnością Γ^b wyrażoną w liczbie jednostek, które mogą być buforowane jednocześnie. Pojemności buforów tworzą wektor:

$$\Gamma = [\Gamma^b : b \in B] \quad (44)$$

- W każdym b -tym buforze może znajdować się S^b jednostek przed rozpoczęciem pracy. Wektor wstępnego zapelnienia buforów ma postać:

$$S = [S^b : b \in B] \quad (45)$$

- Zbiór Z^b par (i, k) zadań ze zbioru I dla których zachodzi *zależność buforowania* w b -tym buforze $Z^b = \{(i, k) : i \in I, k \in I, i \neq k\}$. Założono, że i jest zadaniem poprzedzającym, a k następującym oraz, że cykle transportowe zadania i -tego mają swój koniec w b -tym

buforze, a k -tego mają tam swój początek. Zadanie i -te napelnia b -ty bufor, a zadanie k -te czerpie stamtąd jednostki dostarczone przez i .

- Każde i -te zadanie realizowane przez zasób p -tego typu ma znaną dobową liczbę powtórzeń λ_i^{Dp} [cykli/dobę].
- Każde i -te zadanie ma znany czas jednego powtórzenia t_i [h].
- Każde i -te zadanie ma znaną pracochłonność dobową L_i^{Dp} wynikającą z liczby powtórzeń cyklu transportowego w danym zadaniu λ_i^{Dp} oraz czasu wykonania jednego cyklu t_i (punkt 2.4 str. 55 oraz str. 57). Pracochłonności dobowe zadań tworzą wektor:

$$\mathbf{L} = [L_i^{Dp} : i \in \mathbf{I}] \quad (46)$$

Miarą pracochłonności jest roboczegodzina [r.h] bez względu na to, czy zadanie wykonywane jest ręcznie, mechanicznie czy automatycznie.

- Zbiór odcinków czasu $\mathbf{T} = \{1, 2, \dots, t, \dots, T\}$ określający ziarnistość harmonogramu. Liczba elementów zbioru wynika z żądanej dokładności harmonogramu. Przeważnie odcinki czasowe odpowiednie dla zadań PTW mają 30 min, co przy 8-godzinnej zmianie roboczej daje 16 odcinków czasu (punkt 3.3).
- Liczba zmian roboczych na dobę l_z oraz długość zmiany roboczej l [h]. Wynika stąd, że długość każdego t -tego odcinka czasu wynosi $(l \cdot l_z) / T$ [h].

■ Założenia problemu harmonogramu PTW w aspekcie budowy zadania optymalizacyjnego

Praca obiektu logistycznego będzie organizowana poprzez przydzielanie do każdego i -tego zadania pewnej liczby odcinków czasowych ze zbioru odcinków czasu \mathbf{T} . W tym celu należy poczynić założenia:

- Ustala się długość czasu pracy $l \cdot l_z$ obiektu logistycznego i określa na jego podstawie liczbę odcinków czasu T . Założenie to będzie miało swoje przełożenie na praktyczne zastosowanie modelu $t = 1, 2, \dots, T$ związane z obliczalnością zadania.
- Typy zasobów pracy $p \in \mathbf{P}$ są na stałe przypisane do numerów zadań $i \in \mathbf{I}$. Możliwe jest przypisanie do jednego rodzaju zadania więcej niż jednego typu zasobu, jednakże taka sytuacja musi być rozważana osobno.
- Dana jest (opcjonalnie) liczba urządzeń u -tego typu n^u i/lub liczba pracowników c -tej kategorii pracy n^c jako ograniczenia (przy analizie istniejących obiektów).
- Dane są koszty godziny pracy urządzenia u -tego typu oraz pracownika c -tej kategorii pracy ludzkiej, które wyrażone są jako koszt godziny pracy zasobu p -tego typu k^p .

- Przydzielone do i -tego zadania odcinki czasu stanowią w sumie czas dysponowany t_{dbr}^i dla wykonywania tego zadania.
- Czas wykonania jednego cyklu transportowego w ramach zadania i -tego jest znacząco mniejszy od czasu dysponowanego dla tego zadania $t_i \ll t_{dbr}^i$.
- Wszystkie i -te zadania muszą zostać wykonane w czasie T .
- Natężenie pracochłonności realizacji danego zadania jest równomierne (patrz rys. 15).

■ Zmienne decyzyjne

Praca będzie organizowana poprzez przydzielanie do każdego i -tego rodzaju zadania odcinków czasowych $t \in T$ ze zbioru odcinków czasu $T = \{1, 2, \dots, t, \dots, T\}$. Wszystkie zadania muszą mieć przypisany czas dysponowany w postaci odpowiedniej liczby odcinków czasu umiejscowionych na osi czasu zgodne z ograniczeniami.

Wprowadzono do rozważań **zmienne decyzyjne** $x_i^{p,t}$ binarne o interpretacji:

$$x_i^{p,t} = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } i\text{-te zadanie jest realizowane przez zasób } p\text{-tego typu w } t\text{-tym odcinku czasu,} \\ 0, & \text{w przeciwnym wypadku.} \end{cases}$$

Zmienne decyzyjne tworzą macierz $\mathbf{X} = [x_i^{p,t}]_{I \times T}$.

4.2. Układy ograniczeń problemu harmonogramowania PTW

Ograniczenie (1) Momenty rozpoczęcia i zakończenia zadania

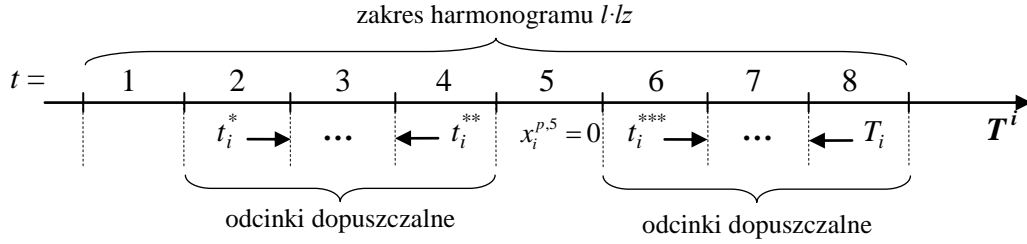
Ze względów technologicznych pewne zadania PTW muszą zostać rozpoczęte i zakończone w ściśle ustalonych porach doby (punkt 3.3 str. 76). Ograniczenie ustalone jest poprzez definiowanie zbiorów odcinków czasu T^i dozwolonych dla i -tego typu zadania:

$$T^i = \{t^i, t^i + 1, t^i + 2, \dots, T_i\}, \quad T^i \subset T, \quad T_i \leq T \quad \forall i \in I \quad (47)$$

Ograniczenie (2) Wyłączenie przedziałów czasu

Wyłączenie wybranych przedziałów czasu pracy na harmonogramie PTW może następować ze względów technologicznych, np. w związku z realizacją produkcji, kontrolami technicznymi, serwisem itd. Wykluczenie wybranych odcinków czasu dokonywane jest poprzez wyzerowanie odpowiednich zmiennych decyzyjnych (rys. 23):

$$\sum_{t \in T^i: t_i^{**} < t < t_i^{***}} x_i^{p,t} = 0 \quad \forall i \in I \quad \forall p \in P \quad (48)$$



Rys. 23. Ograniczenia ze względu na rozpiętość czasu dysponowanego dla zadań

Źródło: opracowanie własne.

Ograniczenie (3) Minimalny/maksymalny czas dysponowany t_{di} zadania

Zadanie PTW może mieć ustalony minimalny lub maksymalny dobowy czas dysponowany. Czas ten jest minimalną bądź maksymalną liczbą odcinków czasowych t , które ze względów technologicznych należy przydzielić do i -tego zadania:

$$\sum_{t \in T^i} x_i^{p,t} \geq t_{dbr}^i \quad \text{lub} \quad \sum_{t \in T^i} x_i^{p,t} \leq t_{dbr}^i \quad \forall i \in I \quad \forall p \in P \quad (49)$$

Ograniczenie jest formułowane w zależności od zapotrzebowania. Przyjmuje się jednak zawsze, że każde i -te zadanie musi mieć przydzielony co najmniej 1 odcinek czasu, tak więc:

$$t_{dbr}^i \geq 1 \quad \forall i \in I.$$

Ograniczenie (4) Liczba zasobów p -tego typu

Ograniczenie ze względu na liczbę zasobów p -tego typu wprowadzane jest głównie w przypadku analizy układu istniejącego. Ograniczenie mówi o liczbie posiadanych urządzeń lub zatrudnianych pracowników. Nie musi ono występować w przypadku procesu nowo projektowanego lecz może zostać zastosowane w celu wyeliminowania rozwiązań nieracjonalnych technologicznie. W tym przypadku rozważane są wszystkie p -te typy zasobów pracujące w obiekcie. W ograniczeniu (5) dokonano dodatkowego rozróżnienia ze względu na zadania procesu:

$$\text{a) } \max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in I^p} \frac{L_i^{Dp} \cdot x_i^{p,t} \cdot T}{\sum_{s \in T^i} x_i^{p,s} \cdot l \cdot l_z \cdot \omega_t^p} \right\} \leq n^p \quad \forall p \in P \quad (50)$$

$$\text{b) (równoważne)} \quad \frac{T}{l \cdot l_z \cdot \omega_t^p} \cdot \sum_{i \in I^p} \frac{L_i^{Dp} \cdot x_i^{p,t}}{\sum_{s \in T^i} x_i^{p,s}} \leq n^p \quad \forall p \in P \quad (51)$$

gdzie: n^p – liczba zasobów p -tego typu [szt.],

L_i^{Dp} – pracochłonność dobowa wynikająca z realizacji i -tego zadania przez zasób p -tego typu [r.h],

T – licznosc zbioru odcinków czasowych; liczba t -tych odcinków czasu,

- $l \cdot l_z$ – iloczyn liczby i długości zmiany roboczych na dobę [h],
 ω_i^p – współczynnik wykorzystania czasu pracy przez zasób p -tego typu,

Ograniczenie (5) Liczba zasobów p -tego typu realizujących i -te zadanie

Ograniczenie to jest szczególnym przypadkiem ograniczenia (4). W pewnych sytuacjach do realizacji i -tego zadania można wykorzystać nie więcej p -tych zasobów niż zostało to założone, chociaż w całym obiekcie logistycznym może ich pracować więcej:

$$a) \quad \frac{T}{\sum_{t \in T^i} x_i^{p,t}} \cdot \frac{L_i^{Dp}}{l \cdot l_z \cdot \omega_i^p} \leq n_i^p \quad \forall p \in \mathbf{P} \quad \forall i \in \mathbf{I}^p \quad (52)$$

- gdzie: n_i^p – liczba zasobów p -tego typu realizujących i -te zadanie [szt.],
 L_i^{Dp} – pracochłonność dobową wynikająca z realizacji i -tego zadania przez zasób p -tego typu [r.h],
 T – liczność zbioru odcinków czasowych; liczba t -tych odcinków czasu,
 $l \cdot l_z$ – iloczyn liczby i długości zmiany roboczych na dobę [h],
 ω_i^p – współczynnik wykorzystania czasu pracy przez zasób p -tego typu.

Zarówno (4) jak i (5) ograniczenie może być łatwo przystosowane do określania liczby urządzeń u -tego typu lub liczby pracowników c -tej kategorii pracy realizujących i -te zadania. W takim przypadku we wzorach (50), (51) i (52) należy zastąpić zbiór \mathbf{I}^p odpowiednio zbiorami \mathbf{I}^u lub \mathbf{I}^c , a indeks p odpowiednio indeksami u oraz c .

Ograniczenie (6) Minimalna długość przydzielonego odcinka czasu

Przy względnie dużej liczbie odcinków czasowych t , zadanie optymalizacyjne może przydzielać czas dysponowany do i -tych zadań w sposób ekstremalizujący funkcję celu, jednak nieefektywny ze względów technologicznych (np. uruchamianie linii produkcyjnej na 10 min). W tym celu wprowadzono ograniczenie ustalające minimalną liczbę r_i odcinków czasowych t , które muszą tworzyć nieprzerwany ciąg dla i -tego zadania (rys. 24):

$$\alpha_i^t \left(\sum_{z=0}^{\min\{T_i-t, r_i-1\}} \prod_{s=t}^{t+z} x_i^{p,s} - \sum_{z=1}^{\min\{T_i-t, r_i-1\}} \prod_{s=t+1}^{t+z} x_i^{p,s} + r_i \right) = 0 \quad \forall i \in \mathbf{I} \quad \forall t \in \mathbf{T}^i : t < T_i \quad (53)$$

$$(1 - \alpha_i^t) \cdot \left(\sum_{z=0}^{\min\{T_i-t, r_i-1\}} \prod_{s=t}^{t+z} x_i^{p,s} - \sum_{z=1}^{\min\{T_i-t, r_i-1\}} \prod_{s=t+1}^{t+z} x_i^{p,s} \right) \geq 0 \quad \forall i \in \mathbf{I} \quad \forall t \in \mathbf{T}^i : t < T_i \quad (54)$$

gdzie: r_i – minimalna długość odcinka czasu (jedynego, lub jednego z kilku przydzielonych do zadania) wchodzącego w skład czasu dysponowanego i -tego zadania [szt.],

α_i^t – zmienna pomocnicza (binarna) $\alpha_i^t \in \mathbf{A}$, $\mathbf{A} = [\alpha_i^{j,t}]_{I \times T_i - 1}$ warunkująca wykonanie ograniczenia w jednej z dwóch postaci: (53) lub (54). Zmienna ma interpretację:

$$\alpha_i^t = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli dla } i\text{-tego zadania, w odcinku czasu } t \text{ realizowane jest ograniczenie (53),} \\ 0, & \text{w przeciwnym przypadku - realizowane jest ograniczenie (54).} \end{cases}$$


Rys. 24. Przykład rozłożenia i -tego zadania w czasie a) bez zachowania ograniczeń (53), (54), b) z zachowaniem ograniczeń (53), (54).

Źródło: opracowanie własne.

Ograniczenie (7) Równoległe wykonywanie zadań

Ze względów technologicznych pewne zadania nie mogą odbywać się jednocześnie w tym samym czasie (np. odkładanie jednostek w strefie składowania przy jednoczesnym komisjonowaniu zamówień w tym samym korytarzu roboczym). W tym celu dla wybranych dwóch zadań i -tego oraz k -tego należących do zbioru zadań wprowadza się ograniczenie:

$$\exists i, k \in \mathbf{I} \quad x_i^{p,t} + x_k^{q,t} \leq 1, \quad \forall p, q \in \mathbf{P}, \quad \forall t \in \mathbf{T} \quad (55)$$

Podobnie może zachodzić konieczność równoległej realizacji zadań (np. kontrola każdej transportowanej jednostki materiału). W takim przypadku ograniczenie przyjmie postać:

$$\exists i, k \in \mathbf{I} \quad x_i^{p,t} + x_k^{q,t} = 2, \quad \forall p, q \in \mathbf{P}, \quad \forall t \in \mathbf{T} \quad (56)$$

Ograniczenie (8) Sekwencje zadań

Wybrane zadania w PTW mogą wykazywać wzajemną zależność w zakresie sekwencji wykonywania. W świetle przedstawionej w punkcie 3.2 specyfiki procesu transportu wewnętrznego sekwencjonowanie zadań może zachodzić na dwa sposoby:

- a) Po wykonaniu całości zadania i -tego (poprzedzającego, tj. λ_i^D powtórzeń cyklu transportowego zadania), można przystąpić do realizacji zadania k -tego (następującego, np. kontrola dostawy po zakończeniu rozładunku wszystkich jednostek itd.):

$$\exists i, k \in \mathbf{I} \quad \max_{[t \in \mathbf{T}]} \{t \cdot x_i^{p,t}\} < \min_{[t \in \mathbf{T}]} \{t \cdot x_k^{q,t} : x_k^{q,t} = 1\}, \quad \forall p, q \in \mathbf{P} \quad (57)$$

- b) W każdej chwili czasu t , w której wykonywane jest zadanie k -te (następujące), liczba zrealizowanych wcześniej powtórzeń (cykli) zadania i -tego (poprzedzającego) musi być większa co najmniej o χ_i od liczby zrealizowanych do tej pory powtórzeń zadania

k -tego. Po wykonaniu liczby χ_i powtórzeń zadania i -tego (poprzedzającego), można przystąpić do realizacji zadania k -tego (następującego):

$$\exists i, k \in \mathbf{I} \quad \left[\frac{\sum_{w=1}^t x_i^{p,w} \cdot \lambda_i^D}{\sum_{v \in T^i} x_i^{p,v}} \right] + \chi_i \geq \left[\frac{\sum_{z=1}^t x_k^{p,z} \cdot \lambda_k^D}{\sum_{s \in T^k} x_k^{p,s}} \right] \cdot x_k^{p,t} \quad \forall t \in \mathbf{T} \quad (58)$$

gdzie: λ_i^D – dobową liczbę powtórzeń i -tego zadania (poprzedzającego) [cykli/dobę],

λ_k^D – dobową liczbę powtórzeń k -tego zadania (następującego) [cykli/dobę],

χ_i – liczbę powtórzeń cyklu zadania i -tego (poprzedzającego), wyzwalamąca wykonanie zadania k -tego (następującego) [cykli].

Zgodnie z przykładami przedstawionymi w punktach 3.4 oraz 3.5 na rys. 19 (str. 85), zależności buforowania dwóch lub więcej zadań PTW może mieć różne postacie. Powyższe ograniczenia nie wyczerpują wszystkich możliwych przypadków, opisują jedynie te najczęściej spotykane w praktyce.

Ograniczenie (9) Pojemność buforów

Jeżeli dwa zadania $i, k \in \mathbf{I}$ są ze sobą w zależności buforowania (definicja w punkcie 3.4 str. 83) przy czym zadanie i -te jest poprzedzające dla zadania k -tego, oraz para (i, k) należy do zbioru \mathbf{Z}^b par zadań, które przypisane są do danego b -tego bufora ze zbioru \mathbf{B} , to:

$$\max_{\{t \in \mathbf{T}\}} \left\{ \sum_{(i,k) \in \mathbf{Z}^b} \left(\sum_{s=1}^t x_i^{p,s} \cdot \frac{\lambda_i^{Dp}}{\sum_{w \in T^i} x_i^{p,w}} - \sum_{s=1}^t x_k^{p,s} \cdot \frac{\lambda_k^{Dp}}{\sum_{w \in T^k} x_k^{p,w}} \right) + S^b \right\} \leq \Gamma^b \quad \forall b \in \mathbf{B} \quad (59)$$

gdzie: Γ^b – pojemność b -tego bufora [jednostek],

S^b – stan początkowy zapełnienia b -tego bufora [jednostek],

\mathbf{B} – zbiór buforów PTW, $b \in \mathbf{B}$,

\mathbf{Z}^b – zbiór par zadań, dla których zachodzi zależność buforowania dla b -tego bufora,

λ_i^{Dp} – dobową liczbę powtórzeń i -tego zadania, realizowanego przez zestaw p -tego typu [cykli/dobę].

Kwestia ujemnego „zapełnienia” buforów, która może pojawić się w pewnych przypadkach zgodnie ze wzorem (59), jest eliminowana przez zastosowanie ograniczenia nr (8) o sekwencji zadań. Uniemożliwia to taki przydział zadań w czasie, w którym zadanie następujące pobiera więcej jednostek niż dostarcza zadanie poprzedzające.

4.3. Funkcje celu zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW

Harmonogram będzie optymalny dla danego zadania logistycznego, kiedy koszty operacyjne realizacji PTW będą minimalne przy jednoczesnym zachowaniu wydajności układu. Wydajność w tym przypadku oznacza zdolność obsługi miarodajnych dobowych strumieni materiałów. Wydajność tą można poprawiać poprzez:

- zastosowanie wydajniejszych urządzeń transportu wewnętrznego (skrócenie czasu t_i),
- zmianę układu przestrzennego obiektu lub strategii lokowania materiałów,
- zmianę procesu przepływu materiałów idącą w kierunku minimalizowania liczby tzw. *touches* czyli miejsc zatrzymania jednostki i zmiany środka transportu generujących dodatkową pracochłonność,
- wydłużenie czasu dysponowanego pracy urządzeń t_{dbr} .

Harmonogram wpływa na stopień zaangażowania urządzeń oraz ludzi w procesie poprzez określanie czasu dysponowanego zadań oraz momentów ich rozpoczęcia i zakończenia. Stopień wykorzystania urządzeń może być definiowany jako stosunek dobowego czasu aktywności urządzeń do czasu pracy obiektu.

Najważniejsze kryteria oceny harmonogramu PTW to:

- pracochłonność sprowadzona procesem,
- stopień wykorzystania zainstalowanych urządzeń (wskaźnik organizacyjny),
- równomierność obciążenia pracą pracowników i urządzeń w ciągu doby,
- koszty operacyjne i eksploatacyjne pracy obiektu,
- liczba urządzeń i pracowników.

Funkcje kryterium

Zadanie optymalizacyjne może zostać rozwiązane względem dowolnej funkcji kryterium określającej jakość rozwiązania. Proponowane funkcje operują na:

- 1) Maksymalnej chwilowej pracochłonności sprowadzonej PTW (punkt 2.4, str. 57 oraz przykład str. 80). Pracochłonność rzeczywista procesu po rozłożeniu jej w czasie dysponowanym jest wyważana kosztem godziny pracy zestawu. Takie pracochłonności dla całego procesu można dodawać uzyskując wykres natężenia pracochłonności procesu w poszczególnych odcinkach czasu. Minimalizowanie największej z chwilowych wartości pracochłonności sprowadzonej oznacza ulepszanie rozłożenia zadań w czasie.

$$a) \quad F_{1a}(\mathbf{X}) = \max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in I^p} \frac{L_i^{Dp} \cdot x_i^{p,t} \cdot T \cdot k^p}{\sum_{s \in T^i} x_i^{p,s} \cdot l \cdot l_z \cdot k^b} \right\} \rightarrow \min_{[\mathbf{X}]} \quad (60)$$

gdzie: L_i^{Dp} – pracochłonność dobową wynikającą z realizacji i -tego zadania przez zasób

p -tego typu [r.h],

$l \cdot l_z$ – iloczyn liczby i długości zmiany roboczych na dobę [h],

T – liczność zbioru odcinków czasowych; liczba t -tych odcinków czasu,

k^p – koszt godziny pracy zasobu p -tego typu [zł/h],

k^b – koszt bazowy dla wyliczania wartości pracochłonności sprowadzonej, przy

czym: $k^b = \min_{[p \in P]} \{k^p\}$ [zł/h],

pozostałe symbole j/w.

Analogicznie funkcja ta może zostać przystosowana do oceny dobowej pracochłonności sprowadzonej pracy urządzeń (wzór (61)) lub ludzkiej (wzór (62)):

$$b) \quad F_{1b}(\mathbf{X}) = \max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in I^u} \frac{L_i^{Du} \cdot x_i^{u,t} \cdot T \cdot k^u}{\sum_{s \in T^i} x_i^{u,s} \cdot l \cdot l_z \cdot k^b} \right\} \rightarrow \min_{[\mathbf{X}]} \quad (61)$$

$$c) \quad F_{1c}(\mathbf{X}) = \max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in I^c} \frac{L_i^{Dc} \cdot x_i^{c,t} \cdot T \cdot k^c}{\sum_{s \in T^i} x_i^{c,s} \cdot l \cdot l_z \cdot k^b} \right\} \rightarrow \min_{[\mathbf{X}]} \quad (62)$$

gdzie: oznaczenia jak we wzorze (60), przy czym indeks górny p zastąpiono odpowiednio indeksami u – dla urządzeń oraz c – dla pracy ludzkiej.

- 2) Maksymalnym wykorzystaniu zainstalowanego potencjału technologicznego. Wielkość ta nazywana jest w literaturze ([28]) *wskaźnikiem organizacyjnym* (punkt 2.5). Liczba zainstalowanych urządzeń i zatrudnionych pracowników wynika z okresowego szczytu natężenia pracochłonności procesu. W pozostałych okresach część zainstalowanego potencjału pozostaje niewykorzystana (powierzchnia szarego pola na rys. 17d, str. 81). Minimalizowanie wielkości tego pola oznacza lepsze wykorzystanie urządzeń i pracowników i unikanie strat związanych z przestojami [28]. W tym przypadku funkcja celu może zostać sformułowana na dwa sposoby: a) maksymalizowanie wartości wskaźnika organizacyjnego wyrażonego jako stosunek odpowiednich pól na wykresie pracochłonności sprowadzonej procesu, b) minimalizowanie pola odpowiadającego niewykorzystaniu zainstalowanego potencjału na wykresie pracochłonności:

$$a) \quad F_{2a}(\mathbf{X}) = \frac{\sum_{i \in I} L_i^{Dp} \cdot \frac{k^p}{k^b}}{\max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in I} \frac{L_i^{Dp} \cdot x_i^{p,t} \cdot k^p}{\sum_{s \in T^i} x_i^{p,s} \cdot k^b} \right\} \cdot T} \rightarrow \max_{[X]} , \quad \text{przy czym } F_{2a}(\mathbf{X}) \in (0;1) \quad (63)$$

$$b) \quad F_{2b}(\mathbf{X}) = \left(\max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in I} \frac{L_i^{Dp} \cdot x_i^{p,t} \cdot k^p}{\sum_{s \in T^i} x_i^{p,s} \cdot k^b} \right\} \cdot T - \sum_{i \in I} L_i^{Dp} \cdot \frac{k^p}{k^b} \right) \rightarrow \min_{[X]} \quad (64)$$

gdzie: oznaczenia jak we wzorze (60).

3) Funkcję celu nr 2 można rozpatrywać także ze względu na wykorzystanie poszczególnych p -tych typów zasobów pracy. Wskaźnik organizacyjny wykorzystany w funkcji celu nr 2 liczony jest dla wszystkich typów urządzeń i kategorii pracy ludzkiej razem i wyznaczany jest dzięki możliwości sumowania pracochłonności sprowadzonych. Ze względów technologicznych wydaje się być uzasadnione ocenianie harmonogramu PTW ze względu na równomierność obciążenia pracą poszczególnych typów zasobów (wzór (65)). W tym celu należy wyliczyć wartości wskaźnika organizacyjnego dla każdego typu zasobu i wyważyć ją kosztem godziny pracy danego zasobu k^p . W ten sposób otrzymuje się miarę równomierności obciążenia pracą p -tych zasobów pracy:

$$a) \quad F_{3a}(\mathbf{X}) = \sum_{p \in P} \frac{\sum_{i \in I^p} L_i^{Dp} \cdot \frac{k^p}{\sum_{y \in P} k^y}}{\max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in I^p} \frac{L_i^{Dp} \cdot x_i^{p,t}}{\sum_{s \in T^i} x_i^{p,s}} \right\} \cdot T} \rightarrow \max_{[X]} , \quad \text{przy czym } F_{3a}(\mathbf{X}) \in (0;1) \quad (65)$$

gdzie: oznaczenia jak we wzorze (60).

Analogicznie funkcja ta może zostać przystosowana do oceny obciążenia pracą urządzeń (wzór (66)) lub kategorii pracy ludzkiej (wzór (67)):

$$b) \quad F_{3b}(\mathbf{X}) = \sum_{u \in U} \frac{\sum_{i \in I^u} L_i^{Du} \cdot \frac{k^u}{\sum_{y \in U} k^y}}{\max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in I^u} \frac{L_i^{Du} \cdot x_i^{u,t}}{\sum_{s \in T^i} x_i^{u,s}} \right\} \cdot T_i} \rightarrow \min_{[X]} , \quad \text{przy czym } F_{3b}(\mathbf{X}) \in (0;1) \quad (66)$$

$$c) \quad F_{3c}(\mathbf{X}) = \sum_{c \in C} \frac{\sum_{i \in I^c} L_i^{Dc} \cdot \frac{k^c}{\sum_{y \in C} k^y}}{\max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in I^c} \frac{L_i^{Dc} \cdot x_i^{c,t}}{\sum_{s \in T^t} x_i^{c,s}} \right\} \cdot T} \rightarrow \min_{[\mathbf{X}]}, \text{ przy czym } F_{3c}(\mathbf{X}) \in (0;1) \quad (67)$$

gdzie: $k^{u/c}$ – koszt godziny pracy urządzenia u -tego typu lub c -tej kat. pracy ludzkiej [zł/h],

$L_i^{Du/c}$ – rzeczywista dobowo pracochłonność realizacji zadań PTW wykonywanych przez u -ty typ urządzenia lub c -tą kategorię pracy ludzkiej [r.h].

pozostałe symbole j/w.

- 4) Naturalnym rozwinięciem ograniczenia (9) o pojemności buforów jest funkcja celu, minimalizująca niezbędne pojemności buforów w aspekcie harmonogramu PTW. Minimalizowanie pojemności buforów poprzez rozkładanie w czasie zadań tak, aby nie wykorzystywały danego bufora jednocześnie pozwala na oszczędność miejsca, które może zostać przeznaczone na inne zadania:

$$F_4(\mathbf{X}) = \sum_{b \in B} \left(\max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{(i,k) \in Z^b} \left(\lambda_i^{Dp} \cdot \frac{\sum_{s=1}^t x_i^{p,s}}{\sum_{w \in T^i} x_i^{p,w}} - \lambda_k^{Dq} \cdot \frac{\sum_{s=1}^t x_k^{q,s}}{\sum_{w \in T^k} x_k^{q,w}} \right) + S^b \right\} \right) \rightarrow \min_{[\mathbf{X}]} \quad (68)$$

gdzie: B – zbiór buforów PTW, $b \in B$,

S^b – stan początkowy wypełnienia b -tego bufora [jednostek],

Z^b – zbiór par zadań, dla których zachodzi zależność buforowania dla b -tego bufora,

λ_i^{Dp} – dobowo liczba powtórzeń i -tego zadania, realizowanego przez zestaw p -ty,

pozostałe symbole j/w.

Ocena harmonogramu poprzez ocenę wykorzystania powierzchni buforowych jest jednym z aspektów wielokryterialnej oceny funkcjonowania systemów logistycznych, czy też procesów transportu wewnętrznego [8].

Wybór funkcji celu będzie następował w odniesieniu do wymogów zadania. W przypadku braku możliwości wybrania jednej funkcji celu do oceny, można zastosować ocenę wielokryterialną bazując na wszystkich trzech funkcjach. W takim przypadku każdej z wymienionych funkcji należy przydzielić odpowiednie wagi i zastosować metodę oceny wielokryterialnej ([7], [46], [47]).

5. METODY ROZWIĄZANIA ZAGADNIENIA HARMONOGRAMOWANIA PROCESU TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO

5.1. Metody dokładne rozwiązania problemu harmonogramowania PTW

Deterministyczne zagadnienia harmonogramowania należą do klasy zagadnień optymalizacyjnych, które można rozwiązać metodami dokładnymi programowania liniowego i nieliniowego. Odnalezienie rozwiązań optymalnych takich zadań wymaga zastosowania algorytmów optymalizacyjnych. Jednakże nie dla wszystkich problemów optymalizacji możliwe jest skonstruowanie algorytmów o akceptowalnym, ograniczonym wielomianowo czasie rozwiązania. Wynika to z faktu, iż wiele zadań optymalizacyjnych należy do klasy problemów NP-trudnych. W takich przypadkach konieczne jest opracowanie algorytmów aproksymacyjnych generowania rozwiązań dopuszczalnych o cechach zaspokajających wymagania praktyki, jednak bez gwarancji na ich optymalność ([14], [16], [29], [76]).

Ogólny problem szeregowania zadań jest problem NP-trudnym i dotychczas nie wypracowano efektywnego algorytmu znajdowania rozwiązania optymalnego o czasie wielomianowym. Konstruuje się metody przybliżone rozwiązania umożliwiające wskazanie rozwiązanie dopuszczalne, a nawet zbliżonego do optimum w stosunkowo krótkim czasie. Algorytmy heurystyczne muszą mieć dobrze określone warunki zatrzymania oraz sposób generowania rozwiązania inicjującego proces.

Przeprowadzone eksperymenty potwierdzają znaczną złożoność obliczeniową proponowanego w rozdziale 4 podejścia. Wraz ze zwiększaniem rozmiaru danych wejściowych przykładu czas rozwiązania zadania metodami dokładnymi wzrasta znacząco (dokonane oszacowania wskazują na wykładniczy charakter funkcji czasu rozwiązania).

Metody dokładne, tj. dające jednoznaczne rozwiązanie optymalne, bądź wykazujące brak istnienia takich rozwiązań, nie będą możliwe do zastosowania ze względu na rozmiary przestrzeni stanów problemu. W tabeli 7 prezentowane są wyniki przeglądu pełnego możliwych układów harmonogramu dla jednego tylko zadania PTW przy 8-mio, 10-cio, 16-sto i 20-sto elementowym zbiorze odcinków czasu. Dla zbiorów 24-ro i 48-mio odcinkowych

podano wyliczenia. Dla każdego z prezentowanych zbiorów T rozważono minimalną długość przydzielanych do zadań przedziałów czasu r_i od 1 do odpowiednio 8, 10, 16 i 20 odcinków. Wartości wyróżnione w tabeli 7 zostały aproksymowane za pomocą krzywej potęgowej i zaprezentowane na rys. 25.

Tabela 7. Liczba możliwych przypadków układu harmonogramu wybranego zadania, w funkcji r_i i T

r_i	Liczba możliwych przypadków układu harmonogramu wybranego zadania					
	$T = 8$	$T = 10$	$T = 16$	$T = 20$	$T = 24$	$T = 48$
1	256	1 024	65 536	1 048 576	16 777 216	281 474 976 710 656
2	64	157	6 056	55 109	-	-
3	26	71	1 408	10 173	-	-
4	15	33	449	3 068	-	-
5	10	21	205	1 211	-	-
6	6	15	101	450	-	-
7	3	10	60	206	-	-
8	1	6	45	126	-	-
9	-	3	36	83	-	-
10	-	1	28	66	-	-
11	-	-	21	55	-	-
12	-	-	15	45	-	-
13	-	-	10	36	-	-
14	-	-	6	28	-	-
15	-	-	3	21	-	-
16	-	-	1	15	-	-
17	-	-	-	10	-	-
18	-	-	-	6	-	-
19	-	-	-	3	-	-
20	-	-	-	1	-	-

Źródło: opracowanie własne.

Wartości w tabeli 7 w zakolorowanych komórkach reprezentują sytuacje najczęściej spotykane w rzeczywistym harmonogramowaniu PTW:

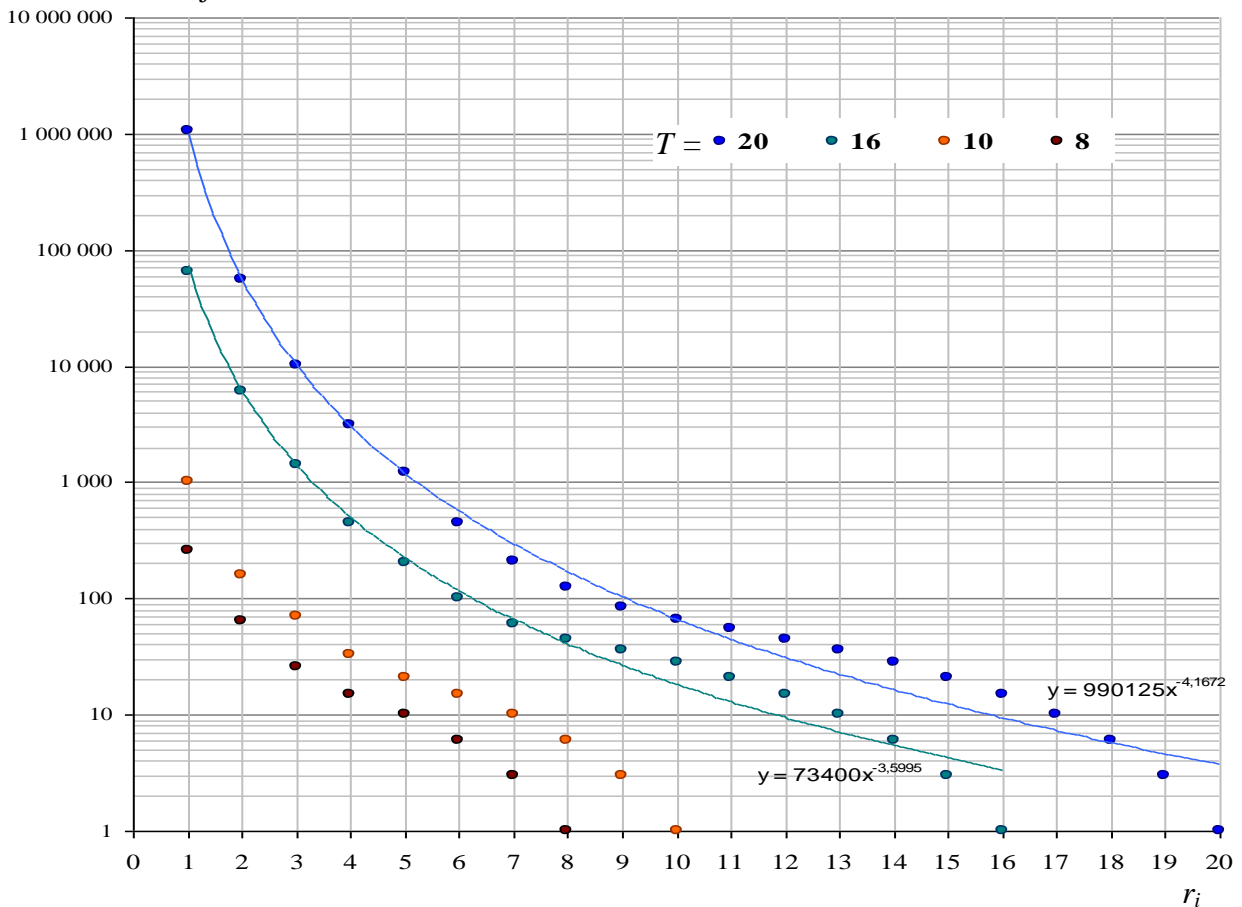
- $T = 8$: jedna ośmiogodzinna zmiana pracy (ziarnistość 1,0 h),
- $T = 16$: jedna ośmiogodzinna zmiana pracy (ziarnis. 0,5 h) lub dwie zmiany (ziarnis. 1,0 h),
- $T = 24$: trzy zmiany pracy (ziarnistość 1,0 h),
- $T = 48$: trzy zmiany pracy (ziarnistość 0,5 h).

Przy metodzie przeglądu zupełnego dla prostego przykładu, obejmującego 10-cio elementowy zbiór I zadań PTW, 8-mio elementowy zbiór odcinków czasu T przy nieograniczonej długość odcinka minimalnego r , należałoby rozpatrzeć 256^{10} wariantów harmonogramu PTW. Poczynione dodatkowo założenie, że ograniczenia technologiczne zmniejszą przestrzeń stanów zagadnienia milion-krotnie nie rozwiązuje problemu.

Zmienna decyzyjna w problemie przyjmuje wartość binarną, jednak liczba zmiennych wynika z iloczynu wymiarów macierzy zmiennych decyzyjnych \mathbf{X} , która w tym przypadku

jest dwuwymiarowa. Wersja decyzyjna prezentowanego problemu optymalizacyjnego jest NP-zupełna, tak więc zadanie jest problemem NP-trudnym ([6], [81]).

liczba kombinacji



Rys. 25. Liczba możliwych kombinacji układu harmonogramu dla jednego zadania, w funkcji r_i oraz T

Źródło: opracowanie własne.

Zwiększanie liczności zbioru zadań PTW będzie skutkowało wykładniczym wzrostem liczby możliwych rozwiązań przy czym stosowane ograniczenia redukują rozległość problemu co najwyżej wielomianowo. Zwiększanie liczby odcinków czasowych T oraz wyeliminowanie ograniczenia o minimalnej długości r_i odcinka dodatkowo zwiększa wykładniczo podstawę potęgi, na co wskazują przeprowadzone eksperymenty.

5.2. Programowanie matematyczne a zagadnienie harmonogramowania PTW

W celu rozwiązania zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW zastosowano oprogramowanie LINGO 9.0. Jest to kompleksowe narzędzie przeznaczone do budowania i rozwiązywania liniowych, nieliniowych, całkowitoliczbowych i globalnych modeli optymalizacyjnych. LINGO 9.0 zawiera zestaw tzw. *solverów* wykorzystujących metody rozwiązywania układów równań metodami dokładnymi i heurystycznymi.

Podjęto próbę wykorzystania narzędzi LINGO do rozwiązania problemu harmonogramowania PTW z rozdziału 4. Przykład obliczeniowy obejmował: zbiór zadań PTW; $I = \{1,2,3,4\}$, zbiór odcinków czasu $T = \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$ oraz zbiór typów urządzeń $U = \{1,2\}$. Koszty godziny pracy urządzeń wynoszą odpowiednio $k^1 = 10$ zł/h, $k^2 = 15$ zł/h. Urządzenia na stałe przypisane są do zadań, a zadania opisane są przez dobowe pracochłonności rzeczywiste, przy czym: $L_1^{D1} = 40$ r.h, $L_2^{D2} = 30$ r.h, $L_3^{D1} = 15$ r.h, $L_4^{D1} = 50$ r.h. Na podstawie wzorów (11) i (13) wyznaczono pracochłonności sprowadzone procesu, i tak: $L_1^{D1} = 40$ r.h, $L_2^{D2} = 45$ r.h, $L_3^{D1} = 15$ r.h, $L_4^{D1} = 55$ r.h. Zastosowano wyłączenie ograniczenia na czas dysponowany zadań (wg wzoru (49)), przy czym:

$$6 > \sum_{t \in T} x_1^{1,t} > 0; \quad 6 > \sum_{t \in T} x_2^{2,t} > 0; \quad \sum_{t \in T} x_3^{1,t} > 3; \quad \sum_{t \in T} x_4^{1,t} > 0.$$

Ponadto w programie wprowadzono ograniczenie co do binarności zmiennych decyzyjnych $x_i^{p,t}$. Rozważono funkcję celu minimalizującą wartość pracochłonności sprowadzonej procesu daną wzorem (60). Kod źródłowy zadania w programie wyglądał następująco:

```

model: title harm;

min = p1;

p1 = @smax(c1,c2,c3,c4,c5,c6,c7,c8);
      !40rh;          !45rh;          !15rh;
c1 = ((40*x11)/o1+   (45*x21)/o2+   (15*x31)/o3+   (55*x41)/o4);
c2 = ((40*x12)/o1+   (45*x22)/o2+   (15*x32)/o3+   (55*x42)/o4);
c3 = ((40*x13)/o1+   (45*x23)/o2+   (15*x33)/o3+   (55*x43)/o4);
c4 = ((40*x14)/o1+   (45*x24)/o2+   (15*x34)/o3+   (55*x44)/o4);
c5 = ((40*x15)/o1+   (45*x25)/o2+   (15*x35)/o3+   (55*x45)/o4);
c6 = ((40*x16)/o1+   (45*x26)/o2+   (15*x36)/o3+   (55*x46)/o4);
c7 = ((40*x17)/o1+   (45*x27)/o2+   (15*x37)/o3+   (55*x47)/o4);
c8 = ((40*x18)/o1+   (45*x28)/o2+   (15*x38)/o3+   (55*x48)/o4);

o1 = (x11+x12+x13+x14+x15+x16+x17+x18);
o2 = (x21+x22+x23+x24+x25+x26+x27+x28);
o3 = (x31+x32+x33+x34+x35+x36+x37+x38);
o4 = (x41+x42+x43+x44+x45+x46+x47+x48);

!Minimalny czas dysponowany tdi;
o1 < 6; !urządzenie 1;
o2 < 6; !urządzenie 2;
o3 > 3; !urządzenie 1;
o1 > 0; !urządzenie 1;
o2 > 0; !urządzenie 1;
o4 > 0; !urządzenie 1;

!Binarność zmiennych decyzyjnych;
@bin(x11); @bin(x12); @bin(x13); @bin(x14); @bin(x15); @bin(x16); @bin(x17); @bin(x18);
@bin(x21); @bin(x22); @bin(x23); @bin(x24); @bin(x25); @bin(x26); @bin(x27); @bin(x28);
@bin(x31); @bin(x32); @bin(x33); @bin(x34); @bin(x35); @bin(x36); @bin(x37); @bin(x38);
@bin(x41); @bin(x42); @bin(x43); @bin(x44); @bin(x45); @bin(x46); @bin(x47); @bin(x48);

End

```

Powyższy przykład jest jednym z serii badanych przykładów. Czas wykonania obliczeń (procesor 2,6 GHz, 1 GB RAM) wynosił od 5 min do ok. 17 h, w zależności od użytych *solverów* i sposobu sformułowania zadania. Czas obliczeń powyższego przykładu wynosił 3 h 40 min. Wygenerowane wyniki, przy wartości funkcji kryterium 19,61 r.h miały postać:

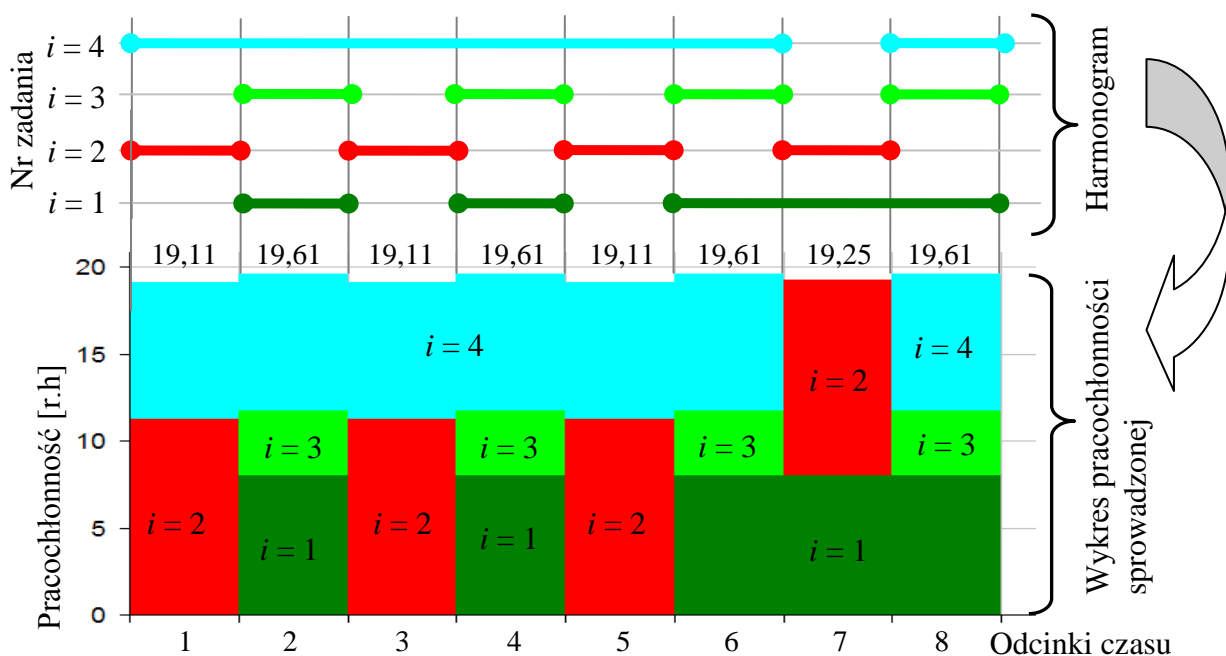
```

Global optimal solution found.
Objective value:      19.60714
Extended solver steps:1199
Total solver iterations:      21770786
Model Title: harm

```

Variable	Value	Variable	Value	Variable	Value
P1	19.60714	X41	1.000000	X35	0.000000
C1	19.10714	O4	7.000000	X45	1.000000
C2	19.60714	X12	1.000000	X16	1.000000
C3	19.10714	X22	0.000000	X26	0.000000
C4	19.60714	X32	1.000000	X36	1.000000
C5	19.10714	X42	1.000000	X46	1.000000
C6	19.60714	X13	0.000000	X17	1.000000
C7	19.25000	X23	1.000000	X27	1.000000
C8	19.60714	X33	0.000000	X37	0.000000
X11	0.000000	X14	1.000000	X47	0.000000
O1	5.000000	X24	0.000000	X18	1.000000
X21	1.000000	X34	1.000000	X28	0.000000
O2	4.000000	X44	1.000000	X38	1.000000
X31	0.000000	X15	0.000000	X48	1.000000
O3	4.000000	X25	1.000000		

Interpretacja graficzna wyników została przedstawiona na rys. 26.

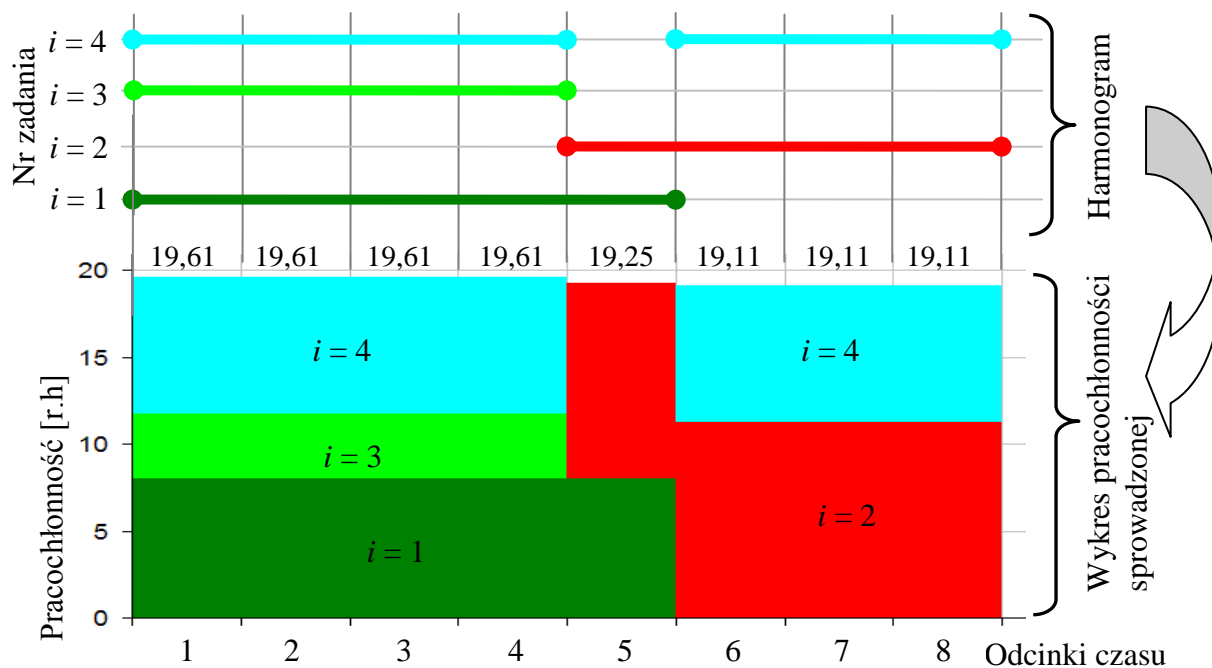


Rys. 26. Interpretacja wyników uzyskanych w programie LINGO dla danych przykładowych
 Źródło: opracowanie własne.

Należy zauważyć, że wskutek obliczeń otrzymano rozwiązanie o cechach zbliżonych do optymalnego ze względu na wartość funkcji celu (metoda *branch & bound*, tj. podziału *i* ograniczeń). Jednakże ze względu na rozdrobnienie przydzielanych odcinków czasu jest ono niepraktyczne. W celu skorygowania takiego działania programu należałoby wprowadzić ograniczenie dotyczące ziarnistości harmonogramu (wzory (53) i (54)). Próby wprowadzania tego ograniczenia skutkowały nieokreślonym wydłużeniem czasu obliczeń lub błędnymi wynikami – w zależności od przykładu i sposobu sformułowania danych. Pozwala to na wysnucie wniosku, że implementacja kolejnych ograniczeń będzie zwiększała prawdopodobieństwo nieefektywności obliczeń lub rozwiązań nieracjonalnych lub błędnych.

Przypadki rzeczywiste harmonogramów PTW nie są możliwe do rozwiązania za pomocą narzędzi oferujących rozwiązania dokładne. Dlatego też zasadne jest opracowanie algorytmu aproksymacyjnego generowania racjonalnych rozwiązań dopuszczalnych.

Na rys. 27 przedstawiono rozwiązanie intuicyjne dla danych przykładowych. Rozwiązanie to jest racjonalne ze względów technologicznych.



Rys. 27. Rozwiązanie intuicyjne dla danych przykładowych

Źródło: opracowanie własne.

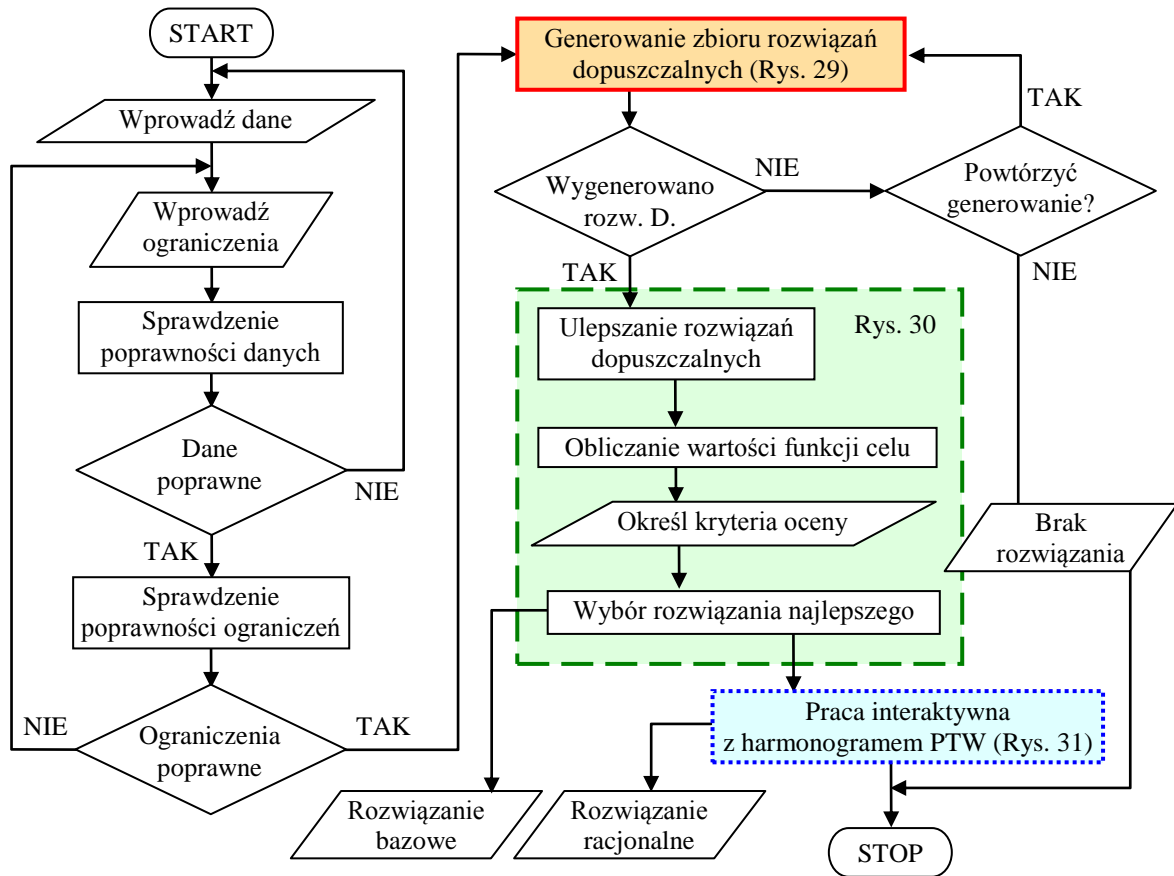
5.3. Algorytm aproksymacyjny rozwiązania zagadnienia harmonogramowania PTW

■ Podstawy algorytmu

Ze względu na rozmiary zagadnienia wykorzystanie metod dokładnych rozwiązania sformułowanego w rozprawie zadania optymalizacyjnego nie jest racjonalne, a w przypadku większych przykładów – możliwe. Stąd znacznie ograniczone są środki uzyskania rozwiązania optymalnego, a generowane rozwiązania mogą być co najwyżej racjonalne (suboptymalne). Uzyskanie rozwiązań racjonalnych będzie dokonywane przez wyznaczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych spełniających ograniczenia harmonogramu PTW i wybór spośród nich rozwiązania najlepszego przy zadanych kryteriach wyboru.

Przy rozbudowanych problemach harmonogramowania PTW wyznaczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych jest trudne ze względu na dużą liczbę ograniczeń i rozmiary przestrzeni stanów problemu. Na rys. 28 zaproponowano algorytm postępowania dla

przybliżonego rozwiązania problemu harmonogramowania PTW, który będzie m.in. realizowany przez aplikację komputerową SCHED.



Rys. 28. Algorytm przybliżonego rozwiązania problemu harmonogramowania PTW

Źródło: opracowanie własne.

Dla zadania optymalizacyjnego problemu harmonogramowania PTW sformułowanego w punkcie 4.1 i jego ograniczeń sformułowanych w punkcie 4.2 możliwe jest wyznaczenie zbioru \mathbf{XRD} rozwiązań dopuszczalnych spełniających ograniczenia O :

$$\mathbf{XRD} = \left\{ \left(\mathbf{X}_d : O_1 \wedge O_2 \wedge O_3 \wedge O_4 \wedge O_5 \wedge O_6 \wedge O_7 \wedge O_8 \wedge O_9 \right)^d ; d = 1, 2, \dots, D \right\} \quad (69)$$

gdzie: \mathbf{X}_d – d -te rozwiązanie dopuszczalne problemu harmonogramowania PTW,

O_{1-9} – ograniczenia problemu harmonogramowania PTW dane wzorami (47) – (59), opisane szczegółowo w punkcie 4.2.

Dla każdego rozwiązania dopuszczalnego \mathbf{X}_d zostaje obliczona wartość funkcji celu $F_{1a}(\mathbf{X}_d), F_{1b}(\mathbf{X}_d), F_{1c}(\mathbf{X}_d), F_{2a}(\mathbf{X}_d), F_{3a}(\mathbf{X}_d), F_{3b}(\mathbf{X}_d), F_{3c}(\mathbf{X}_d), F_4(\mathbf{X}_d)$ danych wzorami (60) – (68) i zdefiniowanych w punkcie 4.3. Każdej funkcji celu przyporządkowane są wagi z zakresu $w \in \langle 0; 1 \rangle$ ustalane przez projektanta, przy czym $w_{1a} + w_{1b} + w_{1c} + w_{2a} + w_{3a} + w_{3b} +$

$w_{3c} + w_4 = 1$. Dla każdego d -tego rozwiązania dopuszczalnego oblicza się wartość h_d określającą jakość harmonogramu PTW:

$$\begin{aligned}
 h_d = & w_{1a} \cdot \frac{\min_{\mathbf{X} \in \mathbf{XRD}} \{F_{1a}(\mathbf{X})\}}{F_{1a}(\mathbf{X}_d)} + w_{1b} \cdot \frac{\min_{\mathbf{X} \in \mathbf{XRD}} \{F_{1b}(\mathbf{X})\}}{F_{1b}(\mathbf{X}_d)} + w_{1c} \cdot \frac{\min_{\mathbf{X} \in \mathbf{XRD}} \{F_{1c}(\mathbf{X})\}}{F_{1c}(\mathbf{X}_d)} + w_{2a} \cdot \frac{F_{2a}(\mathbf{X}_d)}{\max_{\mathbf{X} \in \mathbf{XRD}} \{F_{2a}(\mathbf{X})\}} + \\
 & + w_{3a} \cdot \frac{F_{3a}(\mathbf{X}_d)}{\max_{\mathbf{X} \in \mathbf{XRD}} \{F_{3a}(\mathbf{X})\}} + w_{3b} \cdot \frac{F_{3b}(\mathbf{X}_d)}{\max_{\mathbf{X} \in \mathbf{XRD}} \{F_{3b}(\mathbf{X})\}} + w_{3c} \cdot \frac{F_{3c}(\mathbf{X}_d)}{\max_{\mathbf{X} \in \mathbf{XRD}} \{F_{3c}(\mathbf{X})\}} + w_4 \cdot \frac{\min_{\mathbf{X} \in \mathbf{XRD}} \{F_4(\mathbf{X})\}}{F_4(\mathbf{X}_d)}
 \end{aligned} \tag{70}$$

$$\forall \mathbf{X}_d \in \mathbf{XRD}$$

gdzie: \mathbf{XRD} – zbiór rozwiązań dopuszczalnych; $\mathbf{X} \in \mathbf{XRD}$,
pozostałe oznaczenia w tekście.

Praktycznie należy dokonać wyboru funkcji celu, które będą użyte. W takim przypadku wybrane funkcje będą miały niezerowe wagi w , zaś pozostałe funkcje wagi zerowe, co spowoduje ich wyłączenie. Ocena przeprowadzana na wszystkich jednocześnie funkcjach celu może prowadzić do dopuszczania rozwiązań nieracjonalnych, gdyż skrajne wartości niektórych funkcji mogą zostać zmarginalizowane przez wartości pozostałych.

Wskaźnik h_d przyjmuje wartości z zakresu $h_d \in (0;1)$, przy czym wartość 1 oznacza najlepsze możliwe z dopuszczalnych rozwiązań (tj. takie, dla którego wszystkie funkcje celu osiągają wartość ekstremalną). d -ty harmonogram, dla którego wskaźnik h_d osiągnął największą wartość, będzie najlepszym ze względu na przypisane wagi spośród wygenerowanych harmonogramów dopuszczalnych. Nie istnieje pewność co do optymalności harmonogramu, jednakże przy wygenerowaniu odpowiednio dużej liczby rozwiązań dopuszczalnych można stwierdzić, że będzie on racjonalny i będzie spełniał wymogi praktyki.

Ostatecznym kryterium oceny projektu obiektu logistycznego są koszty, a zwłaszcza koszty realizacji PTW. Każde rozwiązanie spełniające ograniczenia będzie charakteryzowało się parametrami kosztowymi, takimi jak: roczny koszt operacyjny pracy ludzi i urządzeń, roczny koszt eksploatacyjny pracy urządzeń oraz odpowiednie koszty dobowe. Koszty te w sumie składają się na roczny koszt realizacji PTW. W związku z tym dodatkowym kryterium wyboru najlepszego rozwiązania dopuszczalnego są roczne koszty realizacji PTW. Jednakże sformułowanie odpowiedniej kosztowej funkcji kryterium zadania optymalizacyjnego musiałoby uwzględnić bardzo dużo czynników. Taka funkcja celu mogłaby być niepraktyczna. Dzięki zastosowaniu programu SCHED można obliczyć koszty realizacji PTW w danym wariantcie natychmiastowo i wykorzystywać je do porównań.

Do obliczenia tych kosztów należy posłużyć się metodyką przedstawioną w punkcie 2.4 (str. 61). Program SCHED oblicza koszt realizacji PTW wyrażony wzorem (37), czyli roczny koszt eksploatacyjny uproszczony K_{Eupr}^R .

■ Kroki algorytmu

Na rys. 28 zapisano w postaci blokowej algorytm przybliżonego rozwiązania zadania optymalizacyjnego. Algorytm składa się z podstawowych etapów:

1. Formułowanie danych projektowych.
2. Wybór i parametryzacja ograniczeń zbioru rozwiązań dopuszczalnych (rys. 29).
3. Generowanie zbioru rozwiązań dopuszczalnych \mathbf{XRD} zgodnie z algorytmem z rys. 29.
4. Poprawa wygenerowanych rozwiązań dopuszczalnych przez dopełnianie harmonogramów PTW zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 30.
5. Wybór rozwiązania dopuszczalnego ze zbioru \mathbf{XRD} o najwyższej wartości parametru h_d zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 30.
6. Praca interaktywna z wybranym rozwiązaniem w celu poprawy tego rozwiązania zgodnie z algorytmem przedstawionym na rys. 31.

Symbole użyte w schematach blokowych na rysunkach przedstawiono w tekście.

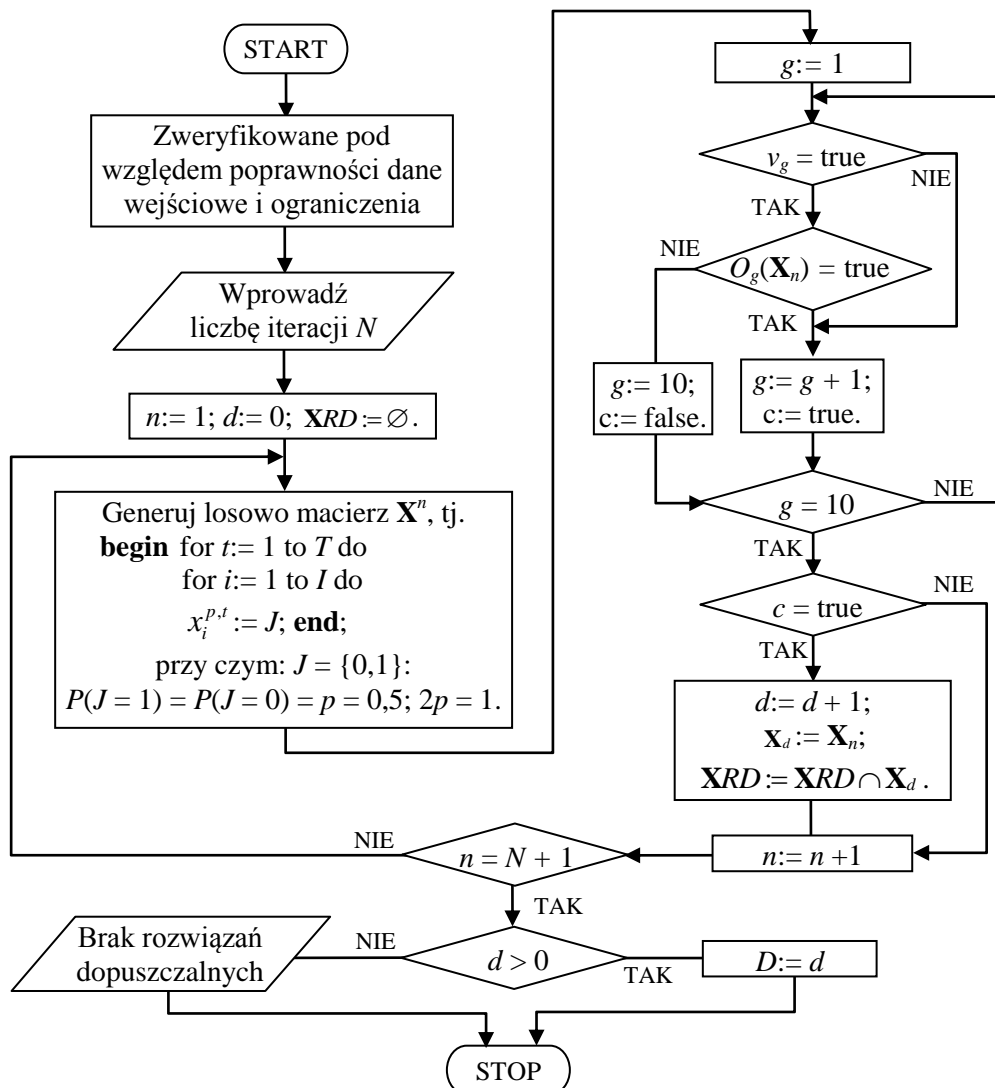
Generowanie rozwiązań bazowych \mathbf{X}_d

Generowanie zbioru rozwiązań dopuszczalnych \mathbf{XRD} odbywa się poprzez losowe przypisanie wartości zmiennym decyzyjnym $x_i^{p,t}$ macierzy rozwiązania \mathbf{X}_n , gdzie n jest numerem iteracji algorytmu losowania. Liczba iteracji N wprowadzana jest przez użytkownika. Każde rozwiązanie \mathbf{X}_n jest weryfikowane co do spełnienia ograniczeń. Algorytm generowania zbioru rozwiązań dopuszczalnych przedstawiono na rys. 29.

Wybór ograniczeń problemu następuje poprzez nadanie wartości parametrowi logicznemu v_g dla każdego z dziewięciu ograniczeń sformułowanych w punkcie 4.2. Parametry logiczne $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9$ przyjmują wartość PRAWDA, jeżeli dane ograniczenie jest rozważane, oraz FAŁSZ jeżeli nie jest.

Każde ograniczenie jest weryfikowane przez program SCHED w drodze realizacji kolejnych, oddzielnych algorytmów w pętli iteracyjnej. Algorytmy weryfikujące ograniczenia $O_g(\mathbf{X}_n)$ zwracają wartość PRAWDA, jeżeli ograniczenie jest zachowane oraz FAŁSZ, jeżeli nie jest. W przypadku rozwiązania, dla którego wykryto pierwszy przypadek niewypełnienia ograniczenia, pętla jest przerywana i następuje kolejne losowanie rozwiązania \mathbf{X}_n . Jeżeli

rozwiązanie spełnia wszystkie ograniczenia zostaje dodane do zbioru rozwiązań dopuszczalnych \mathbf{XRD} , będących rozwiązaniami *bazowymi* dla następnego kroku algorytmu.



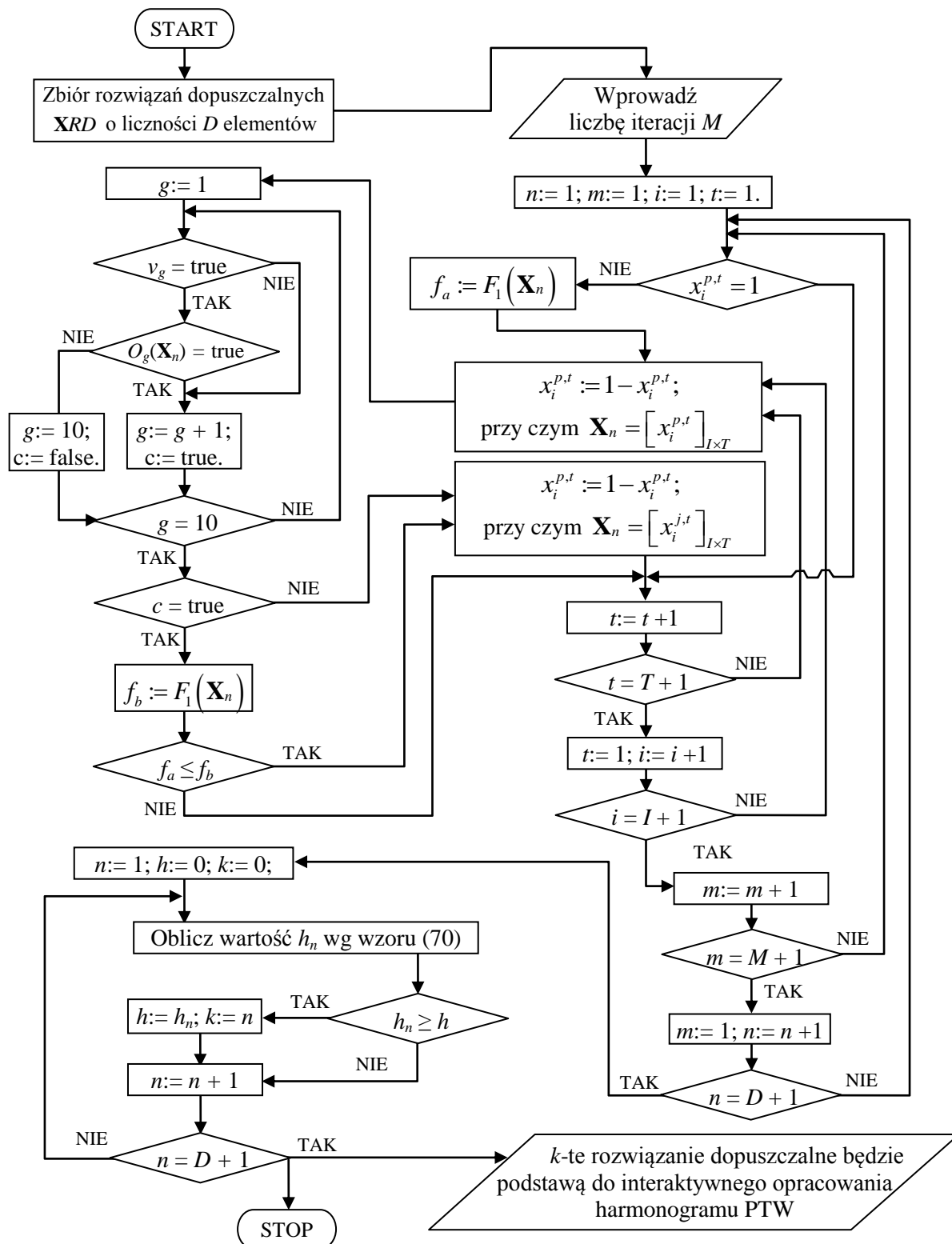
Rys. 29. Algorytm generowania zbioru rozwiązań dopuszczalnych zadania optymalizacyjnego
Źródło: opracowanie własne.

Poprawa bazowych rozwiązań dopuszczalnych \mathbf{X}_d

Algorytm poprawy rozwiązań dopuszczalnych problemu harmonogramowania PTW i wyboru rozwiązania do dalszego opracowania przedstawiono na rys. 30.

Harmonogramy \mathbf{X}_d wygenerowane losowo nie spełniają wymogów praktyki i faktycznie nie zbliżają się do optymalnych. Możliwe jest ulepszenie tych rozwiązań. Poprawa rozwiązań bazowych odbywa się przez *dopełnianie* harmonogramu. Dopełnianie polega na wyszukiwaniu kolejno zmiennych $x_i^{p,t}$ o wartości 0 i przypisywaniu im wartości 1. Jeżeli wartości funkcji celu minimalizującej chwilową pracochłonności procesu (wzór (60)) dla tak zmodyfikowanego harmonogramu jest mniejsza niż przed zmianą lub nie zmienia się,

to należy przejść do następnej zmiennej o wartości 0 i powtórzyć działanie. Jeżeli wartość funkcji celu zwiększa się, należy powrócić do pierwotnej wartości $x_i^{p,t}$, poszukać następnej w kolejności zmiennej o wartości 0 i powtórzyć działanie.



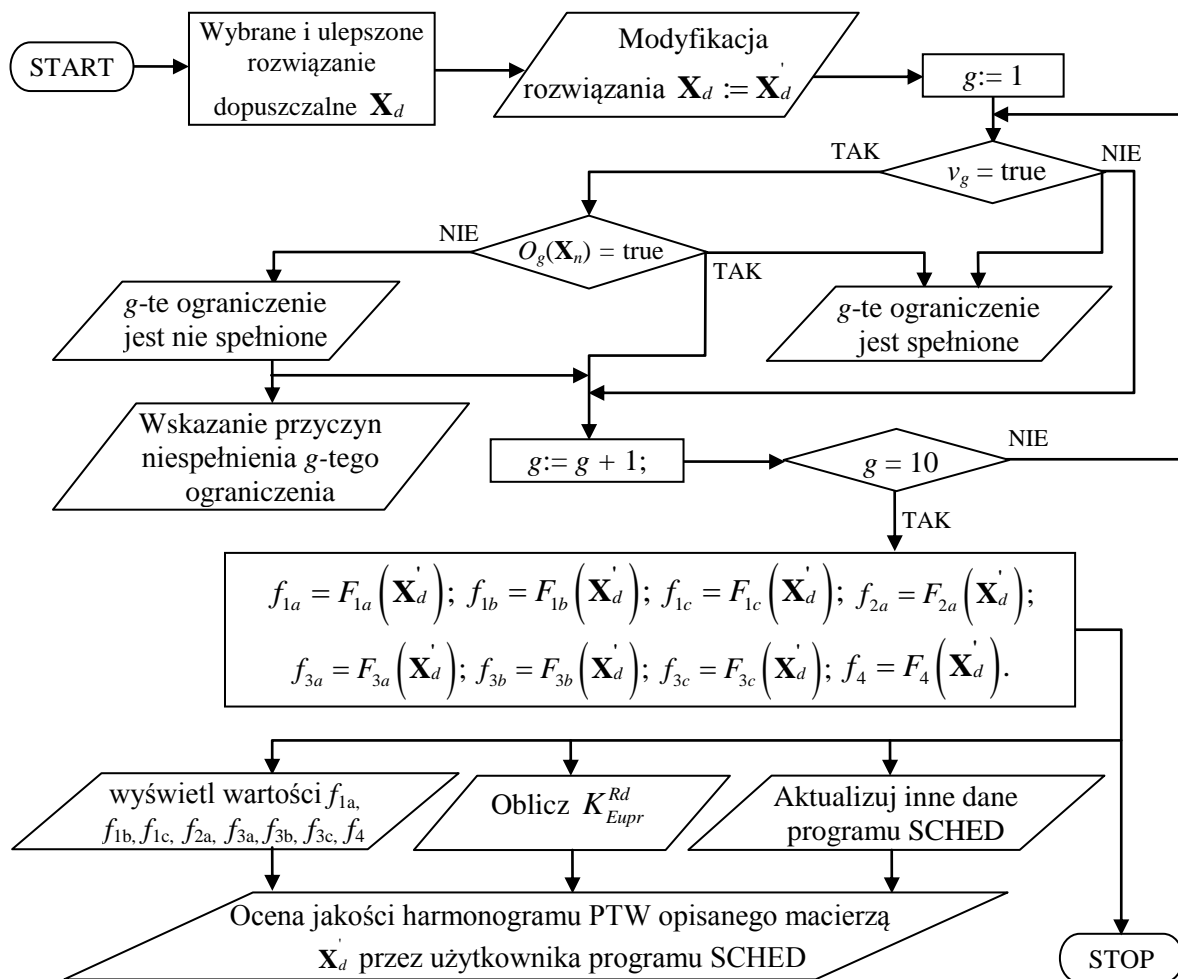
Rys. 30. Algorytm poprawy rozwiązań dopuszczalnych problemu harmonogramowania PTW i wyboru rozwiązania do dalszego opracowania

Źródło: opracowanie własne.

Możliwa jest modyfikacja algorytmu ulepszania zgodnie ze wskazówkami konstruowania harmonogramów PTW zawartymi w punkcie 3.3. Dopełnianie znacznie poprawia jakość harmonogramu PTW, jednakże jest to metoda mechaniczna nie uwzględniająca charakteru pracy obiektu logistycznego. W celu racjonalizacji rozwiązania należy wykonać pracę interaktywną z harmonogramem w aplikacji SCHED.

■ **Praca interaktywna z rozwiązaniem dopuszczalnym**

Na rys. 31 przedstawiono algorytm działania programu SCHED w zakresie pracy interaktywnej z harmonogramem PTW. Głównym zadaniem programu jest umożliwienie szybkiego wprowadzania zmian w harmonogramie i parametrach PTW oraz informowanie użytkownika o sytuacji, kiedy ograniczenia nie są spełnione. Informacja taka może być wykorzystana jako *sugestia* do dokonania zmian w procesie transportu wewnętrznego lub jego ograniczeniach w celu ulepszenia procesu poprzez ulepszenie jego harmonogramu.



Rys. 31. Algorytm pracy interaktywnej z harmonogramem PTW

Źródło: opracowanie własne.

Harmonogram opisany przez najlepsze z rozwiązań poprawionych, wraz z danymi charakteryzującymi proces transportu wewnętrznego posłuży do konstruowania wykresu pracochłonności sprowadzonej procesowi lub wykresów pracochłonności rzeczywistej.

Na podstawie oceny takich wykresów oraz oceny realizacji ograniczeń i wartości funkcji celu można wnioskować jakich zmian należy dokonać w harmonogramie, aby przekształcić rozwiązanie dopuszczalne w racjonalne: $\mathbf{X}_d := \mathbf{X}'_d$. Rozwiązanie \mathbf{X}'_d może stać się rozwiązaniem racjonalnym jeżeli ulegnie poprawa jakości harmonogramu PTW przy zachowaniu ograniczeń. Poniżej, na danych przykładowych z punktu 5.2, przedstawiono główne rodzaje działań podejmowanych w celu ulepszenia harmonogramu PTW:

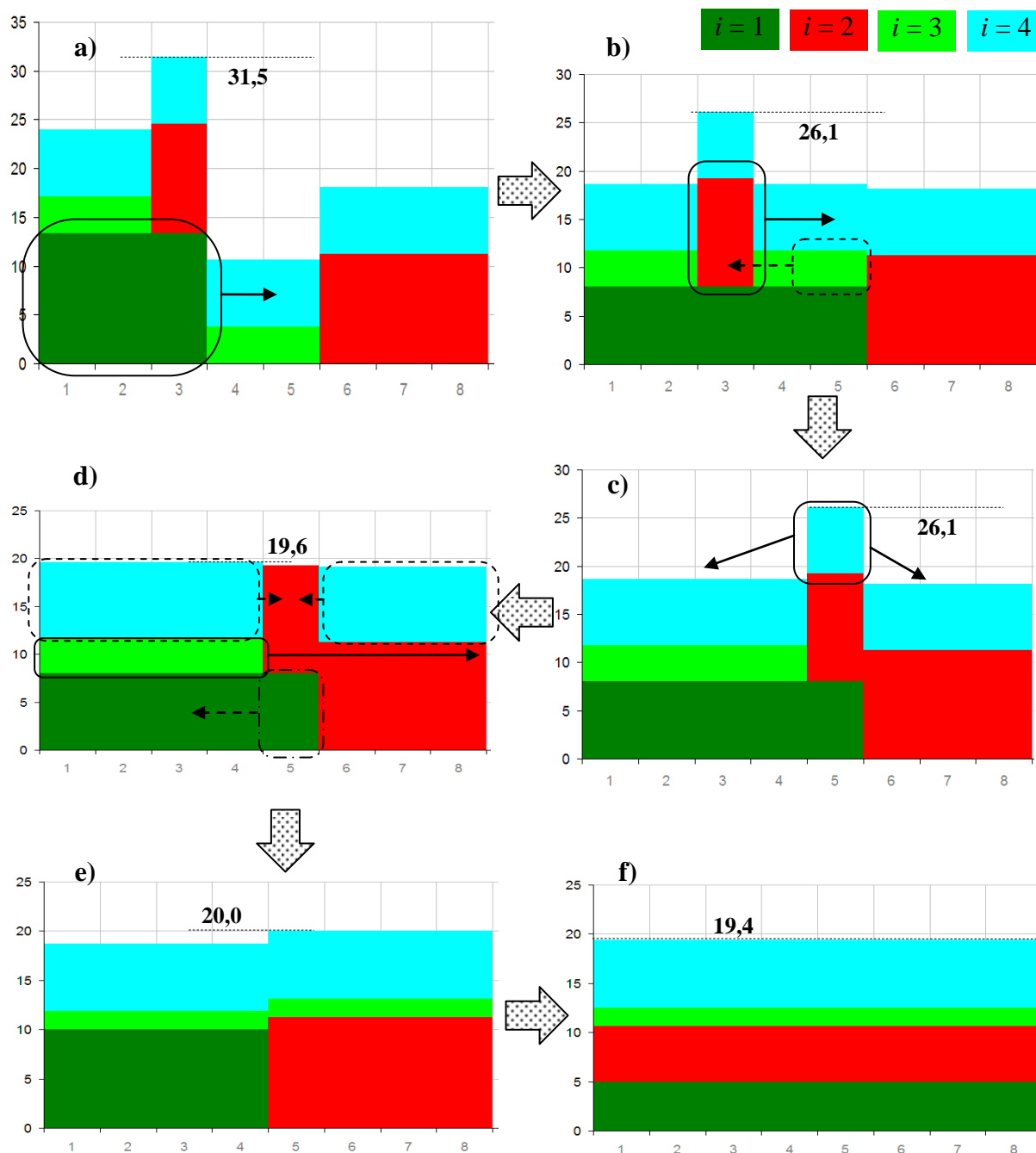
Maksymalizacja długości czasu dysponowanego dla i -tych zadań. Dotyczy to szczególnie zadań o dużej wartości pracochłonności sprowadzonej. W tym celu należy wybrać te zadania, które składają się na maksymalne wartości chwilowe pracochłonności sprowadzonej procesowi. Na rys. 32a wartość ta występuje przy $t = 3$. W związku z tym sugerowane jest przydzielenie do zadania $i = 1$ dwóch dodatkowych odcinków czasu $t = 4$ i $t = 5$. Efektem jest zmniejszenie wartości maksymalnej pracochłonności z 31,5 r.h do 26,1 r.h. Ograniczenia pozostają zachowane.

Konsolidacja odcinków czasu przydzielonych do i -tych zadań w możliwie długie, jednorodne odcinki. Na rys. 32b widoczne są dwa zadania $i = 2$ oraz $i = 3$, które są podzielone na odcinki. Na rys. 32c pokazano te zadania skonsolidowane, przy czym wartość maksymalna pracochłonności pozostaje niezmienną i wynosi 26,1 r.h. W ogólności, jeżeli nie ma innych przesłanek, należy dążyć do konsolidacji odcinków czasu dysponowanego (por. także wykresy na rys. 26 i na rys. 27).

Rozproszenie zadania i -tego w celu zmniejszenia wartości maksymalnej pracochłonności sprowadzonej procesowi. Na rys. 32c widoczne jest, że zadanie $i = 4$ w chwili $t = 5$ jest odpowiedzialne za pik natężenia pracochłonności. W chwili $t = 5$ wykonywane są także dwa inne zadania, jednakże mają one znacznie większą wartość pracochłonności i rezygnacja z realizacji tych zadań w chwili $t = 5$ spowodowałaby znaczny przyrost wartości pracochłonności w innych miejscach wykresu. Rozproszenie zadania $i = 4$ w chwili $t = 5$ spowoduje wzrost wartości pracochłonności w otoczeniu tej chwili. Wzrost ten jednakże będzie mniejszy niż w przypadku innych zadań i pozwoli na otrzymanie „płaskiej” linii wykresu czyli kształtu pożądanego. Chwilowa wartość maksymalna pracochłonności sprowadzonej wyniesie 19,6.

Na rys. 32d przedstawiono wykres pracochłonności o cechach racjonalnych, tj. o najniższej pracochłonności i technologicznie poprawny. Możliwe jest dokonanie zmian

w tym wykresie poprzez jednoczesną maksymalizację czasu dysponowanego i konsolidację odcinków czasu przydzielonych do zadania $i = 4$. W związku z tą operacją maksymalna pracochłonność sprowadzona wzrosła do 20,0, jednakże uzyskany kształt będzie oznaczał proces lepszy technologicznie. Ograniczenia w tym przypadku pozostają zachowane.



Rys. 32. Praca z wykresem dobowej pracochłonności sprowadzonej PTW – przykład

Źródło: opracowanie własne.

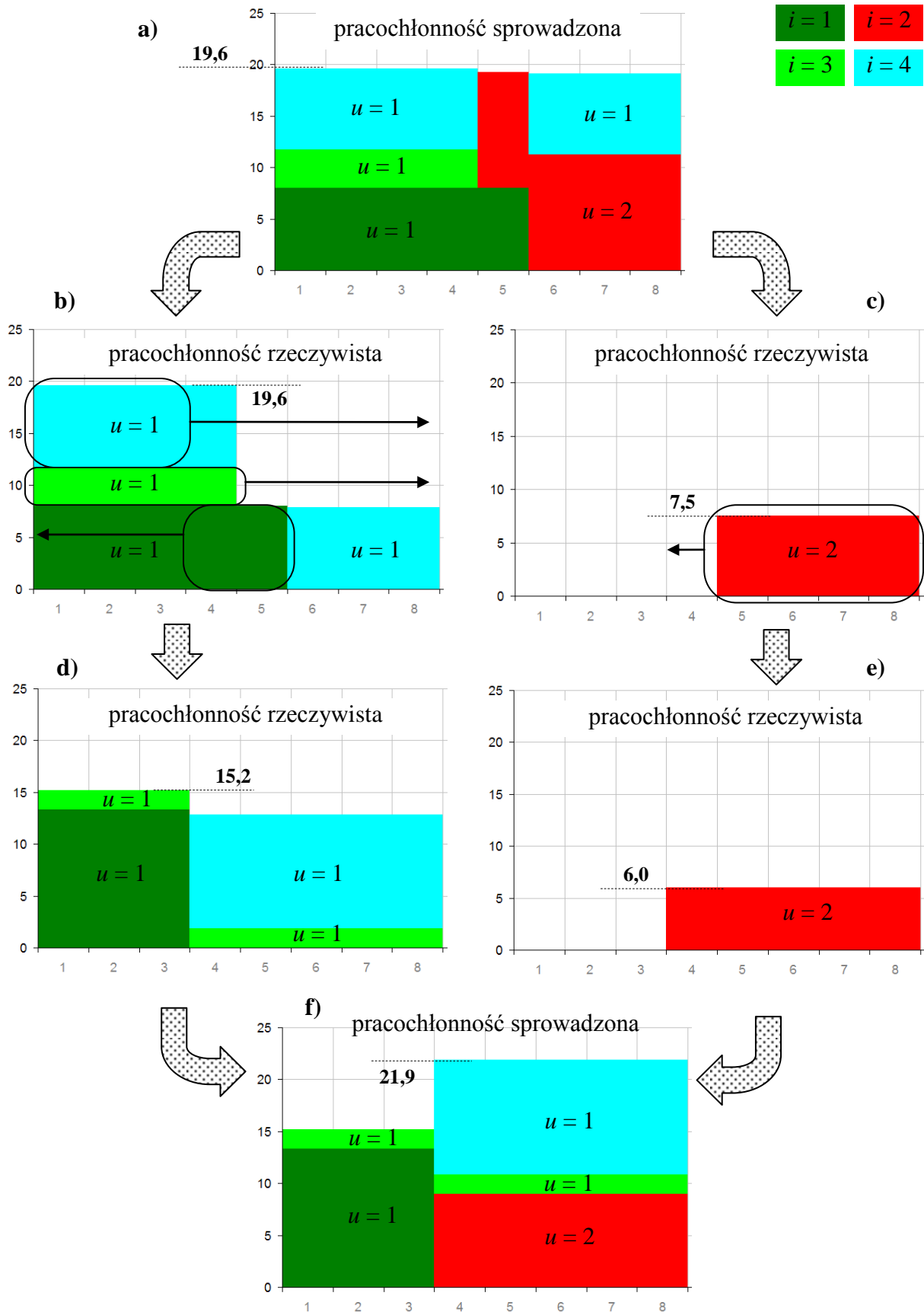
Na rys. 32f przedstawiono wykres pracochłonności odpowiadający sytuacji, w której wszystkie cztery zadania realizowane są równolegle i przez cały dysponowany czas pracy. Sytuacja taka gwarantuje minimalne możliwe wartości chwilowej pracochłonności sprowadzonej, 100% wykorzystanie zainstalowanego potencjału (wskaźnik organizacyjny

osiąga wartość 1,0) i najmniejszą możliwą liczbę ludzi i urządzeń. Wartość pracochłonności chwilowej wynosi 19,4. Jednakże nie są zachowane ograniczenia procesu sformułowane w zadaniu przykładowym! *Należy zauważyć, że przykład ten jest typowym przypadkiem napotykanym przy projektowaniu obiektów logistycznych.* Projektant buduje harmonogram PTW przydzielający cały dobowy czas pracy do realizacji wszystkich zadań, co w praktyce oznacza *brak* harmonogramu. Uzyskane w ten sposób parametry pracy są pozornie lepsze (mniej urządzeń, niższe koszty), jednakże nie odpowiadają realnym warunkom pracy! **Nie są uwzględnione kumulacje zadań w czasie, kolejność i sekwencje zadań oraz ich uwarunkowania. Projektowanie obiektów logistycznych w ten sposób może prowadzić do niedowymiarowania i braku wydajności w sytuacjach spiętrzeń.**

Rozłożenie pracochłonności rzeczywistej procesu ze względu na pracę ludzi i urządzeń.

W rozdziale 6.3 przedstawiono elementy programu SCHED umożliwiające analizę PTW pod względem rozkładu pracochłonności rzeczywistej na wszystkie typy urządzeń i kategorie pracy ludzkiej, a także tworzone przez nie zestawy. Najważniejszą miarą oceny procesu jest pracochłonność sprowadzona. Jest ona wskaźnikiem ekonomicznym oraz daje ogłęd całości procesu. Jednakże przy analizie fragmentów procesu może mieć znaczenie kwestia oceny rozkładu pracochłonności rzeczywistej zadań.

Na rys. 33a zaprezentowano wykres pracochłonności sprowadzonej PTW uzyskany w poprzednich przykładach. Proces ten oceniono jako racjonalny, ze względu na wartość maksymalną pracochłonności sprowadzonej oraz ze względów technologicznych. Po rozłożeniu tego wykresu na wykresy pracochłonności rzeczywistej odpowiednio dla obu typów zastosowanych urządzeń $u = 1$ (zadania $i = 1, 3, 4$) oraz $u = 2$ (zadanie $i = 2$; rys. 33b oraz c) okazuje się, że urządzenie $u = 1$ nie jest wykorzystywane równomiernie w ciągu doby. Z wykresu można odczytać, że potrzebne jest 20 szt. urządzenia, jednakże przez ponad połowę czasu wykorzystywane będzie jedynie ok. 8 z nich. Podobnie urządzenie $u = 2$, będzie użytkowane tylko przez 4 godziny pracy. Przy braku dodatkowych przesłanek z zakresu kolejności zadań PTW, stosując się do ograniczeń rozważanego przykładu, należy dążyć do równomiernego obciążania pracą urządzeń w ciągu doby. Dążenie to wyraża funkcja celu dana wzorem (65). Funkcja ta opisuje przydział urządzeń do zadań ze względu na równomierność ich wykorzystania. Równomierne obciążenie będzie przekładać się pośrednio na mniejsze liczby urządzeń i pracowników. Na rys. 33d oraz e zaproponowano modyfikację czasów dysponowanych wszystkich zadań tak, aby uzyskać jak najbardziej równomierne obciążenie pracą urządzeń. Liczba urządzeń $u = 1$ typu zmniejszyła się do ok. 16, zaś liczba



Rys. 33. Praca z wykresem dobowej pracochności sprowadzonej PTW ze względu na wykorzystanie urządzeń $u = 1$ i $u = 2$ – przykład

Źródło: opracowanie własne.

urządzeń $u = 2$ zmniejszyła się do 6 szt. Nastąpił jednakże wzrost maksymalnej pracochłonności sprowadzonej procesu z 19,6 do 21,9 r.h. Przyczyną wzrostu jest inna strategia wykorzystania urządzeń, w której koszt pracy wynikający z liczby godzin pracy faktycznej urządzenia mnożonej przez liczbę urządzeń będą inne. Taki nieznaczny wzrost pracochłonności sprowadzonej procesu jest akceptowalny i uzasadniony przez znacznie mniejszą liczbę urządzeń, co będzie miało odzwierciedlenie w kosztach eksploatacyjnych (jednakże *nie w operacyjnych!* – por. wzór (28)).

Przedstawione wyżej główne typy działań służą do uzyskania harmonogramu racjonalnego. Podejmując je należy stale kontrolować wszystkie parametry kosztowe i wydajnościowe rozwiązania. Taka kontrola jest obciążająca obliczeniowo i nie może być efektywnie realizowana bez narzędzi wspomagających obliczenia i wizualizację wyników. Narzędziem wspomagającym w tym obszarze jest program SCHED, który daje użytkownikowi natychmiastowy wgląd we wszystkie parametry procesu i pozwala na natychmiastowe wnioskowanie nt. wprowadzanych zmian.

6. KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA OBIEKTÓW LOGISTYCZNYCH W ASPEKCIE HARMONOGRAMOWANIA PROCESU TRANSPORTU WEWNĘTRZNEGO

6.1. Wspomaganie komputerowe projektowania obiektów logistycznych

Na rys. 3 (str. 31) przedstawiono schemat blokowy metody projektowania obiektów logistycznych proponowanej w rozprawie. Aplikacja wspomagająca pracę projektanta obiektów logistycznych powinna obejmować całą procedurę przedstawioną w metodzie i oferować narzędzia uszczegółowiające kolejne etapy. Wyniki uzyskane we wcześniejszych etapach powinny być danymi wejściowymi dla następnych.

Ponieważ pełne zautomatyzowanie procesu projektowego nie jest możliwe, autorska aplikacja SCHED opiera się na dialogu z użytkownikiem w kwestiach wymagających decyzji. W takich sytuacjach bardziej zaawansowane programy mogą oferować wskazówki ułatwiające podejmowanie decyzji lub możliwość przeprowadzenia symulacji ich efektów. Niezbędnym minimum, jakie musi spełniać program wspomagający projektowanie jest kontrola poprawności wprowadzania danych i sygnalizowanie sprzeczności danych i decyzji.

Ze względu na cechy pracy w pętli program musi umożliwiać zmianę przyjętych wcześniej rozwiązań. Jeżeli zmiana decyzji będzie wpływała na podstawowe elementy struktury systemu, to program powinien informować o tym fakcie, a także umożliwić ponowne przeprowadzanie utraconego fragmentu procedury. Do podstawowych cech każdego programu należy także zaliczyć możliwość zapisu i wczytywania stanu pracy oraz eksportu i drukowania wyników.

6.2. Program SCHED

■ Założenia programu

Program SCHED został napisany w środowisku programowania obiektowego Delphi 6.0. Celem podstawowym programu jest dwuetapowa interakcja z użytkownikiem

umożliwiająca w pierwszej kolejności odwzorowanie procesu transportu wewnętrznego wg metody przedstawionej w rozprawie, a następnie harmonogramowanie tych procesów. Program dokonuje obliczeń wskaźników technologicznych, ekonomicznych i efektywnościowych rozwiązań projektowych. Na podstawie tych wskaźników dokonuje się oceny jakości rozwiązania.

Program SCHED jest narzędziem opierającym się na interakcji z użytkownikiem na każdym etapie realizacji projektu. Oznacza to, że użytkownik musi dysponować odpowiednią wiedzą techniczną i umocowaniem praktycznym. W takich warunkach program pozwala na generowanie dużej liczby wariantów projektowych, zwłaszcza w aspekcie harmonogramów PTW, znacznie skracając czas obliczeń i ewaluacji wyników.

Wszystkie prezentowane w tym rozdziale rysunki są zrzutami ekranowymi autorskiej aplikacji SCHED.

■ Interfejs użytkownika

Program skonstruowany został w formie okna głównego, w którym odbywa się praca. Okna dodatkowe wywoływane są w razie konieczności i zawierają dane katalogowe lub też służą do komunikacji z użytkownikiem.

Interfejs użytkownika został zaprojektowany w sposób odzwierciedlający kolejne etapy metody projektowania przedstawionej w rozdziale 2. Okno główne programu składa się z sześciu zakładek odpowiadających krokom projektowym: Dane, Struktura PTW, Rozpływ materiałów, Zadania PTW, Harmonogramowanie PTW, Parametry rozwiązania. Praca z kolejnymi zakładkami możliwa jest po wypełnieniu wszystkich działań w poprzedniej zakładce. Taka konstrukcja aplikacji pozwala na szybkie wracanie się do wybranego etapu procedury w celu dokonania zmian. Program umożliwia zapisanie i wczytywanie stanu pracy, a także zapisywanie i drukowanie wyników w postaci obrazów i tekstu.

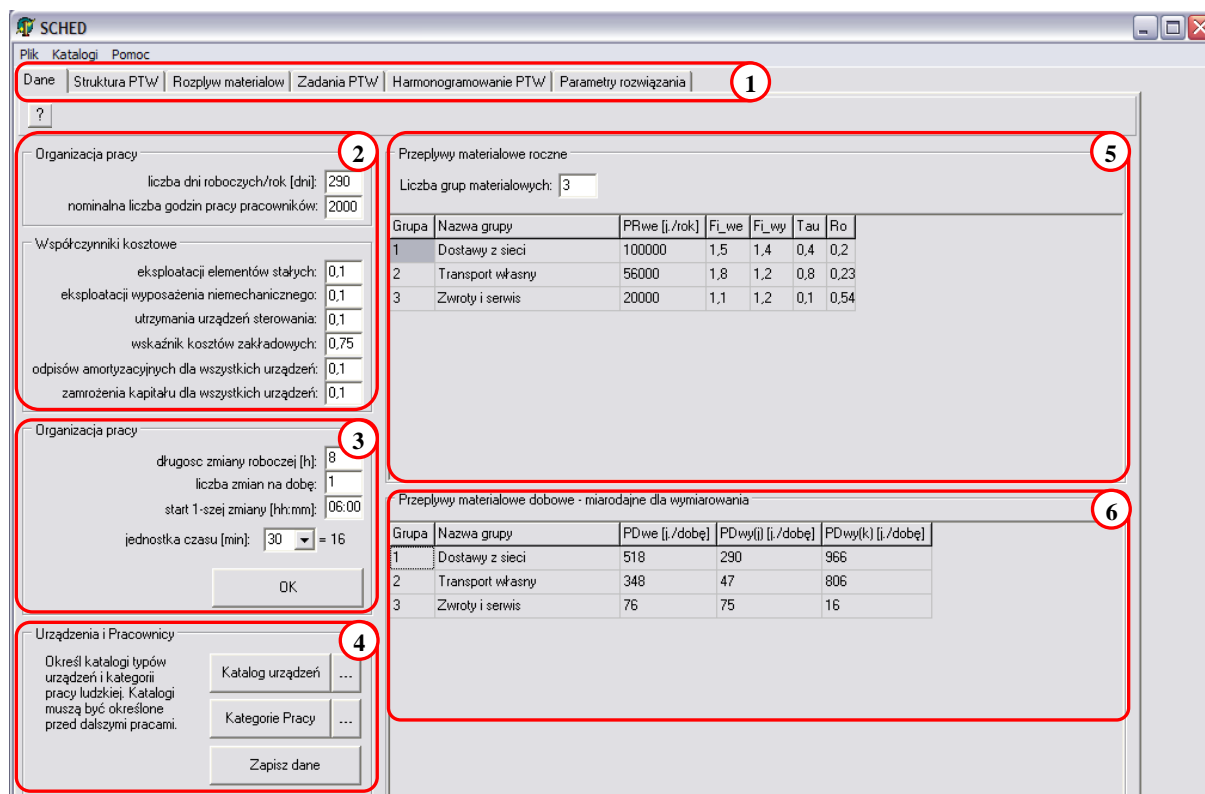
■ Dane wejściowe

Do programu wprowadza się pełen zakres danych projektowych opisanych w punkcie 2.2 rozprawy (str. 33). Wprowadzanie odbywa się na prawie każdym etapie pracy, przy czym podstawowe parametry procesu wprowadza się w zakładce *Dane*. Dodatkowo użytkownik konstruuje i uzupełnia Katalog Typów Urządzeń oraz Katalog Kategorii Pracy Ludzkiej.

Na rys. 34 przedstawiono widok zakładki *Dane*. Podstawowe komponenty zakładki to (numery jak na rysunku):

1. Kolejne zakładki odwzorowujące sekwencję etapów metody projektowej.
2. Dane organizacyjne pracy obiektu logistycznego oraz podstawowe wskaźniki kosztowe.

3. Dane dotyczące dobowej organizacji pracy i struktury harmonogramu PTW.
4. Panel Katalogu Urządzeń i Katalogu Pracy Ludzkiej.
5. Panel danych o grupach materiałowych, rocznym natężeniu strumieni materiałowych oraz współczynników spiętrzeń i parametrów układów komisjonowania.
6. Panel danych j/w przeliczonych na wartości dobowe.



Rys. 34. Widok zakładki Dane w programie SCHED

Katalog Typów Urządzeń

Katalog Typów Urządzeń zawiera podstawowe dane techniczne, wydajnościowe i kosztowe pracy urządzeń transportu wewnętrznego. Raz skonstruowany katalog może być aktualizowany i wykorzystywany przy innych projektach (rys. 35).

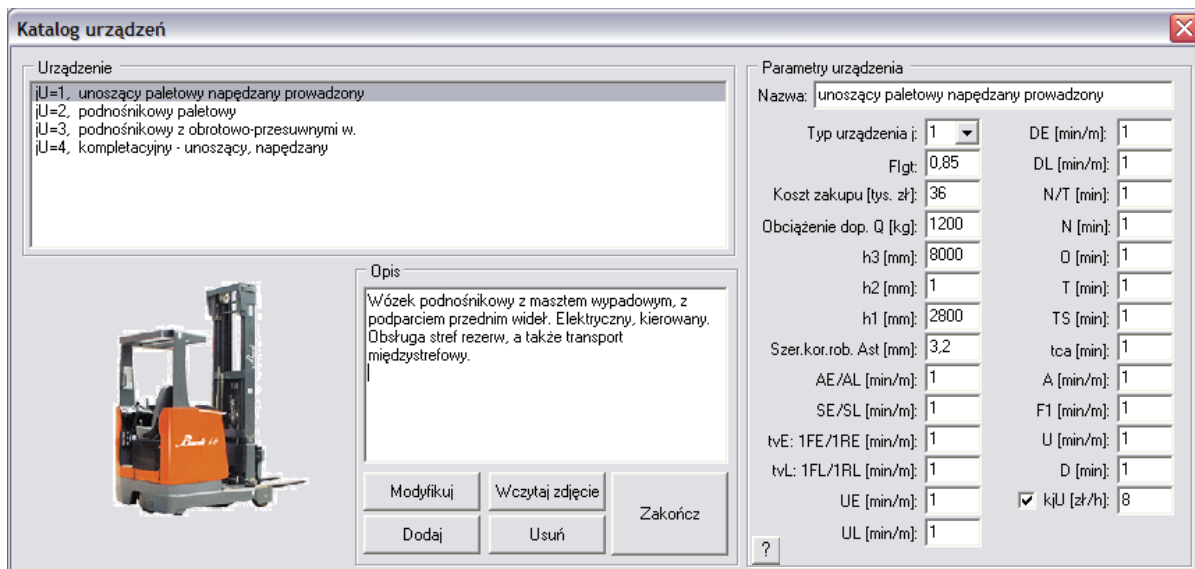
Katalog Kategorii Pracy Ludzkiej

Katalog Kategorii Pracy Ludzkiej zawiera podstawowe informacje dotyczące pracowników angażowanych do realizacji PTW takie jak opisy uprawnień, stawki godzinowe oraz współczynniki wykorzystania czasu pracy. Raz skonstruowany katalog może być aktualizowany i wykorzystywany przy innych projektach (rys. 36).

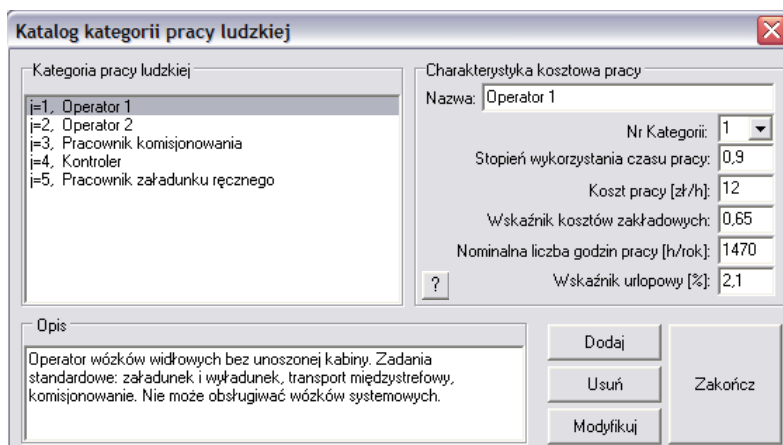
Wybrane składowe czasów cykli transportowych w transporcie wewnętrznym

Program SCHED oferuje zestawienie sześciu najczęściej wykorzystywanych składowych cykli transportowych związanych z podejmowaniem i odstawianiem jednostek

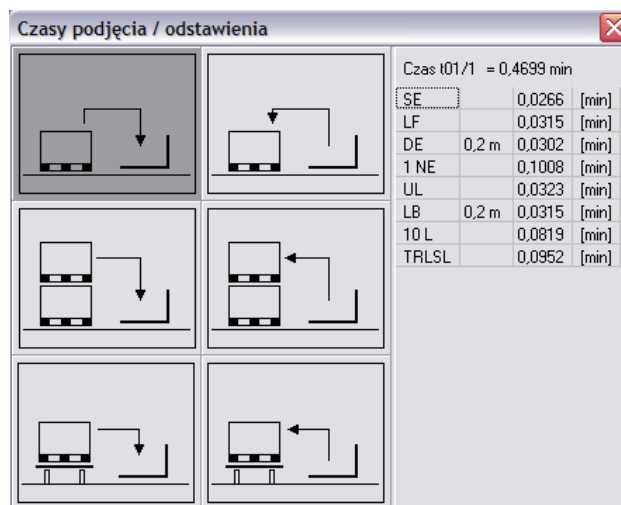
ładunkowych przez wózki widłowe. Składowe te zostały obliczone za pomocą norm MTM i mogą być wykorzystane w większości przypadków jako uniwersalne (rys. 37).



Rys. 35. Widok okna Katalogu Typów Urządzeń w programie SCHED



Rys. 36. Widok okna Katalogu Kategorii Pracy Ludzkiej w programie SCHED



Rys. 37. Widok okna Katalogu Czasów podjęcia/odstawienia w programie SCHED

6.3. Implementacja metody projektowania obiektów logistycznych

■ Wspomaganie kształtowania obiektu logistycznego

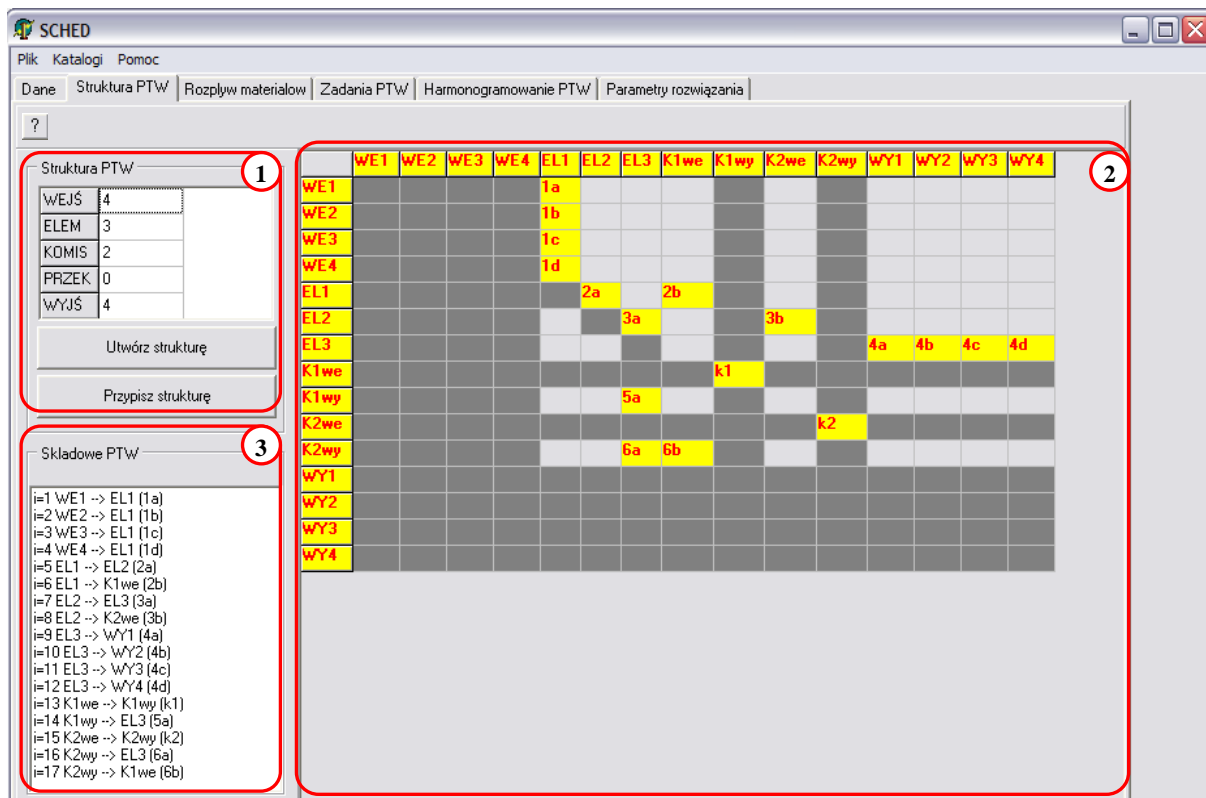
Założenia metody projektowania obiektów logistycznych przedstawione w rozdziale 2 zostały zaimplementowane w postaci procedur realizowanych w zakładkach *Struktura PTW*, *Rozpływ materiałów* oraz *Zadania PTW* programu SCHED.

Struktura PTW

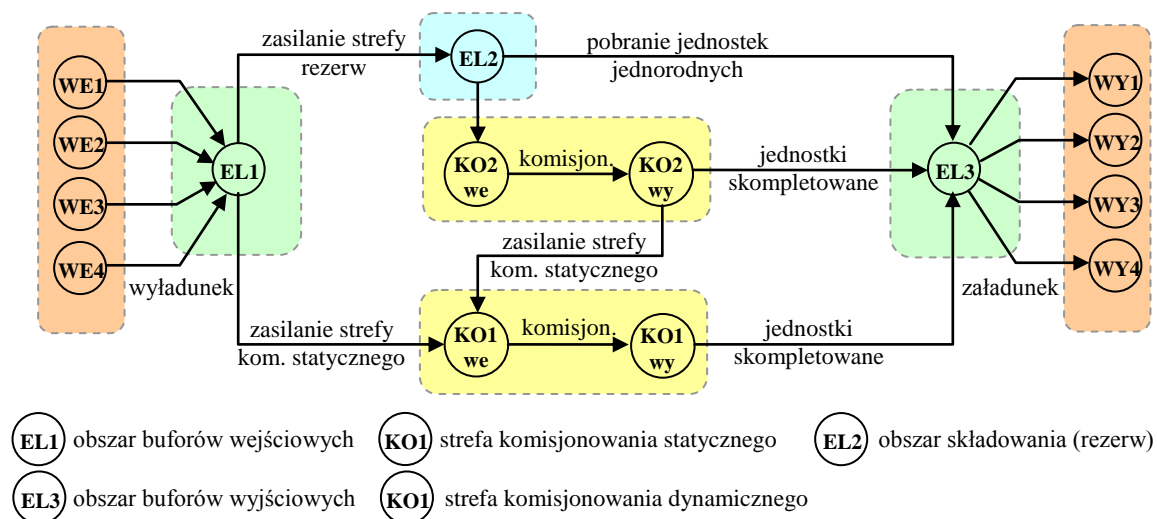
Struktura procesu transportu wewnętrznego wynika z przyjętych obszarów funkcjonalnych i wzajemnych przepływów materiałowych między nimi. Zależna jest też od zakresu przekształceń wykonywanych w obszarach. Na rys. 38 przedstawiono rzut zakładki *Struktura PTW*. Podstawowe komponenty zakładki to (numery jak na rysunku):

1. Okno standardowych składowych procesu:
 - WEJŚ/WYJŚ – elementy odwzorowujące źródła i ujścia strumieni materiałów, używane do odwzorowania doków i ramp przeładunkowych, tj. miejsc, w których rozpoczyna się lub kończy PTW.
 - ELEM – element odwzorowujący miejsca styku cykli transportowych w PTW. Może odwzorowywać obszary składowania, buforowe, miejsca zdawczo-odbiorcze, miejsca przekierowanie strumieni materiałów – każde miejsce, w którym następuje zmiana środka transportu wewnętrznego lub przerwa w cyklu transportowym z buforowaniem jednostki.
 - KOMIS – element odwzorowujący układy komisjonowania w PTW. Element jest złożony z dwóch składników: wejścia do układu komisjonowania i wyjścia z niego. Zakłada się, że każda jednostka materiału, która trafiła na wejście, musi pojawić się na wyjściu poddana procesowi komisjonowania wg parametrów τ i ρ .
 - PRZEK – element odwzorowujący układy przetwarzające i opóźniające. Element jest złożony z dwóch składników: wejścia i wyjścia. Zakłada się, że każda jednostka materiału, która trafi na wejście, musi pojawić się na wyjściu poddana procesowi przetwarzania wg parametru η . Jeżeli operacje w układzie przetwarzania nie zmieniają liczby jednostek, tj. $\eta = 1$, wtedy PRZEK odzwierciedla opóźnienie w procesie, np.: czas potrzebny na identyfikację i kontrolę.
2. Tablica krzyżowa odzwierciedlająca strukturę procesu. Wybrane elementy struktury procesu tworzą graf. Każde połączenie oznacza cykl transportowy na danej trasie. Zadania PTW będą opisane przez podanie liczby tych cykli. Przykład odzwierciedlenia PTW z zastosowaniem elementów standardowych zaprezentowano na rys. 39. Na rys. 38 w oknie nr 2, przedstawiono ten sam proces opisany w programie SCHED.

3. Okno zadań PTW utworzone na bazie tablicy krzyżowej odzwierciedlającej proces. Zadania PTW generowane są automatycznie i nadawane im są kolejne numery.



Rys. 38. Widok okna Struktura PTW w programie SCHED

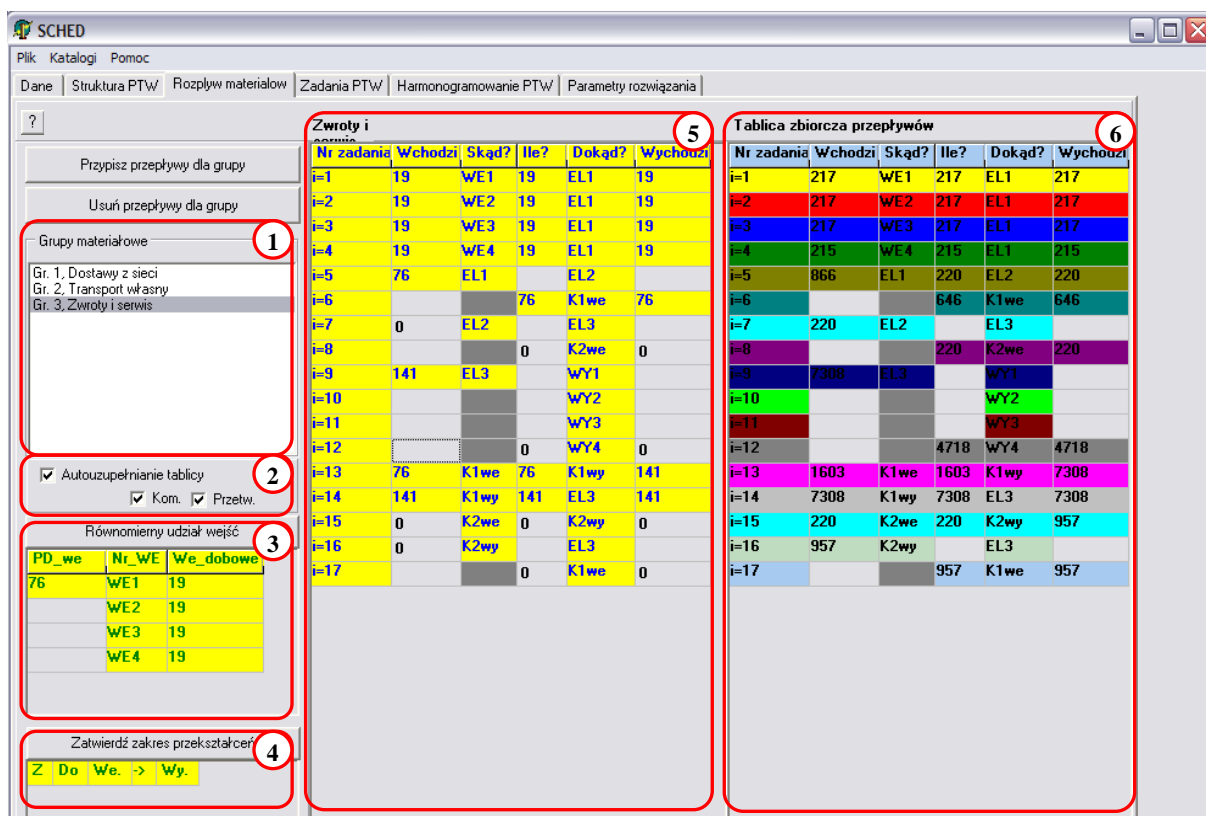


Rys. 39. Przykład odzwierciedlenia PTW za pomocą elementów dostępnych w programie SCHED

Źródło: Opracowanie własne.

Rozpływ materiałów

Określenie rozpływów materiałowych w PTW oznacza podanie dobowej liczby cykli transportowych składających się na zadania PTW (λ_i^D). Jest to podstawa do obliczeń wydajnościowych. Na rys. 40 przedstawiono widok zakładki *Rozpływ Materiałów*. Podstawowe komponenty zakładki to (numery jak na rysunku):



Rys. 40. Widok okna Rozpływ Materiałów w programie SCHED

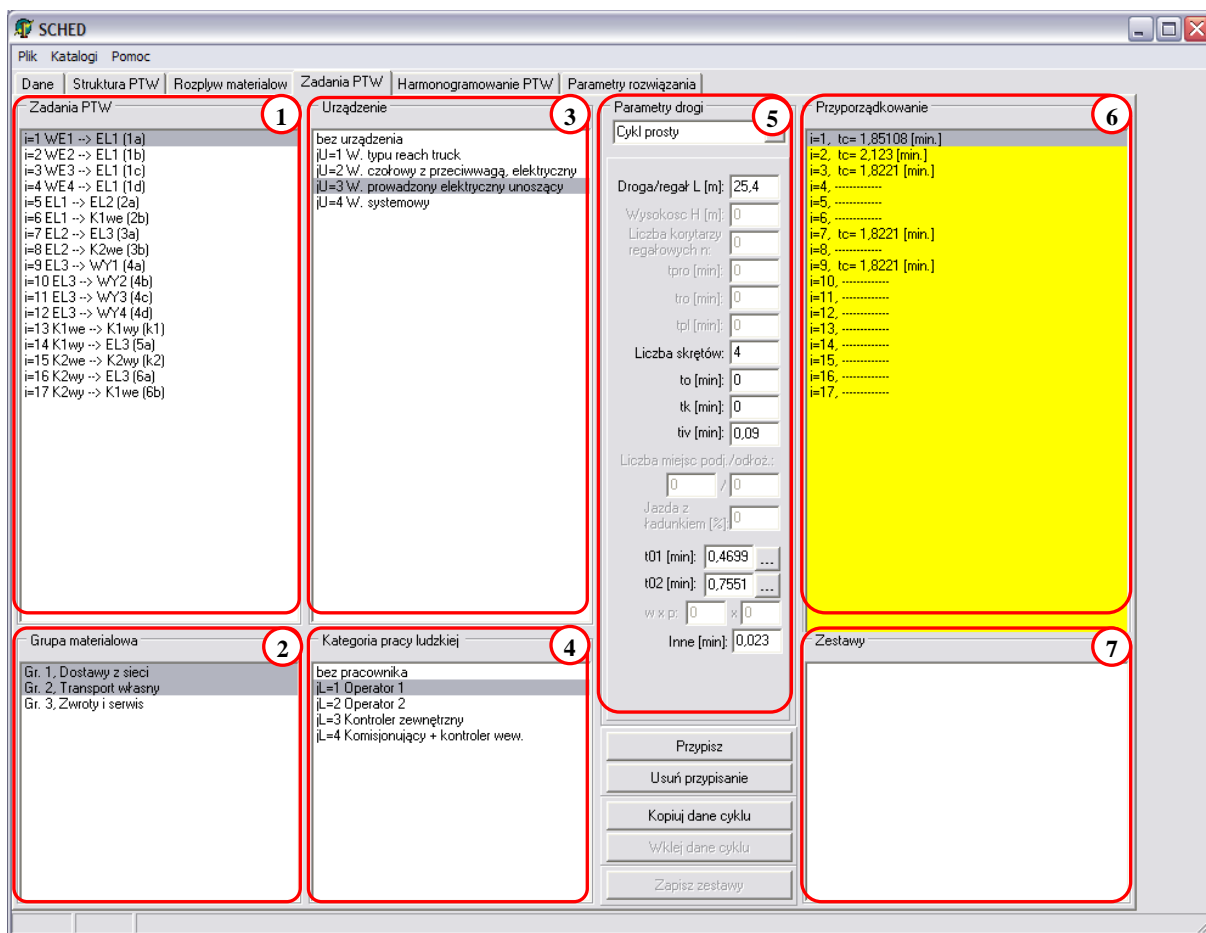
1. Okno grup materiałowych. Dla każdej grupy oddzielnie ustala się rozpływy materiałowe, gdyż pewne elementy procesu mogą być realizowane tylko na wybranych grupach. Grupy materiałowe zostały zdefiniowane w zakładce *Dane*.
2. Panel opcji automatycznego przeliczania tablic rozpływów w obrębie grupy materiałowej. Użytkownik może wybrać, czy tablica ma być uzupełniana automatycznie i czy układy komisjonowania i przetwarzania będą przeliczane automatycznie. W przypadku manualnego ustalania rozpływów istnieje możliwość zachowania niezbilansowania pomiędzy wejściami i wyjściami systemu (rola buforująca obiektów magazynowych).
3. Panel określania udziału w przepływach dla elementów typu WEJŚ. Możliwe jest automatyczne określenie równomiernego udziału wejść.
4. Panel układów przetwarzania PRZEK. Służy do określania liczby jednostek opuszczających te układy, tj. liczby realizowanych przez nie cykli przetwarzania.
5. Tablica przepływów dobowych wybranej grupy materiałowej. Tablica zawiera nr zadania, liczbę jednostek przekształczanych w danym zadaniu, miejsce początkowe i końcowe cyklu transportowego zadania, a także liczbę jednostek, która powstaje po zakończeniu zadania. Tablica zawiera wszystkie zadania sformułowane w zakładce *Struktura PTW*.
6. Tablica zbiorcza dobowych przepływów materiałowych. Jest bliźniacza do tablicy przepływów dobowych dla grup materiałowych. W tablicy tej sumowane są liczby cykli transportowych *i*-tych zadań wynikające z obsługi kolejnych grup materiałowych. Kolory,

którymi oznaczone są zadania PTW w tablicy zbiorczej, będą w późniejszym etapie wykorzystane do odwzorowania zadań na harmonogramie PTW.

Wartości liczbowe w tablicach rozplywów materiałowych są wartościami szczytowymi przepływów. Wynikają one z obliczeń i danych zawartych w zakładce *Dane*.

Zadania PTW

Określone w zakładce *Struktura PTW* zadania zostały w zakładce *Rozplyw Materiałów* opisane wielkościami przepływu. Następnie należy określić technologie ich realizacji oraz czasy cykli transportowych. W zakładce *Zadania PTW* określa się typ cyklu, typ urządzenia realizującego i kategorię pracy ludzkiej. Wprowadzane są parametry cyklu, na podstawie których wyznacza się czas jednego powtórzenia danego cyklu składającego się na *i*-te zadanie. Na rys. 41 przedstawiono widok zakładki *Zadania PTW*. Podstawowe komponenty zakładki to (numery jak na rysunku):



Rys. 41. Widok okna Zadania PTW w programie SCHED

1. Okno zadań PTW wygenerowanych w zakładce *Struktura PTW*.
2. Okno grup materiałowych. Każde zadanie PTW ma przypisane grupy materiałowe, które będą w jego ramach obsługiwane.
3. Okno typów urządzeń transportowych; reprezentuje zawartość Katalogu Urządzeń.

4. Okno kategorii pracy ludzkiej; reprezentuje zawartość Katalogu Kategorii Pracy Ludzkiej.
5. Panel parametrów cykli transportowych. Użytkownik definiuje typ cyklu (prosty, kombinowany, komisjonowanie 1-wymiarowe i 2-wymiarowe, pełnopaletowy, przetwarzania, przenośnik, dowolny) oraz długość dróg, liczbę zatrzymań, liczbę i czasy elementów dodatkowych cyklu takich jak przetwarzanie informacji, operacje ręczne czy podejmowanie lub odstawianie jednostki.
6. Okno Przypisania, w którym dla wybranego i -tego zadania dokonuje się przydzielenia typu urządzenia z okna nr 3, kategorii pracy ludzkiej z okna nr 4, oraz parametrów cyklu transportowego z okna nr 5. Po zatwierdzeniu, w oknie przypisania w wierszu odpowiadającym danemu zadaniu, wyświetlony zostaje czas realizacji cyklu obliczony wg podanych w rozprawie formuł.
7. Okno zestawów. Po obliczeniu w oknie nr 6 wartości czasu cyklu do każdego zadania, generowany jest lista p -tych zestawów. Każdy zestaw składa się z typu urządzenia i kategorii pracy ludzkiej, przy czym możliwe jest, że dany pracownik bądź dane urządzenie występują w więcej niż jednym zestawie.

■ Wspomaganie harmonogramowania PTW

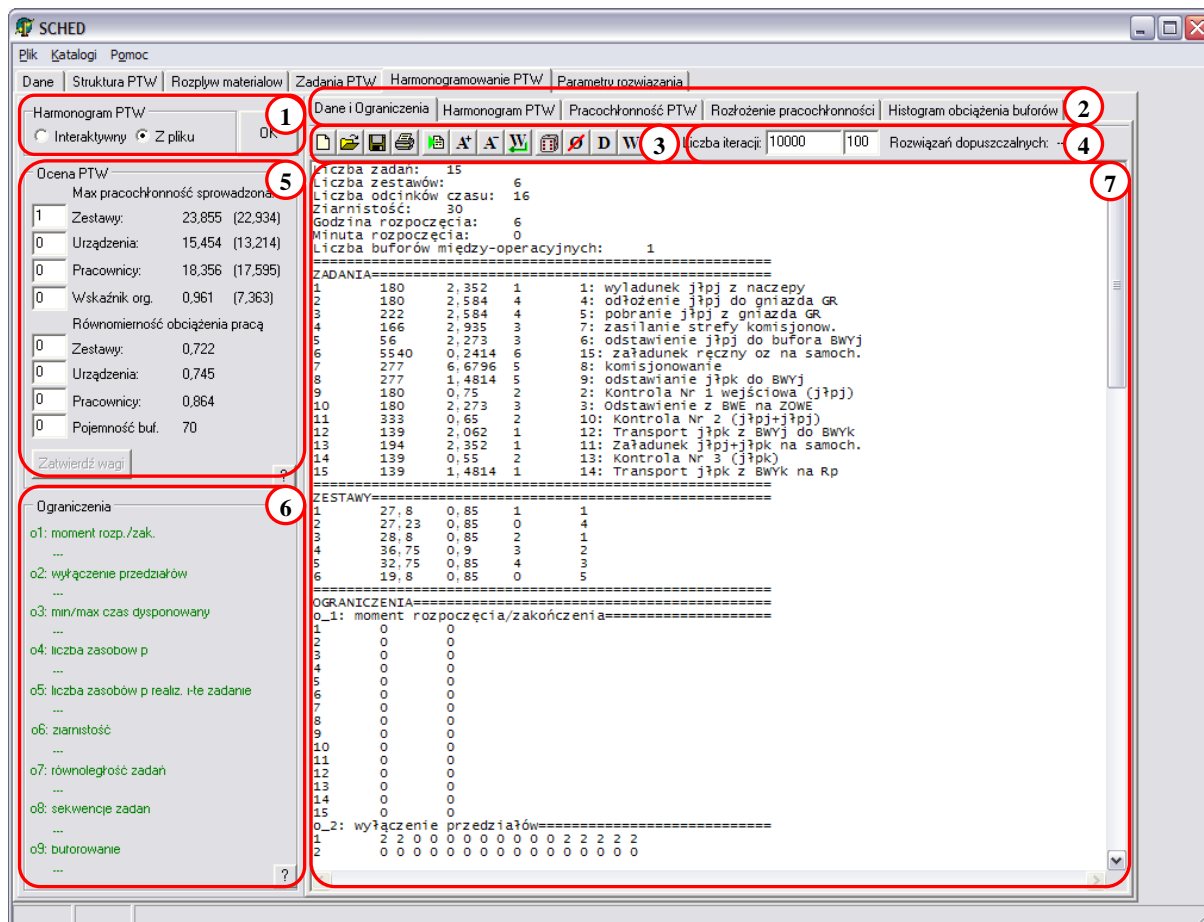
Ukształtowany i częściowo zwymiarowany proces transportu wewnętrznego musi zostać zorganizowany w czasie poprzez ułożenie jego harmonogramu. Moduł harmonogramowania PTW może działać niezależnie od zaimplementowanej we wcześniejszych oknach programu metody projektowania obiektów logistycznych. Możliwe jest wczytywanie i zapisywanie danych z zewnętrznego pliku tekstowego. Proces ukształtowany w poprzedniej części programu także zostaje automatycznie przepisany do formy pliku tekstowego. Przykład takiego pliku przedstawiono w Załączniku 1.

Harmonogram PTW – Dane i Ograniczenia

Pierwszym krokiem budowy harmonogramu jest opracowanie i wprowadzenie danych i ograniczeń problemu. Na rys. 42 przedstawiono widok zakładki *Harmonogram PTW – Dane i Ograniczenia*. Podstawowe komponenty zakładki to (numery jak na rysunku):

1. Panel wyboru jednej z dwóch opcji pracy z harmonogramem:
 - *Harmonogram interaktywny* – możliwe do wybrania, kiedy proces został ukształtowany w aplikacji SCHED. Umożliwia pracę z harmonogramem wg zasad z punktu 5.3.
 - *Z pliku* – wybierane, kiedy użytkownik posiada dane dotyczące procesu i ograniczenia harmonogramowania w przygotowanym wcześniej pliku zewnętrznym, bądź chce

- sformułować nowy problem bez użycia wcześniejszych okien programu SCHED. Również oznacza możliwość pracy z harmonogramem wg zasad przedstawionych w punkcie 5.3.
2. Panel podzakładek narzędzi wizualizacyjnych wspomagających podejmowanie decyzji.
 3. Panel przycisków do obsługi okna pliku tekstowego, drukowania, wczytywania i zapisywania stanu pracy, a także przyciski losowania rozwiązań bazowych harmonogramu, doskonalenia harmonogramu, aktualizacji danych i zerowania ograniczeń.
 4. Panel do wprowadzania liczby iteracji do algorytmów przedstawionych w punkcie 5.3.



Rys. 42. Widok okna Dane i Ograniczenia Harmonogramu PTW w programie SCHED

5. Panel wyświetlający wartości funkcji celu sformułowanych w punkcie 4.3 rozprawy.
6. Okno Ograniczeń, w którym wyświetlana jest informacja dotycząca spełnienia bądź braku spełnienia ograniczeń PTW. Jeżeli dane ograniczenie nie jest spełnione, to następuje sygnalizacja kolorem czerwonym oraz podana jest informacja szczegółowa o miejscu wystąpienia niezgodności.
7. Okno edycji danych PTW oraz ograniczeń harmonogramu podanych w punkcie 4.2. Okno przedstawia tekstowy plik danych skonstruowany wg schematu:

Liczba zadań: I					
Liczba zestawów: P					
Liczba odcinków czasu: T					
ziarnistość: r_i					
Godzina rozpoczęcia: hh					
Minuta rozpoczęcia: mm					
Liczba buforów między-operacyjnych: b					
=====					
ZADANIA=====					
1	λ_i^D	t_i	p	<i>opis_cyklu_1</i>	
...	
=====					
ZESTAWY=====					
1	k_i	ω_j	u	c	
...	
=====					
OGRANICZENIA=====					
o_1: moment rozpoczęcia/zakończenia=====					
1	<i>zaczac_przed</i>	<i>skonczyc_po</i>			
...		
o_2: wyłączenie przedziałów=====					
1	0	2	2	0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ...
...
o_3: min/max czas dysponowany=====					
1	<i>min_t_dbr</i>	<i>max_t_dbr</i>			
...		
o_4: liczba zasobów p=====					
1	n^p				
...			
o_5: liczba zasobów p realizujących i-te zadanie=====					
1	n_i^p				
...			
o_6: ziarnistość=====					
1	r_i				
...			
o_7: zakaz równoległości zadań=====					
1	0	2	0		
2	0	0	...		
...	0		
o_8: sekwencje zadań=====					
1	<i>poprzednik_1</i>	<i>wyprzedzenie</i>	<i>przelicznik</i>		
2	<i>poprzednik_2</i>	0	...		
...		
o_9: buforowanie=====					
1	b_i	stan_początkowy S_b	i, k	i, k	i, k
...
=====					
HARMONOGRAM=====					
1	1	1	0	0	...
2	1	1	0
3	0	1
...

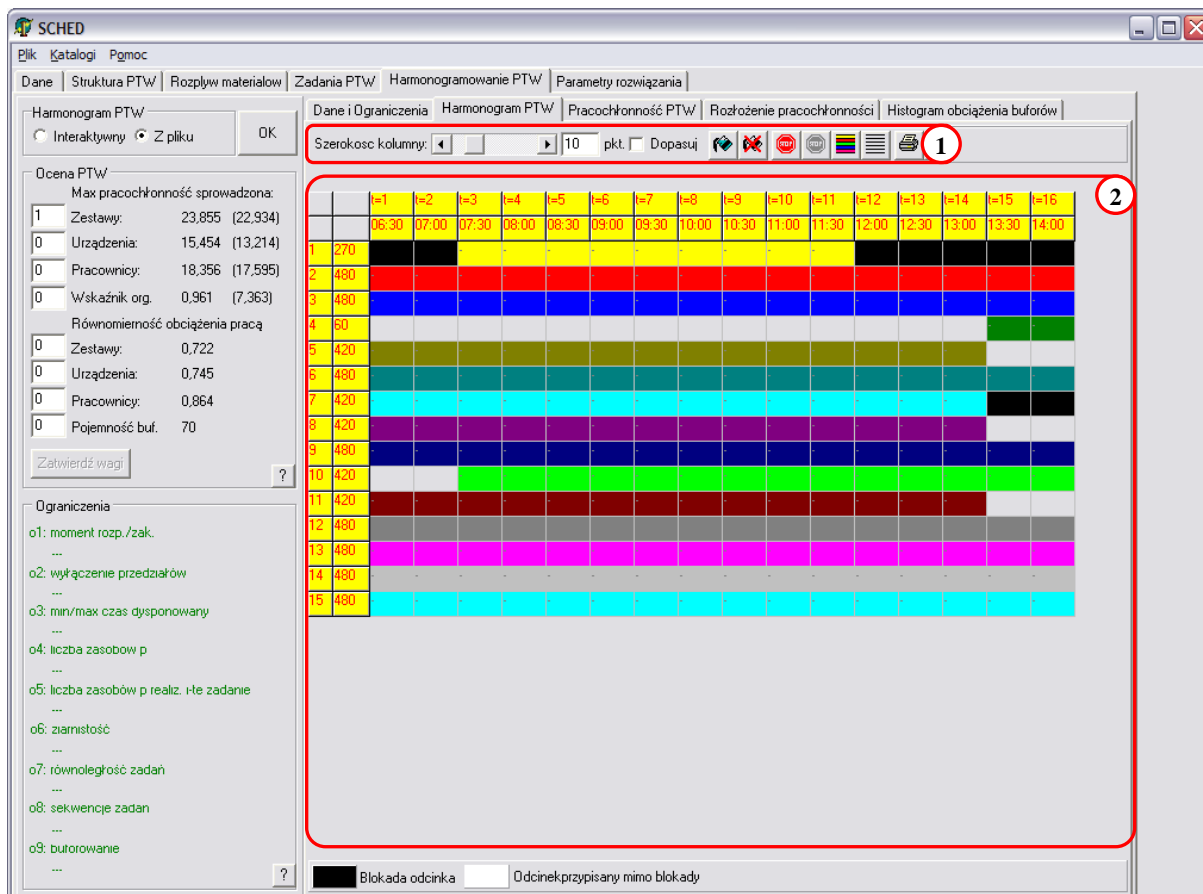
Harmonogram PTW

Podstawowym miejscem interakcji między użytkownikiem a aplikacją jest podzakładka *Harmonogram PTW* (rys. 43). Podstawowe komponenty zakładki (numery jak na rysunku):

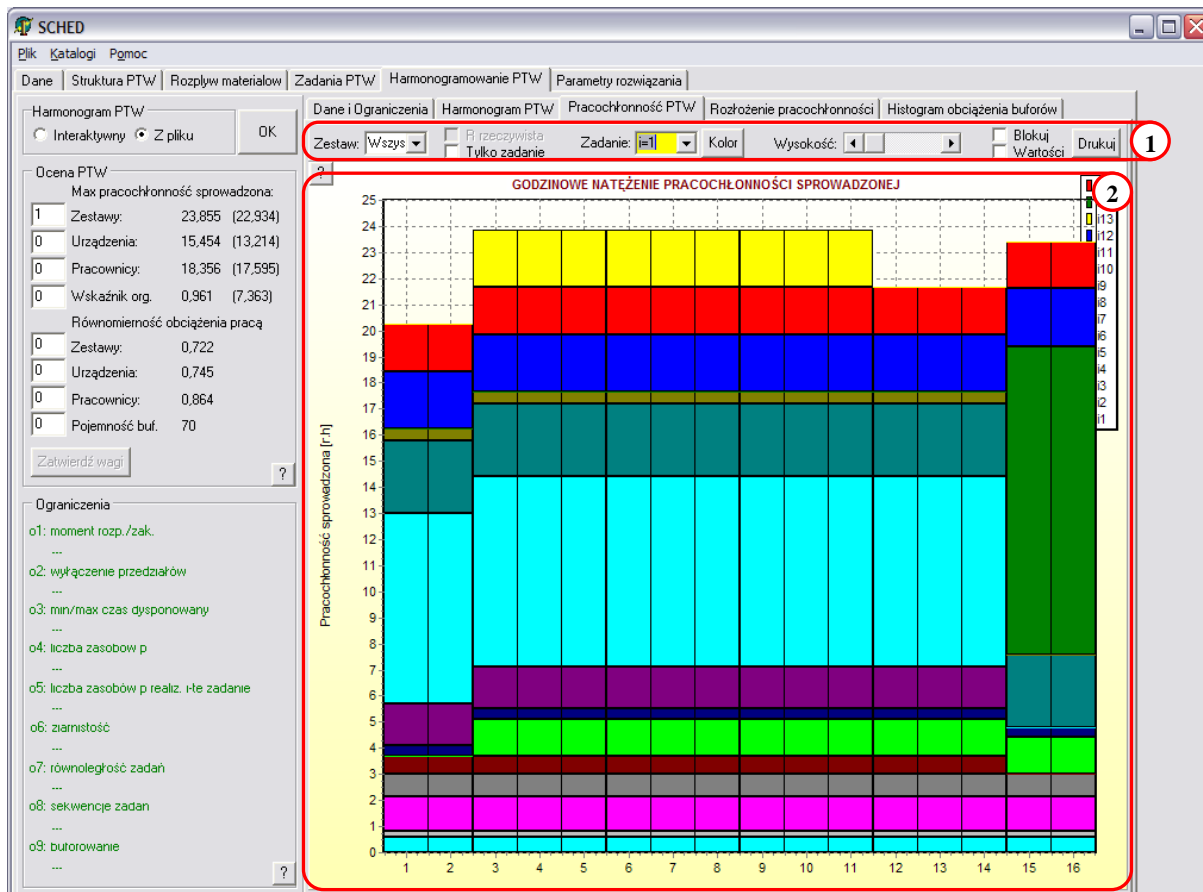
1. Panel przycisków obsługujących okno harmonogramu, w tym zaznaczanie i odznaczanie pól, a także blokowanie i odblokowywanie pól oraz drukowanie wyniku.
2. Siatka harmonogramu PTW. Umożliwia szybką edycję harmonogramu PTW przy jednoczesnej aktualizacji wartości funkcji celu i kontroli zachowania ograniczeń.

Harmonogram PTW – Pracochłonność PTW, Rozłożenie pracochłonności

Podstawowym narzędziem wizualizacyjnym harmonogramu PTW jest okno wykresu pracochłonności sprowadzonej w zakładce *Harmonogramowanie PTW*. Wykresy są podstawą interaktywnej pracy z harmonogramem i umożliwiają bieżące śledzenie wpływu zmian na proces transportu wewnętrznego. Na rys. 44 przedstawiono widok zakładki. Podstawowe komponenty zakładki to (numery jak na rysunku):



Rys. 43. Widok okna Harmonogramu PTW w programie SCHED

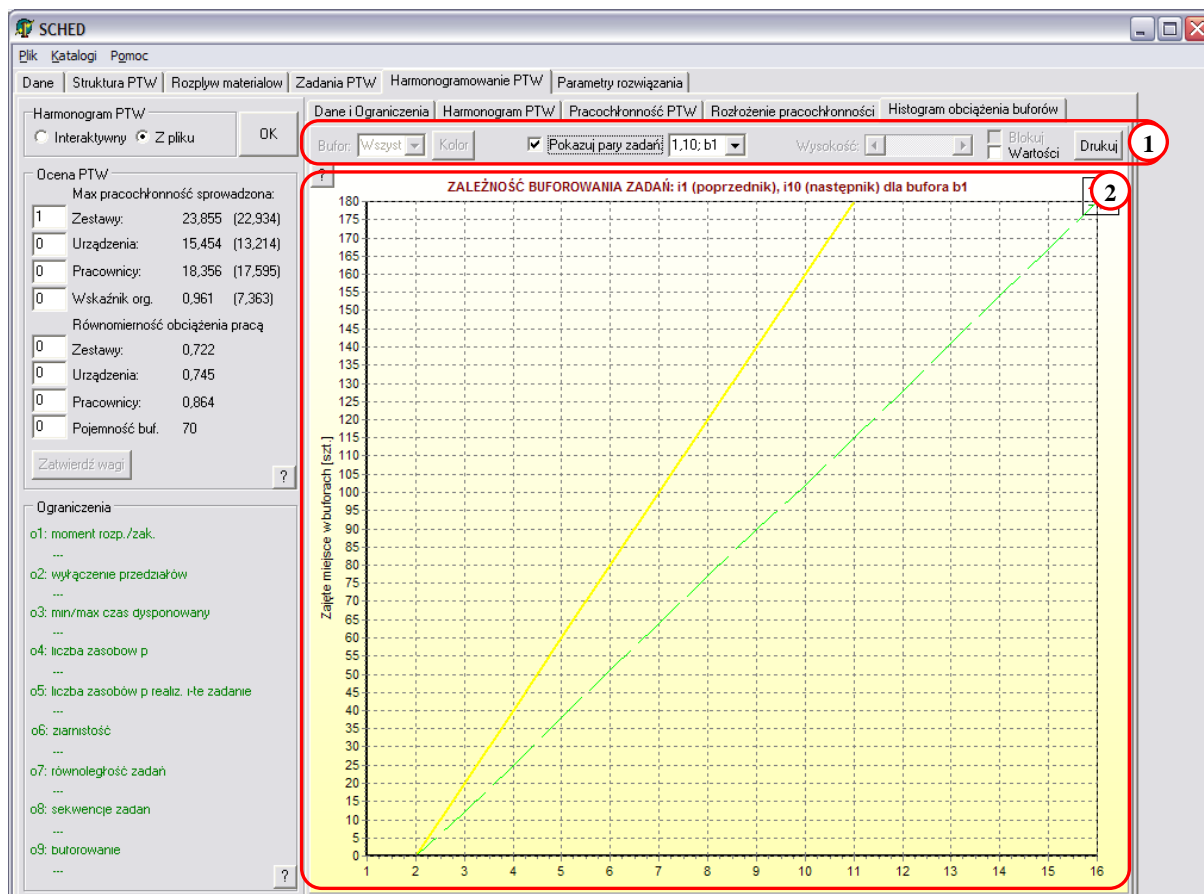


Rys. 44. Widok okna Wykresów Pracochłoności PTW w programie SCHED

1. Panel opcji wizualizacji pracochłonności procesu:
 - dobowej pracochłonności sprowadzonej całego PTW,
 - dobowej pracochłonności sprowadzonej i rzeczywistej dla p -tego zestawu,
 - dobowej pracochłonności sprowadzonej dla i -tego zadania,
 - dobowej pracochłonności rzeczywistej dla u -tego typu urządzenia lub c -tej kat. pracy,
 oraz wykresy obciążenia buforów i realizacji par zadań będących w zależności buforowania.
2. Okno rysowania wykresów pracochłonności i obciążenia buforów.

Harmonogram PTW – Obciążenie buforów

W punktach 3.4 i 3.5 rozprawy przedstawiono zasady buforowania przepływów materiałów w procesie transportu wewnętrznego. Program SCHED oferuje możliwość wizualizacji poziomego wykorzystania buforów w ciągu doby roboczej. oraz wizualizację par zadań PTW pozostających w zależności buforowania. Na rys. 45 przedstawiono widok zakładki *Obciążenie buforów PTW*. Komponenty zakładki to (numery jak na rysunku):

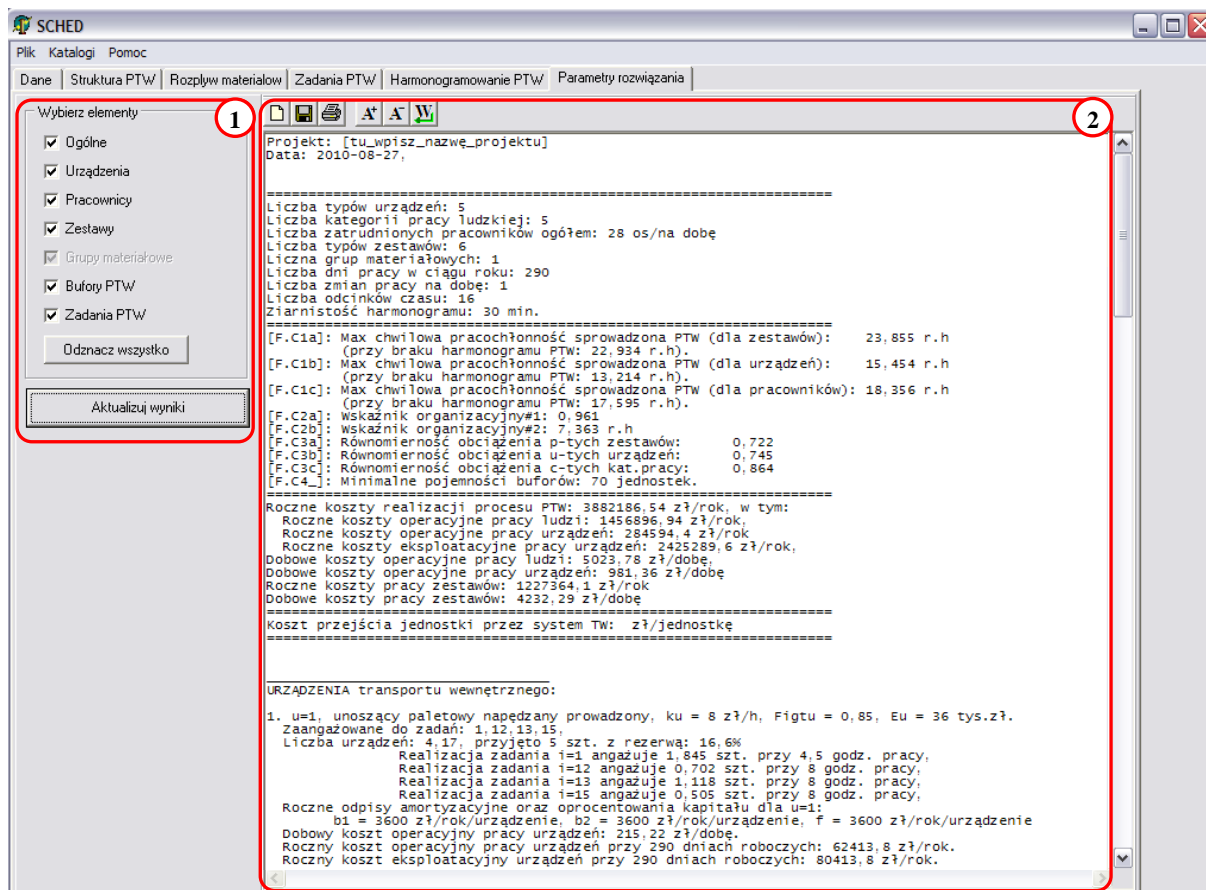


Rys. 45. Widok okna Wykresów Obciążenia Buforów PTW w programie SCHED

1. Panel przycisków obsługujących okno wykresów, w tym przyciski wyboru wizualizacji obciążenia wszystkich buforów jednocześnie, wybranych buforów, oraz wizualizacji wykresu logistycznego dla par zadań pozostających w zależności buforowania.
2. Okno rysowania wykresów realizacji buforowania.

■ Wymiarowanie obiektu logistycznego oraz parametry rozwiązania

Program SCHED automatyzuje wymiarowanie i obliczanie parametrów i wskaźników rozwiązania wg zasad przedstawionych w rozdziale 2. Wybrane charakterystyki wynikowe prezentowane są w formie pliku tekstowego. Na rys. 46 przedstawiono widok zakładki *Parametry rozwiązania*. Podstawowe komponenty zakładki to (numery jak na rysunku):



Rys. 46. Widok okna Parametrów Rozwiązania w programie SCHED

- Panel wyboru składników wyniku. Użytkownik otrzymuje szczegółowe charakterystyki procesu obliczone przez program SCHED na podstawie formuł przedstawionych w pracy:
 - Ogólne*: w tym m.in.: roczne koszty realizacji PTW, roczne i dobowe koszty operacyjne pracy ludzi i urządzeń, roczne koszty eksploatacyjne urządzeń, roczne i dobowe koszty dla zestawów, wartości funkcji celu zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW.
 - Urządzenia*: w tym m. in.: dobowa liczba urządzeń z wyszczególnienie zaangażowania do kolejnych zadań, roczne i dobowe koszty operacyjne i eksploatacyjne, nakłady.
 - Pracownicy*: w tym m.in.: liczba pracowników z podziałem na kategorie pracy, zmiany robocze, roczne i dobowe koszty operacyjne (uwzględnienie wskaźników urlopowych).
 - Zestawy*: w tym m. in.: liczba zestawów, roczne i dobowe koszty pracy zestawów.
 - Zadania PTW*: w tym m. in. koszty realizacji zadań ze względu na pracę ludzi i urządzeń.
 - Bufory*: w tym max. pojemność i wypełnienie buforów w kolejnych odcinkach czasu.

2. Okno wyświetlania charakterystyk. Przykładowy plik z wynikami programu SCHED przedstawiono w Załączniku 2.

6.4. Możliwości oraz ograniczenia programu SCHED

Program SCHED jest narzędziem usprawniającym projektowanie obiektów logistycznych. Aplikacja SCHED odzwierciedla etapy formułowania zadania logistycznego, kształtowania struktury PTW oraz wymiarowania procesu ze względu na wydajność i koszty. Szczególnie podniesiony został problem harmonogramowania PTW. Pod tym względem program wydaje się oferować dużą uniwersalność i swobodę dla użytkownika. Możliwe jest odwzorowywanie dowolnych struktur układów logistycznych, czy to dystrybucyjnych czy przyprodukcyjnych wraz z dowolnymi funkcjami tych układów. Użytkownik stale posiada dostęp do przeszłych etapów decyzyjnych projektu i może dokonywać koniecznych zmian. Narzędzia wizualizacyjne obrazujące najważniejsze charakterystyki procesu ułatwiają szybką jego ocenę pod względem organizacyjnym. Także możliwość natychmiastowego uzyskania generalnych charakterystyk wydajnościowych i kosztowych, także w odniesieniu do zadań procesu oraz wykorzystanych urządzeń i pracowników, jest pomocą dla projektanta.

Moduł interaktywnej pracy z harmonogramem PTW daje możliwość natychmiastowego wglądu w efekty wprowadzanych zmian organizacyjnych i ich przełożenie na nakłady i koszty związane z transportem wewnętrznym. Program na bieżąco śledzi, czy zachowane są ograniczenia procesu i pozwala na szybką ich zmianę w razie konieczności. Ograniczeniem programu jest brak możliwości odzwierciedlenia aspektu architektury i dróg wewnętrznych, a w konsekwencji kosztów utrzymania budynku i wyposażenia niemechanicznego.

Program, ze względu na swoją uniwersalność wymaga od użytkownika pewnej wiedzy i doświadczenia w zakresie projektowania. Konieczne jest także stałe opisywanie wszystkich działań w projekcie towarzyszącym, w celu zachowania pełnej dokumentacji działań.

Program SCHED nie oferuje wskazówek w zakresie kształtowania i optymalizacji procesów transportu wewnętrznego, za to pozwala na odwzorowanie i szybką ocenę potencjalnej koncepcji procesu. Parametry wprowadzane do programu i uzyskiwane w drodze jego użycia wynikają z implementacji przedstawionej w rozdziale 2 metodologii projektowania oraz metody harmonogramowania PTW przedstawionej w rozdziałach 3 – 5. Autor zdaje sobie sprawę, iż nie jest to podejście wyczerpujące wszystkie aspekty zagadnienia, zwłaszcza w zakresie planowania ekonomicznej opłacalności inwestycji.

7. APLIKACJA METODY

7.1. Przykład obliczeniowy – projekt technologiczny obiektu logistycznego – magazynu dystrybucyjnego z komisjonowaniem

■ Wprowadzenie

W celu zweryfikowania praktycznej użyteczności metody projektowania oraz algorytmu wyznaczania racjonalnych harmonogramów PTW posłużono się przykładem projektowym. Przykład pochodzi z praktyki i bazuje na pracującym obiekcie – magazynie dystrybucyjnym.

Obiekt logistyczny został ukształtowany i zwymiarowany wg zasad proponowanej metody. Do opracowania projektu wykorzystano program SCHED, dzięki któremu wykonano obliczenia wydajnościowe (liczba ludzi i urządzeń) oraz kosztowe (nakłady i koszty), a także obliczono wartości wskaźników oceny jakości rozwiązania. Ważnym etapem projektowym była praca interaktywna z harmonogramem PTW w programie SCHED.

■ Zadanie logistyczne

Obiekt magazynowy powinien spełniać następujące wymagania funkcjonalne:

- dobowy przepływ na wejściu do obiektu w dobie miarodajnej $\lambda_{WE}^D = 180$ jłpj/dobę (jednostek ładunkowych paletowych jednorodnych);
- współczynniki spiętrzeń dobowych na wejściu i wyjściu $\omega_{WE} = 1,3$ oraz $\omega_{WY} = 1,6$;
- dobowe wyjście ze obszaru składowania w dobie miarodajnej $\lambda_{WY}^D = 222$ jłp/dobę, z tego 25%, tj. 56 jłp wychodzi w postaci jłpj, a 166, zasila strefę komisjonowania i zostaje przekształcona w 277 jłpk/dobę (jednostek ładunkowych paletowych skompletowanych);
- połowa materiałów kompletowanych opuszcza obiekt w formie paletowej (jłpk), a połowa w postaci kartonów luzem (oz).
- struktura średniej jednostki skompletowanej wynosi $w = 10$ (wiersze), $p = 4$ (oz);
- liczba artykułów podlegająca komisjonowaniu wynosi $A = 200$;
- średni zapas magazynowy odpowiada normatywowi $N = 25$ dni;
- liczba dni roboczych w roku $d_r = 250$;
- liczba ośmiogodzinnych zmian pracy na dobę $l_z = 1$ (początek pracy o godzinie 6⁰⁰);

- liczba odcinków czasu $T = 16$;
- współczynniki wykorzystania czasu pracy w magazynie $\omega_{gt} = \omega_{zo} = 1$, $\omega_{tz} = 0,85 \div 0,9$;
Z w/w danych wyznaczono dalsze parametry zadania logistycznego:
- Przeladunek roczny na wejściu $\Lambda_{WE}^R = (\lambda_{WE}^D \cdot d_r) : \omega_{WE} = 180 \cdot 250 : 1,3 = 34\ 615$ jłpj/rok.
- Przeladunek roczny na wyjściu ze strefy składowania $\Lambda_{WY}^R = (\lambda_{WY}^D \cdot d_r) : \omega_{WY} = 222 \cdot 250 : 1,6 = 34\ 688$ jłpj/rok.
- Stopień komisjonowania: $\tau = 166 : 222 = 0,75$.
- Stopień wypełnienia jłpk: $\rho = 166 : 277 = 0,6$. Średnia jłpj zawiera więc: $(10 \cdot 4) : 0,6 = 66$ opakowań zbiorczych. Średnia jednostka skompletowana zawiera 40 oz.
- Połowa materiałów kompletowanych magazynu w postaci opakowań kartonowych, tj. $0,5 \cdot 277 \cdot 40 = 5540$ oz/dobę, pozostałe $0,5 \cdot 277 = 139$ jłpk wychodzi w postaci paletowej.

■ Ukształtowanie przestrzenne i funkcjonalne

Ukształtowanie przestrzenne i funkcjonalne obiektu magazynowego wraz z wymiarami stref przedstawiono na rys. 47. W przestrzeni magazynowej przewidziano następujące pomieszczenia i punkty obsługi jednostek paletowych i kartonowych:

Strefa składowania wysokiego z wąskimi korytarzami roboczymi

W strefie tej zlokalizowano: 5 regałów dwurzędowych i 2 jednorzędowe tworzące 6 wąskich korytarzy (VNA) z 6-ma poziomami składowania i 4-ro paletowymi gniazdami regałowymi. Wejście i wyjście ze strefy składowania obsługiwane jest przez 6 punktów zdawczo-odbiorczych ZO_{WE} i 6 punktów ZO_{WY} na czole strefy. Pojemność strefy wynika z przeladunków dobowych i rotacji zapasu i wynosi $Z_p = 3\ 456$ miejsc paletowych.

Strefa komisjonowania

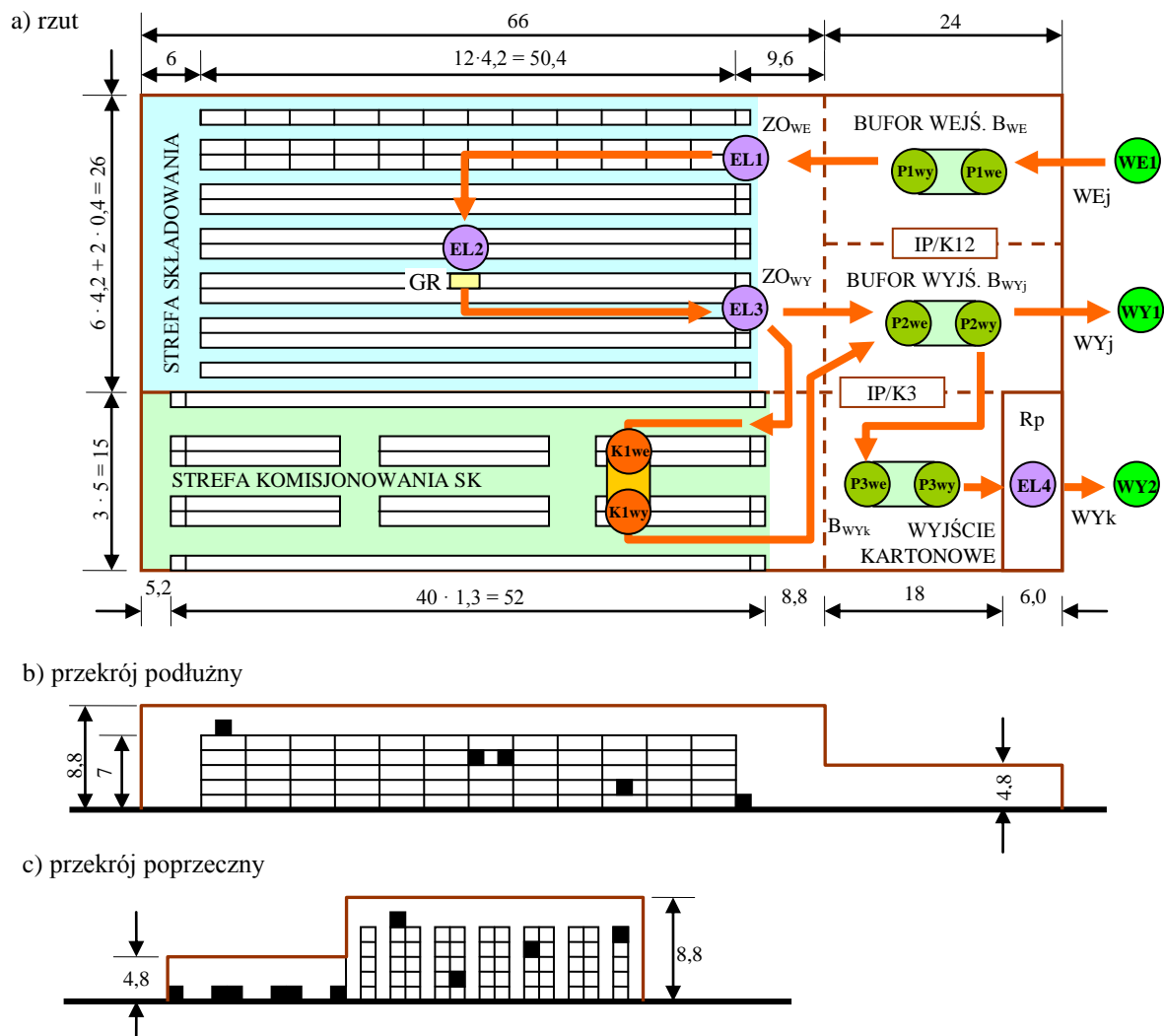
W strefie komisjonowania wyznaczono 3 korytarze do komisjonowania z poziomu posadzki. W każdym korytarzu zlokalizowano 80 miejsc paletowych, w związku z tym w strefie znajduje się 240 miejsc oferowania artykułów na paletach.

Strefy buforowe

W buforach wejściowych i wyjściowych realizowane są operacje wyladunku i załadunku oraz operacje formowania jednostek magazynowych i wysyłkowych. Pomiedzy buforami zorganizowano obszary identyfikacji (IP) i kontroli (K).

Bufor na wejściu (B_{WE}) ma powierzchnię $F_{BWE} = 24 \cdot 13,5 = 324$ m². Bufor na wyjściu dla jłpj i jłpk (B_{WYj}) ma powierzchnię $F_{BWyj} = 24 \cdot 13,5 = 324$ m². Bufor na wyjściu dla jłpk (B_{WYk}) ma powierzchnię $F_{BWyk} = 18 \cdot 15 = 270$ m².

W ramach powierzchni buforowych zainstalowano doki przeładunkowe na wejściu (WE_j) i na wyjściu (WY_{j/k}). Dla samochodów dostawczych przewidziano dodatkowo rampę przeładunkową (Rp) o powierzchni $F_{Rp} = 6 \cdot 15 = 90 \text{ m}^2$.



Rys. 47. Magazyn dystrybucyjny – przykład obliczeniowy

Źródło: Opracowanie na podstawie danych projektowych.

Łączna powierzchnia magazynu

Część wysoka magazynu (obszar składowania) ma powierzchnię $F_S = 1\,716 \text{ m}^2$. Część niska ma powierzchnię $F_N = F_K + F_{BWE} + F_{BWYj} + F_{BWYk} + F_{WRp} = 990 + 2 \cdot 324 + 270 + 90 = 1\,998 \text{ m}^2$. Łączna powierzchnia magazynu $F_M = 3\,714 \text{ m}^2$.

■ Ukształtowanie procesu transportu wewnętrznego w zakresie przepływu materiałów

Typy urządzeń i kategorie pracy ludzkiej

Wyróżniono zbiór typów urządzeń $U = \{0,1,2,3,4\}$ z podanymi: wskaźnikiem wykorzystania czasu pracy ω_{tz} , kosztem godziny k^u pracy oraz nakładem na zakup E^u :

- $u = 0$; praca wykonywana ręcznie (bez zastosowania urządzeń);
- $u = 1$; wózek unoszący paletowy napędzany, $\omega_{tz} = 0,85$, $k^{u=1} = 8$ zł/h, $E^{u=1} = 36\ 000$ zł;
- $u = 2$; wózek podnośnikowy paletowy, $\omega_{tz} = 0,85$, $k^{u=2} = 9$ zł/h, $E^{u=2} = 70\ 000$ zł;
- $u = 3$; wózek podnośnikowy z obrotowo-przesuwnymi widłami, $\omega_{tz} = 0,9$, $k^{u=3} = 12$ zł/h, $E^{u=3} = 270\ 000$ zł;
- $u = 4$; wózek kompletacyjny – unoszący, napędzany, prowadzony/kierowany w pozycji stojącej operatora, $\omega_{tz} = 0,85$, $k^{u=4} = 8$ zł/h, $E^{u=4} = 42\ 000$ zł.

Wyróżniono zbiór kategorii pracy ludzkiej $C = \{1,2,3,4,5\}$ z podanymi: współczynnikiem wykorzystania czasu pracy ω_{tz} oraz wynagrodzeniem godzinowym k^c :

- $c = 1$; operator wózka unoszącego/podnośnikowego napędzanego, $\omega_{tz} = 0,9$, $k^{c=1} = 12$ zł/h;
- $c = 2$; operator wózka podnośnikowego z obrot.-przesuw. widłami, $\omega_{tz} = 0,9$, $k^{c=2} = 15$ zł/h;
- $c = 3$; pracownik kompletacji, $\omega_{tz} = 0,9$, $k^{c=3} = 15$ zł/h;
- $c = 4$; pracownik kontroli, $\omega_{tz} = 0,85$, $k^{c=4} = 16,5$ zł/h;
- $c = 5$; pracownik realizujący załadunek ręczny na rampie, $\omega_{tz} = 0,85$, $k^{c=5} = 12$ zł/h.

Opis procesu magazynowego

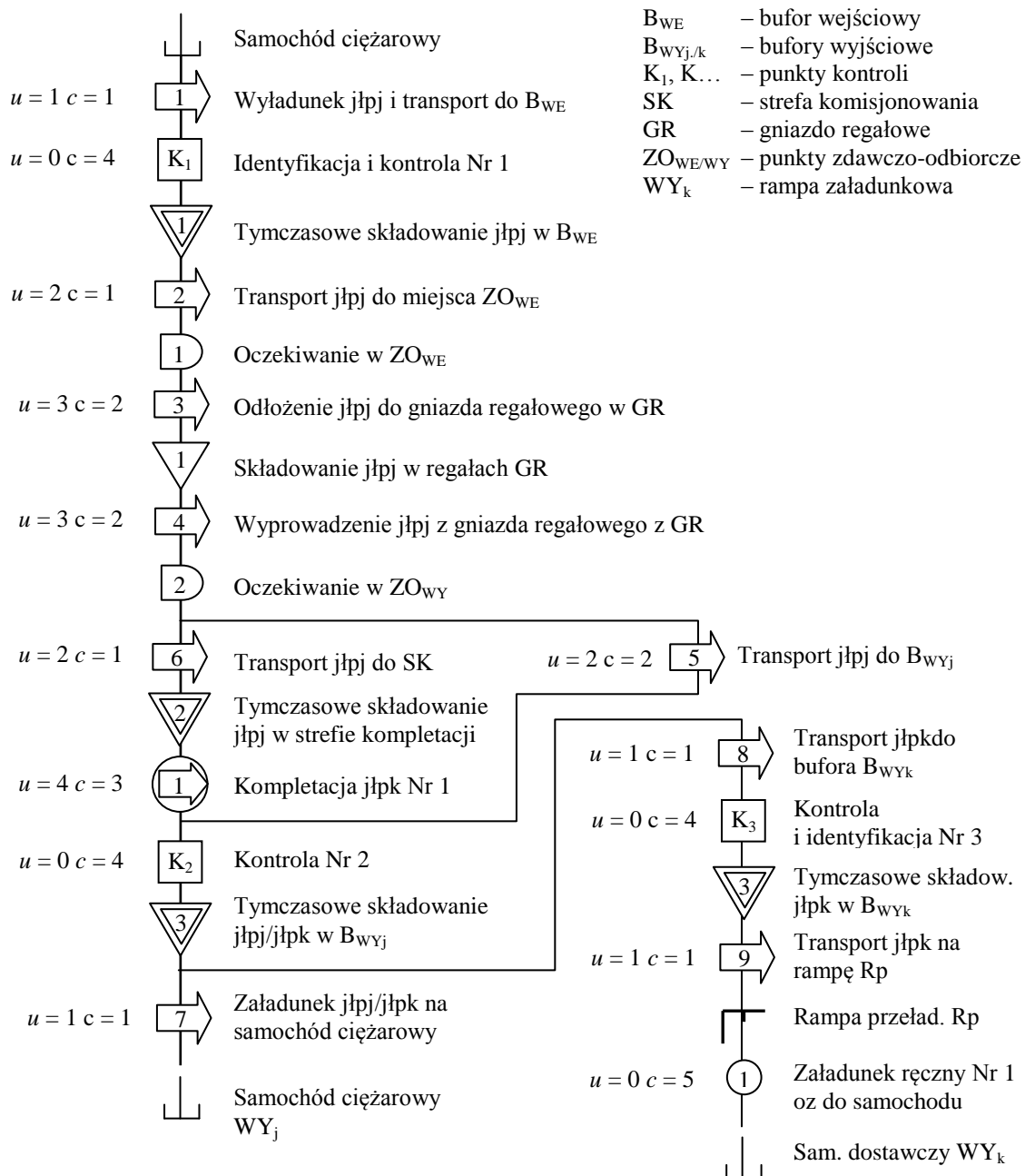
Do opisu procesu zastosowano symbolikę podaną w poprzednich rozdziałach rozprawy:

1. Cykl transportowy Nr 1: wózek $u = 1$ z operatorem $c = 1$ podejmuje jłpj z samochodu w WE_j, przewozi z identyfikacją w IP/K12 (Kontrola Nr 1) i odkłada w buforze B_{WE}; czas cyklu $t_i^{u/c} = t_1^{1/1}$, dobową liczbę cykli (jednostek) $\lambda_i^{Du/c} = \lambda_1^{D1/1} = 180$ jłpj/dobę. Jednostka kontrolowana jest na widłach wózka. Czas kontroli dodaje się do czasu cyklu.
2. Kontrola Nr 1: pracownik $c = 4$ dokonuje identyfikacji jłpj w punkcie IP/K; czas kontroli $t_i^{u/c} = t_2^{0/4}$, liczba kontroli w ciągu doby $\lambda_i^{Du/c} = \lambda_2^{D0/4} = 180$ cykli/dobę.
3. Cykl transportowy Nr 2: wózek $u = 2$ z operatorem $c = 1$ podejmuje w jłpj B_{WE} i przewozi do punktu zdawczo-odbiorcz. ZO_{WE} na czole strefy regałowej; $t_3^{2/1}$; $\lambda_3^{D2/1} = 180$ jłpj/dobę.
4. Cykl transportowy Nr 3 (pełnopaletowy): wózek $u = 3$ z operatorem $c = 2$ podejmuje jłpj w ZO_{WE}, przewozi i odkłada w gnieździe regałowym GR; $t_4^{3/2}$; $\lambda_4^{D3/2} = 180$ jłpj/dobę.
5. Cykl transportowy Nr 4 (pełnopaletowy): wózek $u = 3$ z operatorem $c = 2$ podejmuje jłpj w GR, przewozi i odkłada w ZO_{WY}; $t_5^{3/2}$; $\lambda_5^{D3/2} = 222$ jłpj/dobę.
6. Cykl transportowy Nr 5: wózek $u = 2$ z operatorem $c = 1$ podejmuje jłpj w ZO_{WY}, przewozi (z kontrolą Nr 2) i odkłada w buforze B_{WYj}; $t_6^{2/1}$; $\lambda_6^{D2/1} = 56$ jłpj/dobę.

7. Cykl transportowy Nr 6: operator $c = 1$ wózkiem $u = 2$ podejmuje jłpj w ZO_{WY} , przewozi i odkłada na miejscu oferowania w strefie komisjonowania; $t_7^{2/1}$; $\lambda_7^{D2/1} = 166$ jłpj/dobę.
8. Cykl komisjonowania Nr 1: operator $c = 3$ z wózkiem $u = 4$ kompletuje jłpk; $t_8^{4/3}$; liczba cykli kompletacyjnych $\lambda_8^{D4/3} = 166 : 0,6 = 277$ jłpk/dobę. Cykl kończy się odstawieniem jłpk w miejscu kontroli w buforze B_{WYj} .
9. Transport w ramach cyklu komisjonowania Nr 1 (został wydzielony ze względu na ograniczenia użycia programu SCHED i w rzeczywistości jest realizowany łącznie z cyklem komisjonowania!): operator $c = 3$ z wózkiem $u = 4$ przewozi (z kontrolą Nr 2) po skompletowaniu jłpk do bufora B_{WYj} ; $t_9^{4/3}$; liczba cykli $\lambda_9^{D4/3} = \lambda_8^{D4/3} = 277$ jłpk/dobę.
10. Kontrola Nr 2: pracownik $c = 4$ dokonuje kontroli jłpj oraz jłpk w buforze B_{WYj} ; czas kontroli $t_{10}^{0/4}$; liczba kontroli w ciągu doby $\lambda_{10}^{D0/4} = 56$ jłpj + 277 jłpk = 333 jłp/dobę.
11. Cykl transportowy Nr 7: wózek $u = 1$ z operatorem $c = 1$ podejmuje jłpj oraz jłpk w buforze B_{WYj} , przewozi i odkłada w samochodzie WY_j ; $t_{11}^{1/1}$; $\lambda_{11}^{D1/1} = 56$ jłpj + 139 jłpk = 195 jłp/dobę.
12. Cykl transportowy Nr 8: wózek $u = 1$ z operatorem $c = 1$ podejmuje jłpk w buforze B_{WYj} , przewozi (z kontrolą K3) i odkłada w buforze B_{WYk} ; $t_{12}^{1/1}$; $\lambda_{12}^{D1/1} = 139$ jłpk/dobę. Jednostka kontrolowana jest na widłach wózka. Czas kontroli dodaje się do czasu cyklu.
13. Kontrola Nr 3: pracownik $c = 4$ dokonuje kontroli, identyfikacji i adresowania jłpk, które mają zostać rozformowane do postaci oz; czas kontroli $t_{13}^{0/4}$; liczba kontroli w ciągu doby $\lambda_{13}^{D0/4} = 139$ jłpk/dobę.
14. Cykl transportowy Nr 9: wózek $u = 1$ z operatorem $c = 1$ podejmuje jłpk w buforze B_{WYk} , przewozi i odkłada na rampie R_p ; $t_{14}^{1/1}$; $\lambda_{14}^{D1/1} = 139$ jłpk/dobę.
15. Załadunek ręczny Nr 1: pracownik $c = 5$ podejmuje opakowania zbiorcze (oz) z jłpk ustawionej na rampie R_p , przenosi i odkłada w samochodzie ustawionym przy rampie WY_k ; czas operacji $t_{15}^{0/5}$; $\lambda_{15}^{D0/5} = 0,5 \cdot 277 \cdot 40 = 5540$ oz/dobę.

Model graficzny procesu magazynowego

Ukształtowany i opisany powyżej proces magazynowy zapisano na rys. 48 w postaci karty procesu przepływu materiałów.



Rys. 48. Karta procesu transportu wewnętrznego dla przykładowego obiektu magazynowego
 Źródło: opracowanie własne.

■ Wymiarowanie – ograniczenia harmonogramu PTW

Zadania PTW wyspecyfikowane na rys. 48 będą podlegały ograniczeniom:

- Uzupełnianie strefy komisjonowania SK nie może odbywać się w tym samym czasie co kompletowanie zleceń klientów.
- Identyfikacja i kontrola Nr 1 odbywa się równolegle z wyładunkiem jłp ze środków transportu zewnętrznego.
- Kontrola Nr 2 odbywa się równolegle z odstawianiem w buforze wyjściowym B_{WYj} jłpj pobieranych z miejsc ZO_{WY} oraz jłpk pochodzących z komisjonowania.

- Kontrola Nr 3 odbywa się równolegle z przewożeniem jednostek z B_{WYj} do B_{WYk} .
- Minimalna długość odcinka czasu przydzielanego do zadań (ziarnistość harmonogramu) nie może być mniejsza niż 60 min, przy czym dla zadań komisjonowania jest to 90 min;
- Rozładunek środków transportu zewnętrznego musi zostać zakończony do godziny 11³⁰, a pierwsze samochody pojawiają się w obiekcie o godzinie 7⁰⁰.
- Wszystkie zlecenia klientów muszą zostać przygotowane do godziny 13⁰⁰.
- Załadunek oz na samochody dostawcze musi się odbywać równolegle z komisjonowaniem lub po nim. Stąd zadania pośrednie muszą być zrealizowane w odpowiedniej kolejności.
- W strefie kompletacji nie może znajdować się jednocześnie więcej niż 8 komisjonujących. Jest to wartość graniczna ze względu na liczbę korytarzy roboczych. Przekroczenie jej oznacza konieczność zmiany technologii komisjonowania na wydajniejszą.
- Pojemność buforu B_{WE} wynosi maksymalnie 85 mp (miejsc paletowych). Średnio 5 mp jest zajętych na początku doby przez jednostki pozostałe z dnia poprzedniego.
- Wszystkie zadania muszą zostać zrealizowane w ciągu doby.

■ Wymiarowanie procesu transportu wewnętrznego ze względu na wydajność

Czasy jednostkowe cykli w procesie

Czasy jednostkowe cykli transportowych zostały obliczone wg zasad podanych w punkcie 2.4 rozprawy. Do obliczeń wykorzystano parametry katalogowe urządzeń, odległości odczytane z rys. 47 oraz normy MTM dla operacji ręcznych. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 8. Czasy te policzone zostały również w programie SCHED.

Tabela 8. Czasy realizacji zadań w przykładzie

Nr zadania i	Opis zadania	Typ urządzenia u	Kategoria pracy ludzkiej c	Droga D [m]	Wysokość podnoszenia H [m]	Czas cyklu $t_i^{u/c}$ [min]
1	Cykl transportowy Nr 1	1	1	20,0	-	2,3520
2	Kontrola Nr 1	0	4	-	-	0,7500
3	Cykl transportowy Nr 2	2	1	34	-	2,2730
4	Cykl transportowy pełnopaletowy Nr 3	3	2	50,4	7	2,5840
5	Cykl transportowy pełnopaletowy Nr 4	3	2	50,4	7	2,5840
6	Cykl transportowy Nr 5	2	1	34	-	2,2730
7	Cykl transportowy Nr 6	2	1	55,0	-	2,9350
8	Cykl komisjonowania Nr 1	4	3	52,0	-	6,6796
9	Transport w ramach cyklu komisjonowania Nr 1	4	3	14	-	1,4814
10	Kontrola Nr 2	0	4	-	-	0,6500
11	Cykl transportowy Nr 7	1	1	20	-	2,3520
12	Cykl transportowy Nr 8	1	1	15	-	2,0620
13	Kontrola Nr 3	0	4	-	-	0,5500
14	Cykl transportowy Nr 9	1	1	14	-	1,4814
15	Cykl załadunkowy ręczny Nr 1	0	5	-	-	0,2414

Źródło: opracowanie na podstawie danych projektowych.

Pracochłonność dobową realizacji zadań

Pracochłonności zadań zostały obliczone wg zasad podanych w punkcie 2.4 rozprawy. Do obliczeń wykorzystano dane z tabeli 8 oraz zadania logistycznego. Wartości pracochłonności zadań zestawiono w tabeli 9. Wartości pracochłonności przypadające na poszczególne typy urządzeń i pracowników przedstawiono w tabeli 10 i tabeli 11.

Tabela 9. Pracochłonność realizacji zadań w przykładzie

Nr zadania i	Nr zestawu p	Typ urządzenia u	Kategoria pracy ludzkiej c	Dobowa liczba powtórzeń cyklu $\lambda_i^{Du/c}$ [cykli/dobę]	Czas cyklu $t_i^{u/c}$ [min]	Pracochłonność dobową realizacji i -tego zadania $L_i^{Du/c}$ [r.h]
1	1	1	1	180	2,3520	7,0560
2	2	0	4	180	0,7500	2,2500
3	3	2	1	180	2,2730	6,8190
4	4	3	2	180	2,5840	7,7520
5	4	3	2	222	2,5840	9,5608
6	3	2	1	56	2,2730	2,1215
7	3	2	1	166	2,9350	8,1202
8	5	4	3	277	6,6796	30,8375
9	5	4	3	277	1,4814	6,8391
10	2	0	4	333	0,6500	3,6075
11	1	1	1	195	2,3520	7,6440
12	1	1	1	139	2,0620	4,7770
13	2	0	4	139	0,5500	1,2742
14	1	1	1	139	1,4814	3,4319
15	6	0	5	5540	0,2414	22,2893

Źródło: opracowanie na podstawie danych projektowych.

Tabela 10. Pracochłonność realizacji zadań ze względu na zasoby pracy w przykładzie

Nr zestawu p	Typ urządzenia u	Kategoria pracy ludzkiej c	Zadania realizowane	Pracochłonność dobową ze względu na pracę urządzeń L^{Du} [u.h]	Pracochłonność dobową ze względu na pracę ludzi L^{Dc} [r.h]
1	1	1	1,11,12,14	22,9089	22,9089
2	0	4	2,10,13	-	7,1317
3	2	1	3,6,7	17,0606	17,0606
4	3	2	4,5	17,3128	17,3128
5	4	3	8,9	37,6766	37,6766
6	0	5	15	-	22,2893

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 11. Rozłożenie pracochłonności na typy urządzeń i kategorie pracy ludzkiej

Typ urządzenia u	Pracochłonność dobową ze względu na pracę urządzeń L^{Du} [u.h]	Kategoria pracy ludzkiej c	Pracochłonność dobową ze względu na pracę ludzki L^{Dc} [r.h]
0	29,4209	1	39,9695
1	22,9089	2	17,3128
2	17,0606	3	37,6766
3	17,3128	4	7,1317
4	37,6766	5	22,2893

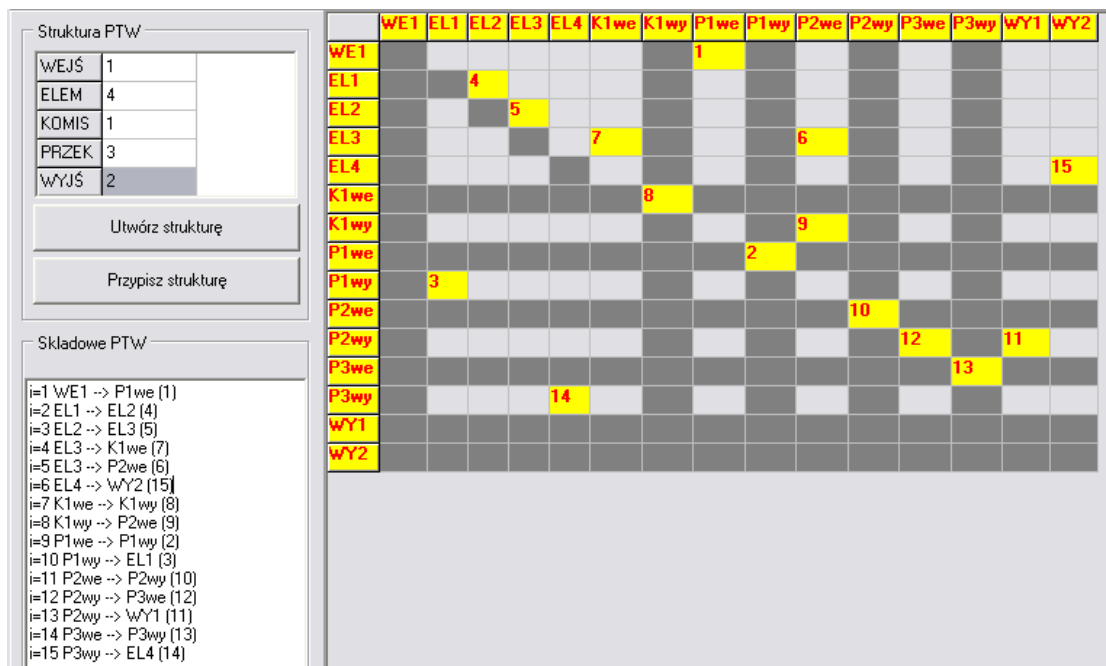
Źródło: opracowanie własne.

7.2. Odzwierciedlenie PTW i wprowadzanie danych do programu SCHED

Do programu wprowadzono dane projektowe z zachowaniem sekwencji prezentowanej w punktach 6.2 i 6.3 rozprawy. Kolejność działań przedstawiono na rysunkach.

Katalogi Typów Urządzeń oraz Kategorii Pracy Ludzkiej uzupełniono o nowe pozycje zgodnie z danymi przykładowymi. Widoki okien po aktualizacji przedstawiono na rys. 35 i rys. 36 (str. 122). Następnie wprowadzono dane do zakładki *Dane*. Efektem wykonania obliczeń na tym etapie były dobowe miarodajne przepływy materiałowe dla obiektu magazynowego, łącznie z układami komisjonowania i przetwarzania.

W kolejnym etapie, w zakładce *Struktura PTW*, przedstawiono strukturę procesu wykorzystując obiekty standardowe programu. Do odzwierciedlenia doków przeładunkowych WEj, z których odbywa się rozładunek, wykorzystano obiekt WEJŚ (WE1) (rys. 47 i rys. 49). Dla załadunków WYj oraz WYk wykorzystano obiekt WYJŚ (WY1 i WY2). Obiekty ELEM, w liczbie 4 zostały wykorzystane do odzwierciedlenia odpowiednio: miejsc zdawczo-odbiorczych ZO_{WE} (EL1) i ZO_{WY} (EL3), miejsca średniego GR w strefie składowania (EL2) i rampy przeładunkowej Rp (EL4). Obiekty PRZEK zostały wykorzystane do odzwierciedlenia miejsc kontroli i buforowania. I tak: bufor wejściowy B_{WE} z kontrolą Nr 1 (P1we-P1wy), bufor wyjściowy B_{WYj} z kontrolą Nr 2 (P2we-P2wy), bufor B_{WYk} i kontrolę Nr 3 (P3we-P3wy). Strefa komisjonowania została odzwierciedlona obiektem KOMIS (K1we-K1wy). Na strukturze opisano zbiór 15-stu zadań PTW zgodnie z opisem z punktu 7.1 oraz tabeli 8. Strukturę PTW oraz uzyskane składowe (zadania) PTW przedstawiono na rys. 49.



Rys. 49. Struktura procesu transportu wewnętrznego w programie SCHED

Źródło: Opracowanie własne – program SCHED.

Numery zadań opisanych w programie nie pokrywają się z kolejnością podaną w opisie procesu. Jest to wynikiem sposobu działania programu i odczytywania danych w zakładce *Struktura PTW*.

Następnym krokiem było rozłożenie strumieni materiałowych w systemie wg ustaleń z punktu 7.1. Wyniki rozłożenia przedstawiono na rys. 50.

Grupa 1						Tablica zbiorcza przepływów					
Nr zadania	Wchodzi	Skąd?	Ile?	Dokąd?	Wychodzi	Nr zadania	Wchodzi	Skąd?	Ile?	Dokąd?	Wychodzi
i=1	180	WE1	180	P1we	180	i=1	180	WE1	180	P1we	180
i=2	180	EL1	180	EL2	180	i=2	180	EL1	180	EL2	180
i=3	180	EL2	222	EL3	222	i=3	180	EL2	222	EL3	222
i=4	222	EL3	166	K1we	166	i=4	222	EL3	166	K1we	166
i=5			56	P2we	56	i=5			56	P2we	56
i=6	139	EL4	5540	WY2	5540	i=6	139	EL4	5540	WY2	5540
i=7	166	K1we	166	K1wy	277	i=7	166	K1we	166	K1wy	277
i=8	277	K1wy	277	P2we	277	i=8	277	K1wy	277	P2we	277
i=9	180	P1we	180	P1wy	180	i=9	180	P1we	180	P1wy	180
i=10	180	P1wy	180	EL1	180	i=10	180	P1wy	180	EL1	180
i=11	333	P2we	333	P2wy	333	i=11	333	P2we	333	P2wy	333
i=12	333	P2wy	139	P3we	139	i=12	333	P2wy	139	P3we	139
i=13			194	WY1	194	i=13			194	WY1	194
i=14	139	P3we	139	P3wy	139	i=14	139	P3we	139	P3wy	139
i=15	139	P3wy	139	EL4	139	i=15	139	P3wy	139	EL4	139

Rys. 50. Rozpływy materiałowe w programie SCHED dla procesu transportu wewnętrznego
 Źródło: Opracowanie własne – program SCHED.

Dla kolejnych *i*-tych zadań procesu dokonano przypisania *u*-tych urządzeń transportu wewnętrznego i *c*-tych kategorii pracy wg ustaleń z punktu 7.1. Do każdego zadania wybrano odpowiedni typ cyklu transportowego i wprowadzono parametry zebrane w tabeli 8. Rezultatem tego kroku było uzyskanie zbioru *p*-tych zasobów pracy (par: urządzenie + pracownik) oraz określenie ich kosztu godziny pracy i wskaźników wykorzystania czasu pracy. Wynik działania kroku przedstawiono na rys. 51.

Zestawy				
i1:	iU=1	iL=1	kj=27,8	Flg=0,85
i2:	iU=0	iL=4	kj=27,23	Flg=0,85
i3:	iU=2	iL=1	kj=28,8	Flg=0,85
i4:	iU=3	iL=2	kj=36,75	Flg=0,9
i5:	iU=4	iL=3	kj=32,75	Flg=0,85
i6:	iU=0	iL=5	kj=19,8	Flg=0,85

Rys. 51. Zestawy określone w programie SCHED

Źródło: Opracowanie własne – program SCHED.

Kolejnym etapem pracy było przydzielenie czasów dysponowanych do zadań PTW. Jest to etap budowania harmonogramu PTW i oparty jest on o zadanie optymalizacyjne sformułowane w rozdziale 4 oraz algorytmy rozwiązania przedstawione w rozdziale 5.

7.3. Praca interaktywna z harmonogramem PTW

■ Dane zadania optymalizacyjnego w programie SCHED

W drodze działania programu uzyskano automatycznie plik danych wejściowych opisujących proces transportu wewnętrznego. Fragment pliku dotyczący danych ma postać:

```

Liczba zadań: 15
Liczba zestawów:6
Liczba odcinków czasu:16
Ziarnistość: 30
Godzina rozpoczęcia: 6
Minuta rozpoczęcia: 0
Liczba buforów między-operacyjnych: 1
ZADANIA=====
1 180 2,352 1 1: wyładunek jłpj z naczepy
2 180 2,584 4 4: odłożenie jłpj do gniazda GR
3 222 2,584 4 5: pobranie jłpj z gniazda GR
4 166 2,935 3 7: zasilanie strefy komisjonow.
5 56 2,273 3 6: odstawienie jłpj do bufora BWYj
6 5540 0,2414 6 15: załadunek ręczny oz na samoch.
7 277 6,6796 5 8: komisjonowanie
8 277 1,4814 5 9: odstawianie jłpk do BWYj
9 180 0,75 2 2: Kontrola Nr 1 wejściowa (jłpj)
10 180 2,273 3 3: Odstawienie z BWE na ZOWE
11 333 0,65 2 10: Kontrola Nr 2 (jłpj+jłpj)
12 139 2,062 1 12: Transport jłpk z BWYj do BWYk
13 194 2,352 1 11: Załadunek jłpj+jłpk na samoch.
14 139 0,55 2 13: Kontrola Nr 3 (jłpk)
15 139 1,4814 1 14: Transport jłpk z BWYk na Rp
ZESTAWY=====
1 27,8 0,85 1 1
2 27,23 0,85 0 4
3 28,8 0,85 2 1
4 36,75 0,9 3 2
5 32,75 0,85 4 3
6 19,8 0,85 0 5

```

Wyróżniony został 15-sto elementowy zbiór $I = \{1, \dots, i, \dots, 15\}$ zadań PTW odpowiadający zadaniom przedstawionym na rys. 48 i w tabeli 9. Każde zadanie opisano liczbą cykli transportowych $\lambda_i^{Du/c}$, czasem wykonania jednego powtórzenia cyklu $t_i^{u/c}$ oraz przypisano do niego p -ty zestaw realizujący ze zbioru zestawów. Zbiór zestawów $P = \{1, \dots, p, \dots, 6\}$ składa się z 6-ciu elementów przy czym $p \equiv (u, c)$. Każdy zestaw opisany jest przez parę numerów: numer typu środka transportowego u ze zbioru $U = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ oraz numer kategorii pracy ludzkiej c ze zbioru $C = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Zbiory U i C są reprezentowane w programie SCHED przez Katalog Urządzeń oraz Katalog Kategorii Pracy Ludzkiej. Na podstawie danych o liczbie zmian i długości minimalnej odcinka czasu określono liczbę odcinków czasowych t tworzących zbiór $T = \{1, \dots, 16\}$.

■ Ograniczenia harmonogramu PTW

Do programu wprowadzono ograniczenia harmonogramowania PTW opisane w przykładzie. Zastosowanie mają ograniczenia opisane w punkcie 4.2 rozprawy:

- (2) *Wyłączenie przedziałów czasu*: zadanie $i = 1$ rozpoczyna się po godzinie 7^{00} i musi zakończyć się przed godziną 11^{30} , tj. $\sum_{t \in T: 2 > t > 11} x_1^{1,t} = 0$ oraz zadanie $i = 7$ musi zakończyć

się do godziny 13^{00} , tj.: $\sum_{t \in T: t > 14} x_7^{5,t} = 0$. Ograniczenia zostały zapisane w programie:

```
o_2: wyłączenie przedziałów=====
1 2 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 2
... (nieistotne)
7 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 2
... (nieistotne)
```

- (3) *Minimalny czas dysponowany zadań*: wszystkie zadania muszą zostać zrealizowane, tak więc: $\forall i \in I \sum_{t \in T} x_i^{j,t} \geq 1$. Ograniczenia zostały zapisane w programie:

```
o_3: min/max czas dysponowany=====
1 1 0
2 1 0
... (itd.)
```

- (4) *Liczba zasobów p-tego typu*: zadania $i = 7$ oraz $i = 8$ realizowane są przez zasób $p = 5$ składający się z urządzenia $u = 4$ typu obsługiwanego przez pracownika $c = 3$ kat. pracy. Ponieważ oba te zadania są de facto jednym zadaniem – komisjonowaniem, a zasób nie jest wykorzystywany w innych zadaniach, to zgodnie ze wzorem (50):

$$\max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{i \in \{7,8\}} \frac{L_i^{D5} \cdot x_i^{5,t} \cdot 16}{\sum_{s \in T^i} x_i^{5,s} \cdot 2 \cdot 8 \cdot \omega_i^5} \right\} \leq 8. \text{ Ograniczenie zostało zapisane w programie:}$$

```
o_4: liczba zasobów j=====
... (nieistotne)
5 8
... (nieistotne)
```

- (6) *Minimalna długość przydzielonego odcinka czasu*: odcinki przydzielane zadaniom muszą mieć długość 60 lub 90 min, tak więc przy $T = 16$ odcinkach oraz 1 zmianie roboczej, długość odcinka czasu t wynosi 30 min. Stąd $r_i = 3$ dla $i \in \{7,8\}$ oraz $r_i = 2$ dla $i \in \{1,2,3,4,5,6,9,10,11,12,13,14,15\}$. Ograniczenia zostały zapisane w programie:

```
o_6: ziarnistość=====
1 2
2 2
... (itd.)
7 3
8 3
9 2
... (itd.)
```

- (7) *Równoległe wykonywanie zadań*: uzupełnianie strefy komisjonowania $i = 4$ nie może odbywać się równoległe z komisjonowaniem $i = 7$, stąd: $x_4^{3,t} + x_7^{5,t} \leq 1 \quad \forall t \in T$. Z kolei pary

zadań $i = 1/9, i = 5/11, i = 7/8, i = 8/11, i = 12/14$, muszą być realizowane równoległe. Tak więc $\forall t \in T: x_1^{1,t} + x_9^{2,t} = 2, x_5^{3,t} + x_{11}^{2,t} = 2, x_7^{5,t} + x_8^{5,t} = 2, x_8^{5,t} + x_{11}^{2,t} = 2, x_{12}^{1,t} + x_{14}^{2,t} = 2$.

Ograniczenia zostały zapisane w programie:

```
o_7: równoległości zadań=====
... (nieistotne)
4 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0 0
5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
... (nieistotne)
7 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
... (nieistotne)
12 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
... (nieistotne)
```

- (8) *Sekwencje zadań*: ograniczenie to będzie miało znaczenie przy przygotowaniu wysyłek dla klientów. Zadanie $i = 12$ może być realizowane dopiero po rozpoczęciu $i = 7$, stąd:

$$\forall t \in T \left[\frac{277 \cdot \sum_{w=1}^t x_7^{5,w}}{\sum_{v \in T} x_7^{5,v}} + 0 \geq \frac{139 \cdot \sum_{r=1}^t x_{12}^{1,r}}{\sum_{s \in T} x_{12}^{1,s}} \cdot x_{12}^{1,t} \right]. \text{ Podobnie pary zadań } i = 12/15,$$

$i = 15/6$. Ograniczenia zostały zapisane w programie:

```
o_8: sekwencje zadań=====
... (nieistotne)
6 15 0 40
... (nieistotne)
12 7 0 1
... (nieistotne)
15 12 0 1
```

- (9) *Pojemność buforów*: liczba mp w B_{WE} wynosi 85, dodatkowo na początku pracy znajduje się tam średnio 5 jednostek. Ustanowiono bufor $b = 1$, o pojemności $I^l = 70$ jłp oraz $S^l = 5$ jłp. Zadanie $i = 1$ napędza bufor, a zadanie $i = 10$ opróżnia go, stąd:

$$\max_{[t \in T]} \left\{ \sum_{s=1}^t x_1^{1,s} \cdot \sum_{w \in T^i} x_1^{1,w} - \sum_{s=1}^t x_{10}^{3,s} \cdot \sum_{w \in T^k} x_{10}^{3,w} + 5 \right\} \leq 85. \text{ Ograniczenie zapisano w programie:}$$

```
o_9: buforowanie=====
1 85 5 1,10
```

■ Generowanie rozwiązań dopuszczalnych i dyskusja wyników

Praca z harmonogramem dla danych przykładowych odbywała się wg zasad podanych w punkcie 5.3 (str. 111) i polegała w głównej mierze na śledzeniu kontrolek ograniczeń oraz wartości funkcji celu podczas dokonywania zmian w siatce harmonogramu. Dla kolejnych wariantów harmonogramu spełniających ograniczenia zapisano pliki wynikowe do porównań. Pliki zawierają szczegółowe charakterystyki wydajnościowe i kosztowe wariantów i są

podstawą wyboru rozwiązania racjonalnego. Przykład takiego pliku, zawierający opis rozwiązania dopuszczalnego nr 4 przedstawiono w Załączniku nr 2.

Rozwiązanie bazowe harmonogramu PTW zostało wyznaczone poprzez losowe przydzielenie czasu dysponowanego do zadań tak, aby spełnione były ograniczenia. Kolejne działania interaktywne z harmonogramem doprowadziły do wygenerowania wariantów projektowych. Parametry siedmiu rozwiązań o najlepszych cechach zestawiono w tabeli 12.

Tabela 12. Zestawienie wyników pracy z harmonogramem PTW dla obiektu przykładowego

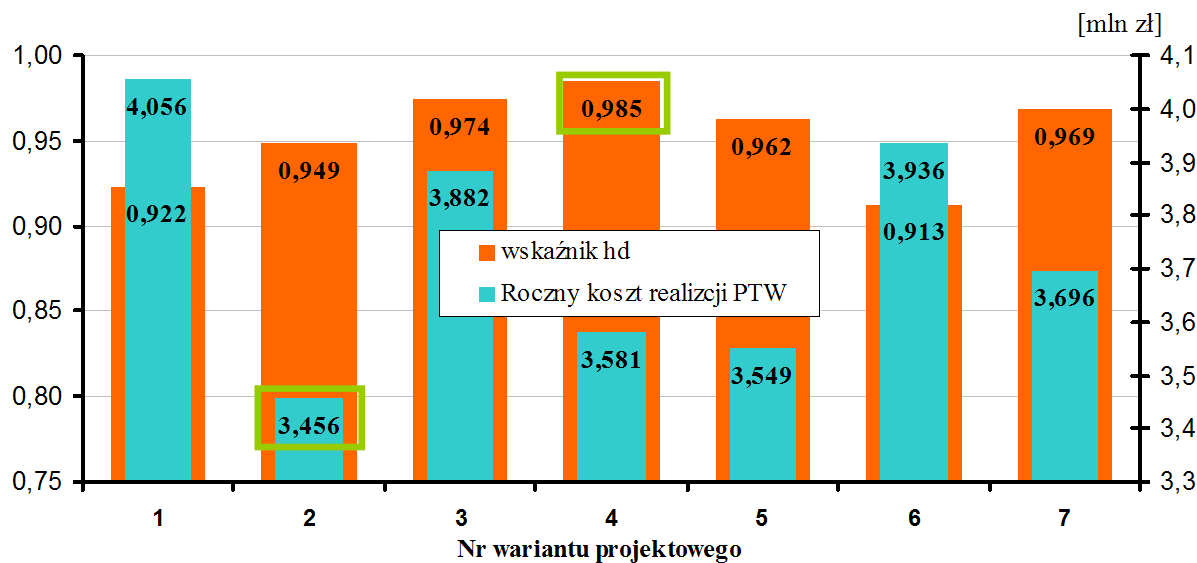
Parametr	Waga	Nr rozwiązania dopuszczalnego						
		1 (bazowe)	2	3	4	5	6	7
Pracochłonność spr. ze względu na pracę zestawów $F_{1a}(\mathbf{X})$ [r.h]	0,0	25,766	26,165	23,855	24,628	25,53	26,757	24,603
Pracochłonność spr. ze względu na pracę urządzeń $F_{1b}(\mathbf{X})$ [r.h]	0,2	6,318	5,944	6,244	5,677	5,884	6,194	5,623
Pracochłonność spr. ze względu na pracę ludzi $F_{1c}(\mathbf{X})$ [r.h]	0,2	12,005	12,255	11,125	11,485	11,906	12,463	11,503
Wskaźnik organizacyjny $F_{2a}(\mathbf{X})$	0,15	0,89	0,877	0,961	0,931	0,898	0,857	0,932
Wskaźnik organiz. $F_{2b}(\mathbf{X})$ [r.h]	0,0	22,656	25,847	7,363	13,549	20,766	30,585	13,348
Równomierność obciążenia pracą zestawów $F_{3a}(\mathbf{X})$	0,0	0,661	0,643	0,722	0,701	0,682	0,631	0,648
Równomierność obciążenia pracą urządzeń $F_{3b}(\mathbf{X})$	0,2	0,717	0,757	0,745	0,756	0,764	0,71	0,731
Równomierność obciążenia pracą kat. pracy $F_{3c}(\mathbf{X})$	0,2	0,818	0,836	0,864	0,867	0,842	0,813	0,845
Pojemność buforów $F_4(\mathbf{X})$ [mp]	0,05	80	70	70	70	70	77	80
Liczba zatrudnionych ogółem		29	24	28	26	26	28	26
Roczny koszt realizacji PTW [zł/rok]		4 056 000 (+17,37%) 7 z 7	3 456 000 (+0,00%) 1 z 7	3 882 000 (+12,33%) 5 z 7	3 581 000 (+3,61%) 3 z 7	3 549 000 (+2,70%) 2 z 7	3 936 000 (+13,9%) 6 z 7	3 696 000 (+6,94%) 4 z 7
Roczny koszt operacyjny pracy ludzi [zł/rok]		1 516 000 (+18,21%)	1 282 000 (+0,00%)	1 457 000 (+13,63%)	1 376 000 (+7,29%)	1 376 000 (+7,29%)	1 469 000 (+14,57%)	1 376 000 (+7,29%)
Roczny koszt operacyjny pracy urządzeń [zł/rok]		284 594 (+0,00%)	284 606 (+0,01%)	284 594 (+0,00%)	284 586 (+0,00%)	284 597 (+0,01%)	284 583 (+0,00%)	284 603 (+0,01%)
Roczny koszt eksploatacyjny pracy urządzeń [zł/rok]		2 541 000 (+16,88%)	2 174 000 (+0,00%)	2 425 000 (+11,57%)	2 205 000 (+1,44%)	2 174 000 (+0,00%)	2 467 000 (+13,50%)	2 320 000 (+6,75%)
Wskaźnik h_d jakości rozwiązania		0,9224	0,9487	0,9745	0,9851	0,9624	0,9127	0,9689

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 12 zawiera wartości liczbowe funkcji celu danych wzorami (60) – (67) oraz dodatkowo liczbę pracowników i ważniejsze parametry kosztowe wariantów obliczone przez program SCHED. Dla każdego wariantu została wyznaczona wartość wskaźnika h_d jakości rozwiązania danego wzorem (70). W celu obliczenia wskaźnika przyjęto następujące wagi dla funkcji kryterium: $w_{1a} = w_{2b} = w_{3a} = 0$; $w_{1b} = w_{1c} = w_{3b} = w_{3c} = 0,2$; $w_{2a} = 0,15$; $w_4 = 0,05$. Wartości wskaźników w_{1a} i w_{3a} zostały wyzerowane, gdyż w sytuacji, w której znane są parametry urządzeń i kategorii pracy ludzkiej oraz ich przydział do zadań nie należy opierać

oceny o wyliczenia dotyczące zestawów (funkcje celu $F_{1a}(\mathbf{X})$, $F_{3a}(\mathbf{X})$). Wyliczenia dotyczące zestawów stosuje się kiedy informacje o zasobach realizujących PTW są niepełne lub nie ma potrzeby rozważania oddzielnie pracowników i urzędzeń (punkt 2.3 str. 49 oraz 2.4 str. 61).

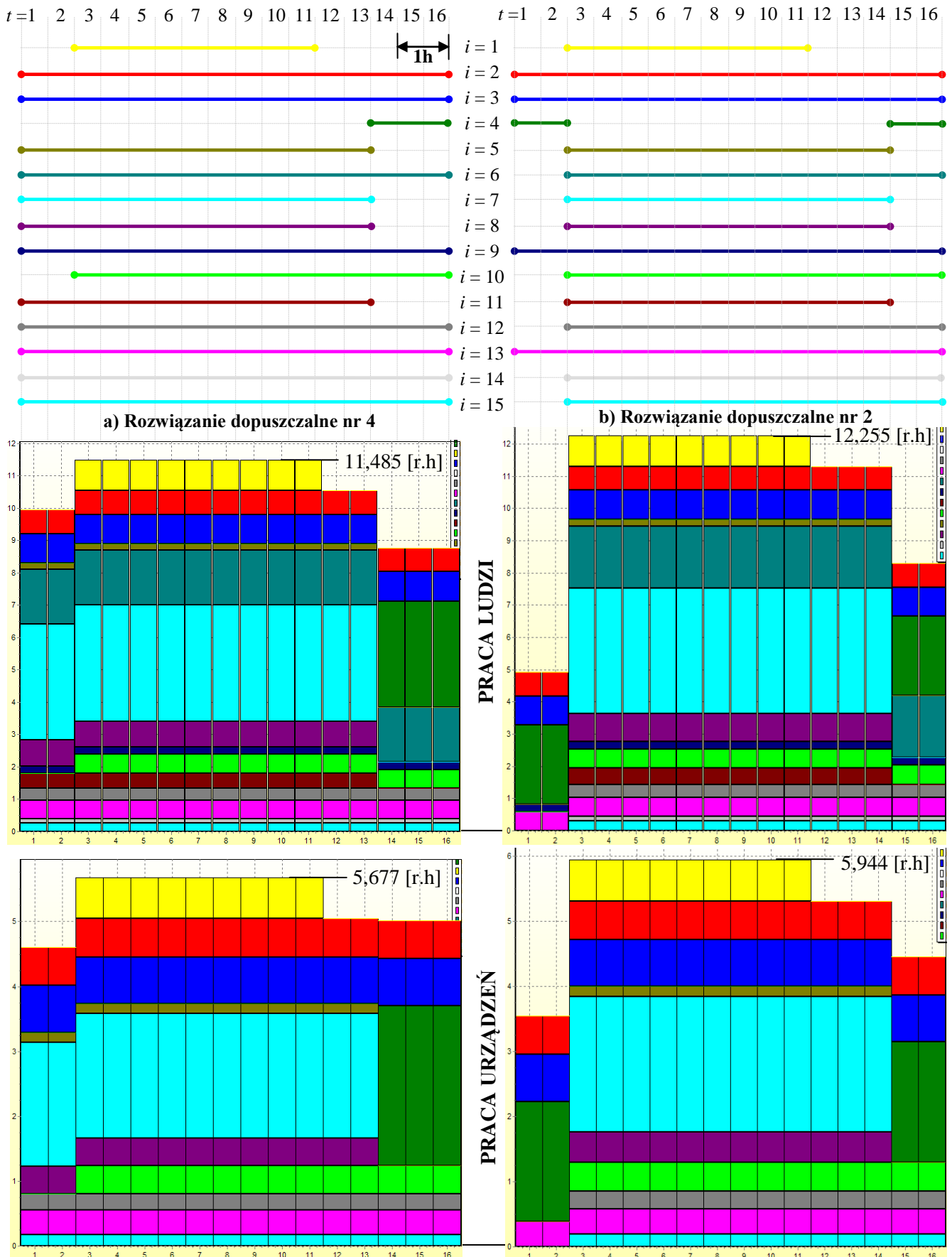
Rozwiązaniem racjonalnym technologicznie ze względu na przyjęte kryteria jest rozwiązanie nr 4. Jednakże okazuje się, że najtańsza wersja procesu jest realizowana w przypadku rozwiązania nr 2, a różnica wynosi +3,61 % względem rozwiązania nr 4. Na rys. 52 przedstawiono graficzną interpretację wskaźnika h_d oraz rocznego kosztu realizacji PTW obejmującego pracę ludzi i urzędzeń dla wszystkich rozwiązań. Należy zauważyć, że dla wszystkich siedmiu rozwiązań dopuszczalnych wartości $h_d \approx 1$ i nie ma pośród nich odchyleń znaczących. Wynika to z faktu, iż w trakcie pracy interaktywnej z harmonogramem PTW eliminowane były rozwiązania nieracjonalne, tj. takie, które znacznie odbiegały na niekorzyść parametrami od pozostałych. Przedstawione w tabeli 12 warianty PTW są więc konkurencyjne. Harmonogramy PTW oraz wykresy pracochłonności sprowadzonej ze względu na pracę urzędzeń oraz ludzi dla rozwiązań nr 2 i 4 przedstawiono na rys. 53.



Rys. 52. Zestawienie wyników dla obiektu przykładowego

Źródło: Opracowanie własne.

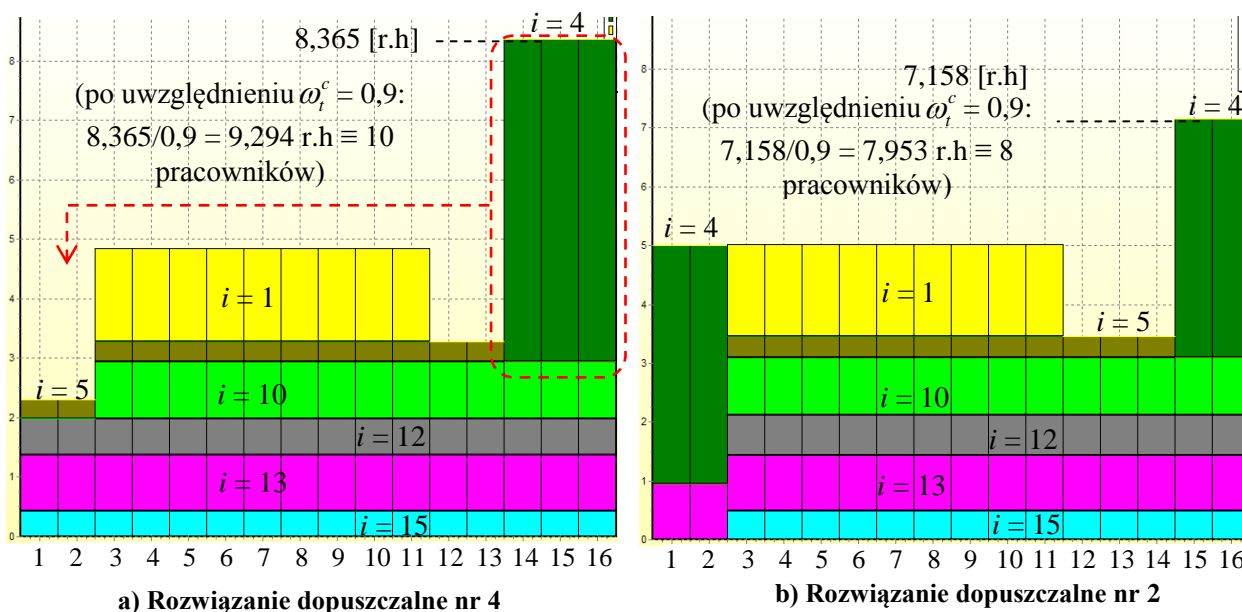
Rozwiązanie nr 4 charakteryzuje się względnie najmniejszymi wartościami pracochłonności sprowadzonej pracy ludzi i urzędzeń oraz równomiernością obciążenia pracą. Co prawda parametry rozwiązania nr 3 (tabela 12) są nieznacznie korzystniejsze, jednakże są to pozycje, dla których $w = 0$ i nie mają wpływu na wartość wskaźnika h_d . Przy tak dobranych wagach wpływ wybranych funkcji celu na wybór rozwiązania racjonalnego jest zrównoważony. Dzięki temu PTW powinien wykazywać się jednocześnie niskim kosztem realizacji (wpływ pracochłonności sprowadzonej) oraz dobrym wykorzystaniem środków pracy (wpływ równomierności wykorzystania urzędzeń i kategorii pracy ludzkiej).



Rys. 53. Harmonogramy PTW i wykresy pracochłonności sprowadzonej dla rozwiązań nr 2 i 4 przykładu

Źródło: Opracowanie własne – program SCHED.

Najkorzystniejsze technologicznie rozwiązanie nr 4 jest 3-cim w kolejności jeżeli chodzi o roczne koszty realizacji PTW z różnicą +3,61% względem rozwiązania nr 2. Różnica bezwzględna wynosi ok. 125 tys. zł/rok. Za rozbieżność tą odpowiedzialny jest roczny koszt operacyjny pracy ludzi, który w przypadku rozwiązania nr 4 jest wyższy o ok. 125 tys. zł/rok, tj. o 7,29% niż w przypadku rozwiązania nr 2. Należy zauważyć, że przy rozwiązaniu nr 4 zatrudniono 26 osób na dobę, tj. o 2 więcej niż w rozwiązaniu nr 2. Różnica ta wynika z większego zapotrzebowania na pracowników $c = 1$ kategorii pracy (Operator 1). W obu przypadkach pracownicy ci są zaangażowani do zadań $i = 1,4,5,10,12,13,15$, a różnica w ich liczbie wynika ze stopnia wykorzystania ich czasu pracy w obu rozwiązaniach. Rozłożenie pracochłonności rzeczywistej pracownika $c = 1$ dla obu wariantów przedstawiono na rys. 54.



Rys. 54. Wykres pracochłonności rzeczywistej pracy pracowników $c = 1$ kategorii pracy dla rozwiązań nr 2 i 4 przykładowo

Źródło: Opracowanie własne – program SCHED.

W części a) rysunku widoczne jest, że należy zatrudnić 10 pracowników $c = 1$ kategorii pracy, chociaż przez większość czasu, tj. przez 6,5 h (odcinki czasu od $t = 1$ do 13) pracuje jedynie ok. 6 osób. Przy takim układzie harmonogramu PTW pozostali pracownicy są potrzebni przez 1,5 h, jednakże jeżeli są zatrudnieni na pełny etat, to koszt ich utrzymania jest liczony dla pełnej zmiany. Na części b) rysunku przedstawiono analogiczny wykres dla rozwiązania nr 2. Widoczne jest, że dzięki zwiększeniu czasu dysponowanego zadania $i = 4$ z $t_{dbr}^4 = 1,5$ h do $t_{dbr}^4 = 3$ h oraz rozbięciu go na dwie części uzyskano lepsze wykorzystanie pracowników $c = 1$ kategorii pracy i zmniejszenie liczby pracowników do 8. Wyniki dotyczące liczby ludzi i urządzeń oraz ich kosztów pracy, a także koszty realizacji zadań PTW

według rozwiązań nr 4 i 2 zestawiono w tabelach 13 – 15. Plik wynikowy programu SCHED dla rozwiązania nr 4 przedstawiono w Załączniku nr 2.

Tabela 13. Koszty realizacji zadań PTW dla obiektu przykładowego wg rozwiązań 4 i 2

Zadanie PTW	Rozwiązanie nr 4			Rozwiązanie nr 2		
	Dobowy koszt realizacji zadania			Dobowy koszt realizacji zadania		
	Całkowity	Praca urzędzeń	Praca ludzi	Całkowity	Praca urzędzeń	Praca ludzi
<i>i</i> = 1 (1: wyładunek jłpj z naczepy)	244,61 zł	66,41 zł	178,20 zł	244,61 zł	66,41 zł	178,20 zł
<i>i</i> = 2 (4: odłożenie jłpj do gniazda GR)	499,36 zł	103,36 zł	396,00 zł	499,36 zł	103,36 zł	396,00 zł
<i>i</i> = 3 (5: pobranie jłpj z gniazda GR)	523,48 zł	127,48 zł	396,00 zł	523,48 zł	127,48 zł	396,00 zł
<i>i</i> = 4 (7: zasilanie strefy komisjonowania)	293,88 zł	85,98 zł	207,90 zł	283,98 zł	85,98 zł	198,00 zł
<i>i</i> = 5 (6: odstawienie jłpj do buf. BWYj)	151,16 zł	22,46 zł	128,70 zł	141,26 zł	22,46 zł	118,80 zł
<i>i</i> = 6 (15: załadunek ręczny oz na samo.)	633,60 zł	0,00 zł	633,60 zł	554,4 zł	0,00 zł	554,40 zł
<i>i</i> = 7 (8: komisjonowanie)	1255,49 zł	290,24 zł	965,25 zł	1181,24 zł	290,24 zł	891,00 zł
<i>i</i> = 8 (9: odstawianie jłpk do BWYj)	386,12 zł	64,37 zł	321,75 zł	361,37 zł	64,37 zł	297,00 zł
<i>i</i> = 9 (2: Kontrola Nr 1 wejściowa (jłpj))	217,80 zł	0,00 zł	217,8 zł	217,8 zł	0,00 zł	217,80 zł
<i>i</i> = 10 (3: Odstawienie z BWE na ZOwe)	349,40 zł	72,20 zł	277,20 zł	349,4 zł	72,20 zł	277,20 zł
<i>i</i> = 11 (10: Kontrola Nr 2 (jłpj+jłpk))	176,96 zł	0,00 zł	176,96 zł	163,35 zł	0,00 zł	163,35 zł
<i>i</i> = 12 (12: Tran. jłpk z BWYj do BWYk)	203,36 zł	44,96 zł	158,40 zł	183,56 zł	44,96 zł	138,60 zł
<i>i</i> = 13 (11: Załadunek jłpj+jłpk na samo.)	388,37 zł	71,57 zł	316,80 zł	388,37 zł	71,57 zł	316,80 zł
<i>i</i> = 14 (13: Kontrola Nr 3 (jłpk))	217,80 zł	0,00 zł	217,80 zł	190,57 zł	0,00 zł	190,57 zł
<i>i</i> = 15 (14: Transp. jłpk z BWYk na Rp)	190,70 zł	32,30 zł	158,40 zł	170,9 zł	32,30 zł	138,60 zł

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 14. Zestawienie urzędzeń TW dla obiektu przykładowego wg rozwiązań 4 i 2

Parametr	Rozwiązanie nr 4	Rozwiązanie nr 2
<i>u</i> = 0 (praca ręczna)		
Praca ręczna przy zadaniach <i>i</i> = 6,9,11,14. Brak kosztów i nakładów wynikających z pracy urzędzeń.		
<i>u</i> = 1 (wózek unoszący paletowy napędzany)		
Liczba urzędzeń	4,17, przyjęto 5 z rezerwą: 16,6%	4,343, przyjęto 5 z rezerwą: 13,15%
Zaangażowanie urzędzeń do zadań PTW	<i>i</i> = 1 / 1,845 szt. (4,5 h pracy), <i>i</i> = 12 / 0,702 szt. (8 h pracy), <i>i</i> = 13 / 1,118 szt. (8 h pracy), <i>i</i> = 15 / 0,505 szt. (8 h pracy)	<i>i</i> = 1 / 1,845 szt. (4,5 h pracy), <i>i</i> = 12 / 0,803 szt. (7 h pracy), <i>i</i> = 13 / 1,118 szt. (8 h pracy), <i>i</i> = 15 / 0,577 szt. (7 h pracy)
Dobowy koszt operacyjny	215,22 zł/dobę	215,22 zł/dobę
Roczny koszt operacyjny	62 413,8 zł/rok	624 13,8 zł/rok
Roczny koszt eksploatacyjny	80 413,8 zł/rok	804 13,8 zł/rok
Nakład	180 000 zł	180 000 zł
<i>u</i> = 2 (wózek podnośnikowy paletowy)		
Liczba urzędzeń	7,515, przyjęto 8 z rezerwą: 6,06%	5,923, przyjęto 6 z rezerwą: 1,29%
Zaangażowanie do zadań PTW	<i>i</i> = 4 / 6,369 szt. (1,5 h pracy), <i>i</i> = 5 / 0,384 szt. (6,5 h pracy), <i>i</i> = 10 / 1,146 szt. (7 h pracy)	<i>i</i> = 4 / 4,777 szt. (2 h pracy), <i>i</i> = 5 / 0,416 szt. (6 h pracy), <i>i</i> = 10 / 1,146 szt. (7 h pracy)
Dobowy koszt operacyjny	180,64 zł/dobę	180,65 zł/dobę
Roczny koszt operacyjny	52 386,62 zł/rok	523 87,92 zł/rok
Roczny koszt eksploatacyjny	108 386,62 zł/rok	943 87,92 zł/rok
Nakład	560 000 zł	420 000 zł
<i>u</i> = 3 (wózek podnośnikowy z obrotowo-przesuwnymi widłami)		
Liczba urzędzeń	2,405, przyjęto 3 z rezerwą: 19,85%	2,405, przyjęto 3 z rezerwą: 19,85%
Zaangażowanie do zadań PTW	<i>i</i> = 2 / 1,077 szt. (8 h pracy), <i>i</i> = 3 / 1,328 szt. (8 h pracy)	<i>i</i> = 2 / 1,077 szt. (8 h pracy), <i>i</i> = 3 / 1,328 szt. (8 h pracy)
Dobowy koszt operacyjny	230,88 zł/dobę	230,88 zł/dobę

c.d. Tabeli 14

Parametr	Rozwiązanie nr 4	Rozwiązanie nr 2
Roczny koszt operacyjny	66 955,2 zł/rok	669 55,2 zł/rok
Roczny koszt eksploatacyjny	147 955,2 zł/rok	147 955,2 zł/rok
Nakład	810 000 zł	810 000 zł
u = 4 (wózek kompletacyjny)		
Liczba urządzeń	6,819, przyjęto 7 z rezerwą: 2,58%	7,388, przyjęto 8 z rezerwą: 7,66%
Zaangażowanie do zadań PTW	i = 7 / 5,581 szt. (6,5 h pracy), i = 8 / 1,238 szt. (6,5 h pracy)	i = 7 / 6,047 szt. (6 h pracy), i = 8 / 1,341 szt. (6 h pracy)
Dobowy koszt operacyjny	354,59 zł/dobę	354,62 zł/dobę
Roczny koszt operacyjny	102 830,52 zł/rok	102 840,96 zł/rok
Roczny koszt eksploatacyjny	132 230,52 zł/rok	136 440,96 zł/rok
Nakład	294 000 zł	336 000 zł

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 15. Zestawienie pracowników dla obiektu przykładowego wg rozwiązań 4 i 2

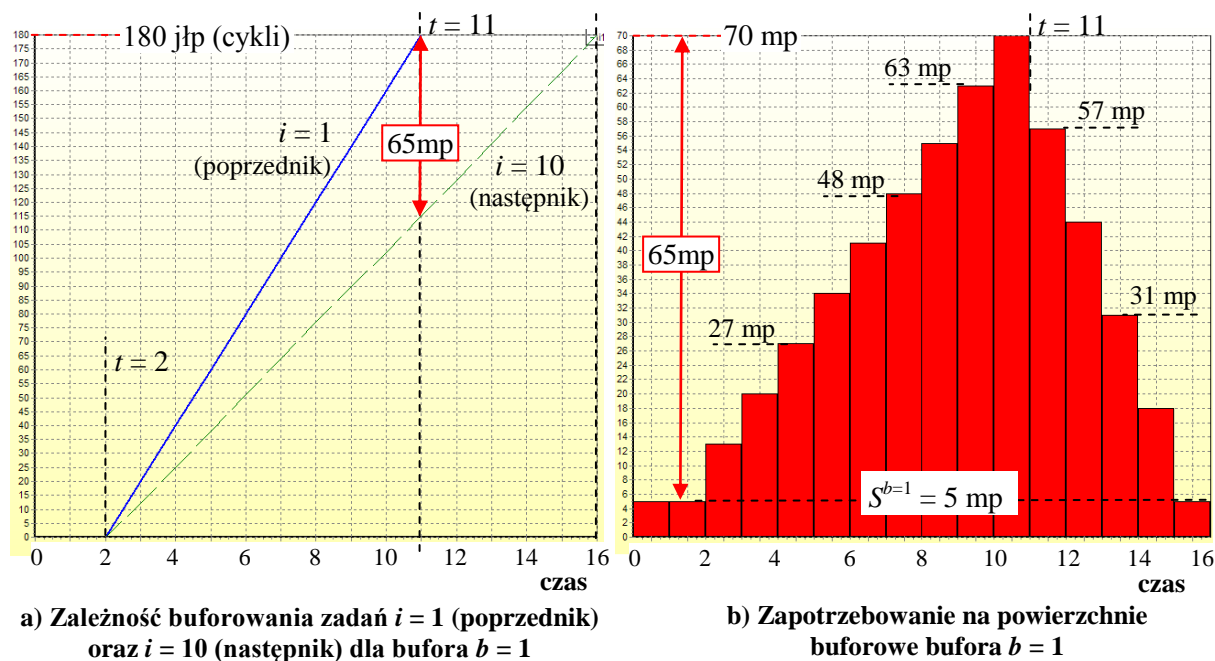
Parametr	Rozwiązanie nr 4	Rozwiązanie nr 2
c = 1 (operator wózka unoszącego/podnośnikowego paletowego napędzanego – Operator 1)		
Liczba pracowników	Zmiana 1: / 9,294 os., zatrudniono 10 os. z rezerwą: 7,06%	Zmiana 1: / 7,953 os., zatrudniono 8 os. z rezerwą: 0,59%
Zaangażowanie do zadań PTW	i = 1,4,5,10,12,13,15	
Dob. koszt operacyjny pracownika	158,4 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów),	
Całkowity dobowy koszt operacyjny	1 584 zł/dobę	1 267,2 zł/dobę
Roczny koszt operacyjny pracownika	46 707,72 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)	
Całkowity roczny koszt operacyjny	467 077,2 zł/rok	373 661,76 zł/rok
c = 2 (operator wózka podnośnikowego z obrotowo-przesuwnymi widłami – Operator 2)		
Liczba pracowników:	Zmiana 1: / 2,405os., zatrudniono 3 os. z rezerwą: 19,85%	Zmiana 1: / 2,405os., zatrudniono 3 os. z rezerwą: 19,85%
Zaangażowanie do zadań PTW	i = 2,3	
Dob. koszt operacyjny pracownika	198 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)	
Całkowity dobowy koszt operacyjny	594 zł/dobę	
Roczny koszt operacyjny pracownika	58 568,4 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)	
Całkowity roczny koszt operacyjny	175 705,2 zł/rok	175 705,2 zł/rok
c = 3 (pracownik kompletacji/komisjonowania)		
Liczba pracowników	Zmiana 1: / 6,44 os., zatrudniono 7 os. z rezerwą: 7,99%	Zmiana 1: / 6,977 os., zatrudniono 7 os. z rezerwą: 0,33%
Zaangażowanie do zadań PTW	i = 7,8	
Dob. koszt operacyjny pracownika	198 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)	
Całkowity dobowy koszt operacyjny	1 386 zł/dobę	
Roczny koszt operacyjny pracownika	58 568,4 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)	
Całkowity roczny koszt operacyjny	411 586,56 zł/rok	
c = 4 (pracownik kontroli – Kontroler)		
Liczba pracowników	Zmiana 1: / 1,171 os., zatrudniono 2 os. z rezerwą: 41,44%	Zmiana 1: / 1,252 os., zatrudniono 2 os. z rezerwą: 37,38%
Zaangażowanie do zadań PTW	i = 9,11,14	
Dob. koszt operacyjny pracownika	217,8 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)	
Całkowity dobowy koszt operacyjny	435,6 zł/dobę	
Roczny koszt operacyjny pracownika	64981,07 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)	
Całkowity roczny koszt operacyjny	129962,14 zł/rok	
c = 5 (pracownik załadunku ręcznego)		
Liczba pracowników	Zmiana 1: / 3,278 os., zatrudniono 4 os. z rezerwą: 18,05%	Zmiana 1: / 3,746, zatrudniono 4 os. z rezerwą: 6,35%
Zaangażowanie do zadań PTW	i = 6	
Dob. koszt operacyjny pracownika	158,4 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)	
Całkowity dobowy koszt operacyjny	633,6 zł/dobę	
Roczny koszt operacyjny pracownika	47 810,19 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)	
Całkowity roczny koszt operacyjny	191 240,76 zł/rok	

Źródło: Opracowanie własne.

Dzięki wykorzystaniu aplikacji SCHED możliwa staje się natychmiastowa analiza składowych PTW ze względu na ograniczenia, wykorzystanie ludzi, urządzeń, czasu pracy i realizację zadań. Możliwe też jest błyskawiczne określanie wpływu zmian na cały proces i jego koszty, czego przykładem są działania zaprezentowane na rys. 54.

Pracochłonność sprowadzona jako parametr ekonomiczno-kosztowy nie uwzględnia zaokrągleń do liczb całkowitych związanych z obliczaniem liczby pracowników i urządzeń, co może powodować iż względna niższa pracochłonność sprowadzona procesu będzie szła w parze z nieznacznie większym kosztem realizacji procesu przy porównywaniu rozwiązań.

Kolejną kwestią rozważaną przy wyborze rozwiązania najlepszego dla przykładu jest powierzchnia buforowa w buforze wejściowym B_{WE} . Oba rozwiązania ustalają niezbędną pojemność bufora na 70 jłp. Wykres wykorzystania bufora $b = 1$ przez parę zadań $i = 1$ oraz $i = 10$ (dla obu rozwiązań jednakowy) przedstawia rys. 55.



Rys. 55. Wykresy zależności buforowania i zapotrzebowania na powierzchni buforowe dla rozwiązań nr 2 i 4 przykładu (mp = miejsce paletowe)

Źródło: Opracowanie własne – program SCHED.

Ponieważ na początku zmiany roboczej w buforze znajduje się $S^{b=1} = 5$ jłp, obciążają one dodatkowo bufor wejściowy i ilość taka powinna zostać po zakończeniu pracy (uwaga! Dotyczy to miarodajnych przepływów materiałowych, które są wyliczane na bazie średniej arytmetycznej – patrz punkt: „Współczynniki spiętrzeń, a projekt obiektu logistycznego” str. 38. W rzeczywistej eksploatacji wielkość ta nie będzie stała). Z uwagi na różnice w przydzielonym do zadań $i = 1$ oraz $i = 10$ czasie dysponowanym, konieczne jest zapewnienie odpowiednich powierzchni buforowych do realizacji tych zadań. Program

SCHEd pozwolił na wyznaczenie tych powierzchni i dokonanie oceny jakości harmonogramu PTW w aspekcie powierzchni buforowych.

■ Podsumowanie

Proces projektowania obiektu przykładowego został przeprowadzony zgodnie z procedurą proponowaną w rozprawie. Zastosowanie tej procedury systematyzuje proces projektowy i uwypukla schemat pętli iteracyjnej projektowania. To z kolei pozwala na zaakcentowanie podstawowych punktów decyzyjnych i ich wpływu na wynik końcowy projektu.

Dzięki wykorzystaniu programu SCHEd możliwe było przejście przez wszystkie fazy projektowania obiektu logistycznego zaprezentowane w rozprawie. Charakterystyki PTW uzyskane w drodze kształtowania i wymiarowania stały się podstawą dla etapu harmonogramowania PTW i oceny jego organizacji poprzez proponowane funkcje celu oraz ze względów kosztowych. Moduł harmonogramowania PTW umożliwił wygenerowanie kilku konkurencyjnych harmonogramów realizacji procesu z jednoczesnym podaniem wszystkich najważniejszych charakterystyk technologiczno-kosztowych pracy. Dzięki temu możliwe było wybranie i porównanie rozwiązania najkorzystniejszego technologicznie i kosztowo. Ponadto dokonano analizy składowych procesu transportu wewnętrznego, tj. zadań PTW ze względu na zapotrzebowanie na zasoby pracy (urządzenia + pracownicy) oraz zasobów pracy ze względu na realizowane zadania. Program pozwolił także na określenie obciążenia pracą poszczególnych odcinków czasu pracy w dobie i wskazanie miejsc spięrzeń pracy.

Użycie programu SCHEd znacznie skróciło fazę obliczeniową i umożliwiło wprowadzanie zmian do procesu z natychmiastową obserwacją ich skutków. Działanie to jest właściwie podstawą pracy interaktywnej z harmonogramem PTW.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone rozważania w zakresie projektowania obiektów logistycznych w aspekcie harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego (PTW) pozwoliły na przedstawienie teoretycznych i aplikacyjnych aspektów tego zagadnienia. Rozważania nad teoretycznymi aspektami zagadnienia doprowadziły do:

- Usystematyzowania problematyki z zakresu projektowania obiektów logistycznych opierających swoją działalność na układach transportu wewnętrznego.
- Zaproponowania metody projektowania obiektów logistycznych w schemacie pętli iteracyjnej projektowania.
- Wskazania miejsc krytycznych w procedurze projektowej, w których podejmowane są decyzje o znacznej wadze dla realizacji projektu.
- Sformalizowania charakterystyk liczbowych i jakościowych PTW oraz mierników oceny w celu wykorzystania ich do formułowania zadań optymalizacyjnych.
- Umieszczenia problemu harmonogramowania PTW w procedurze projektowej i wskazania implikacji wynikających z wariantowego rozwiązywania tego problemu.
- Sformalizowania matematycznego zapisu problemu harmonogramowania PTW wraz z jego ograniczeniami.
- Oceny możliwości wykorzystania narzędzi programowania matematycznego do rozwiązania problemu harmonogramowania procesu transportu wewnętrznego.
- Sformułowania zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW i wskazania metod rozwiązania tego zadania.

Rozważania w obszarze praktycznego wykorzystania proponowanego podejścia pozwoliły na:

- Implementację metody projektowania obiektów logistycznych w postaci aplikacji komputerowej wspomagającej proces projektowania w zakresie kształtowania, wymiarowania i oceny ze szczególnym uwypukleniem etapu harmonogramowania PTW.
- Implementację komputerową zadania optymalizacyjnego harmonogramowania PTW i rozwiązywanie tego zadania w drodze interaktywnej współpracy z użytkownikiem.

- Wnioskowanie na temat wpływu harmonogramu PTW na jakość projektu obiektu logistycznego poprzez porównywanie wariantów projektowych i natychmiastową obserwację skutków zmian wprowadzanych do harmonogramu i do procesu.
- Skrócenie fazy obliczeniowej projektu i weryfikację metody na przykładach.

Proponowana metoda projektowania obiektów logistycznych ma cechy ogólne i uniwersalne. Może zostać wykorzystana wszędzie tam, gdzie realizowany jest transport wewnętrzny definiowany jako przemieszczanie materiałów w obrębie zakładu, przy czym przemieszczanie to jest kluczowe dla funkcjonowania zakładu. Metoda może zostać wykorzystana do projektowania i analizowania procesu transportu wewnętrznego w zakładach produkcyjnych, magazynach, terminalach ładunkowych, punktach konsolidacji ładunków itd.

Adresatami metody są projektanci obiektów logistycznych i audytorzy. Układ kroków projektowych został przygotowany tak, aby odzwierciedlać kolejność działań i organizować pracę. Dzięki temu metoda może zostać wykorzystana na dwa sposoby. Po pierwsze może stanowić ramy projektowe, na których będzie oparta praca projektowa. Po drugie wskazuje zależności pomiędzy wynikami projektowania a podjętymi decyzjami na każdym etapie.

Bardzo ważnym elementem projektowania obiektów logistycznych jest harmonogramowanie PTW. Od jakości harmonogramu zależy efektywność procesu, a tym samym jego koszty. Dokonany przegląd literatury wskazuje, że harmonogramowanie w tym aspekcie podnoszone jest jedynie przez nielicznych autorów. Pomimo, iż sam problem szeregowania zadań jest bardzo dobrze rozpoznany i szeroko omawiany w literaturze, to jednak klasyczne podejście do harmonogramowania nie znajduje zastosowania dla procesów logistycznych, co omówiono w punkcie 1.5. Zaproponowana formalizacja i zadanie optymalizacyjne problemu harmonogramowania PTW są nowe w literaturze przedmiotu.

Teza rozprawy zakłada, że narzędzia programowania matematycznego umożliwią wyznaczanie optymalnych, ze względu na przyjęte kryteria, harmonogramów PTW. W celu udowodnienia tezy, sformułowano zadanie optymalizacyjne harmonogramowania PTW co dało podstawy do wykorzystania narzędzi programowania matematycznego w celu uzyskania rozwiązań dopuszczalnych przy zadanych ograniczeniach. Przeprowadzone badania wskazują, że rozpatrywany problem – podobnie jak klasyczne zagadnienie szeregowania zadań – jest zagadnieniem NP-zupełnym. Wyklucza to zastosowanie narzędzi dokładnych rozwiązywania zadania dla przypadków rzeczywistych. W celu rozwiązania zadania opracowano algorytm przybliżony generowania rozwiązań dopuszczalnych, które następnie są ulepszone w drodze interaktywnej współpracy z użytkownikiem. Rozwiązanie takie wypełnia wymagania praktyki i pozwala na generowanie racjonalnych wariantów projektowych. Takie

podejście pozwala stwierdzić, że postawiona teza jest prawdziwa.

Wygenerowanie harmonogramu racjonalnego ma duże znaczenie dla uwarunkowań przestrzennych obiektu (wielkości obszarów, rozkład dróg transportu wewnętrznego, bufory) ekonomicznych (koszty operacyjne i eksploatacyjne, nakłady) i efektywnościowych (liczba urządzeń i pracowników). Polepsza też ogólną ocenę wariantu projektowego i daje nowe narzędzia oceny projektu. W ten sposób drugi element tezy mówiący o tym, że opracowana metoda harmonogramowania wzbogaci procedurę projektową daje się uzasadnić.

Proponowana metoda projektowania i metoda harmonogramowania PTW zostały zaimplementowane w programie komputerowym SCHED. Program ten jest narzędziem wspomagającym pracę projektową i analityczną. Pozwala na dokonywanie zmian na bieżąco realizując iteracyjną pętlę projektowania. Program odzwierciedla wszystkie etapy projektowe i wraz z opisaną w rozprawie metodą stanowi warsztat pracy projektanta. Proponowane podejście nie wyczerpuje wszystkich aspektów problemu, zwłaszcza w zakresie planowania ekonomicznej opłacalności inwestycji. Celem rozprawy nie jest jednakże określanie ekonomicznych zasad projektowania obiektów logistycznych, ale ocena zastosowanych technologii i organizacji pracy w funkcji ich kosztów. Uzyskiwane mierniki technologiczno-ekonomiczne wpływają na kosztowe aspekty projektu. Mierniki te opisują wpływ doboru technologii i organizacji pracy na całościowe koszty inwestycji i dają podstawy dla opracowań dotyczących finansowania, strategii marketingowych, decyzji lokalizacyjnych itp.

Aby udoskonalić metodę projektowania obiektów logistycznych należy skupić się na:

- Opracowaniu metod rozwiązywania zadania optymalizacyjnego poprzez doskonalenie proponowanego algorytmu aproksymacyjnego i stosowanie nowych podejść do problemu.
- Możliwości przystosowania już istniejących metod rozwiązania zagadnienia szeregowania zadań lub wykorzystanie metod genetycznych lub zbiorów rozmytych [50].
- Uszczegóławianiu kolejnych kroków metody w celu rozszerzenia zakresu jej stosowania oraz identyfikacji nowych punktów decyzyjnych istotnych ze względu na realizację iteracyjnej pętli projektowania.
- Wprowadzeniu do rozważań nieliniowych charakterystyk natężenia realizacji zadań PTW, tj. uwzględnienia w obliczeniach tempa pracy ludzi i spięrzeń zadań w ciągu doby.

Przeprowadzenie w/w prac pozwoli na udoskonalenie metod projektowania obiektów logistycznych, szczególnie w aspekcie harmonogramowania PTW. Doskonalenie metod szczegółowych projektowania i ich umiejscawianie w ogólnej procedurze projektowej przyczyni się do podwyższenia jakości projektów logistycznych, a w konsekwencji także poziomu oferowanych usług logistycznych.

Literatura

- [1] Abt S., Zarządzanie logistyczne w przedsiębiorstwie, PWE, Warszawa 1985.
- [2] Aiello G., Enea M., Galante G., An integrated approach to the facilities and material handling system design, *Internal Journal of Production Research* Vol. 40, No 15, pp 4007-4017, Taylor and Francis Ltd., 2002.
- [3] Ambroziak T., Jacyna I.: Wykorzystanie pakietu komputerowego WMoLS_1 do wymiarowania i oceny obiektów centrum logistycznego. *LOGISTYKA* 4/2008. Poznań 2008 r.
- [4] Ambroziak T., Jacyna M., Wasiak M., The logistics services in a hierarchical distribution system, *Transport Science and Technology*, ELSEVIER, chapter 30, page 383-393, 2006.
- [5] Ambroziak T., Lewczuk K. – Miara poziomu dopasowania kanału dystrybucji do strumienia materiałów, *Modelowanie Procesów Transportowych i Logistycznych cz. 1*, *Prace Naukowe PW Transport* z. 69, OWPW 2009 r.
- [6] Ambroziak T., Lewczuk K., A method for scheduling the goods receiving process in warehouse facilities, *Total Logistic Management. Annual No.1*, p. 7-14, AGH University of Science and Technology Press, Kraków 2008r.
- [7] Ambroziak T., Lewczuk K., Metoda wielokryterialna w zastosowaniu do oceny konfiguracji strefy składowania, *AUTOMATYKA*, Półrocznik, tom 13, zeszyt 2, Wydawnictwa AGH, Kraków 2009 r.
- [8] Ambroziak T., Lewczuk K., Problematyka buforowania przepływów materiałów w aspekcie harmonogramowania procesów transportu wewnętrznego, *Logistyka* 4/2010.
- [9] Ambroziak T., Lewczuk K., Wybrane aspekty harmonogramowania procesu magazynowego. *Prace Naukowe PW Transport* z.64, *Współczesne wyzwania transportu w logistyce*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008r.
- [10] Ambroziak T., *Metody i narzędzia harmonogramowania w transporcie*. Biblioteka Problemów eksploatacji. Wydawnictwo Instytutu Technologii i Eksploatacji – PIB, Warszawa 2007.
- [11] Bartholdi III J. J., Hackman S. T.: *Warehouse & Distribution Science*, Release 0.93, www.warehouse-science.com, Sierpień 2010.
- [12] Bassan Y., Roll Y., Rosenblat M.J., *Internal Layout Design of a Warehouse*, *AIIE Transactions*, Vol. 12 No 4, pp. 317-322, 1980.
- [13] Błażewicz J., Cellary W., Słowiński R., Węglarz J., *Algorytmy sterowania rozdziałem zadań i zasobów w kompleksie operacji* (wyd. II). Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1979.
- [14] Błażewicz J., Ecker K., Pesch E., Schmidt G., Węglarz J.: *Handbook on Scheduling. From Theory to Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [15] Bramel J., Simchi-Levi D., *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistic Management*, Springer Series in Operations Research, Springer-Verlag New York, Inc. 1997.
- [16] Bruckner P., *Scheduling Algorithms*, (5-te wyd.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007r.
- [17] Brzeziński M. *Organizacja i sterowanie produkcją. Metody i narzędzia organizowania i sterowania produkcją*. Agencja Wydawnicza Placet, Warszawa 2002 r.
- [18] Bubnicki Z., *Podstawy informatycznych systemów zarządzania*. rdz. 5 i 6, PWR, Wrocław 1993.
- [19] Daganzo F. C., *Logistics Systems Analysis* (4th ed.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.

- [20] Dekker R., M. B. M. de Koster, H. van Kalleveen, K. J. Roodbergen, Quick response at the warehouse of Ankor, ERIM Report Series Research in Management No. 19, Rotterdam Feb 2002r.
- [21] Department of Navy, Naval Supply Systems Command, Warehouse Modernization and Layout Planning Guide, NAVSUP Publication 529, Mar 1985.
- [22] Dolgui A., Soldek J., Zaikin O., Applied Optimization: Supply Chain Optimization, Produkt/Process Design, Facility Location and Flow Control, Springer Science + Business Media, Inc., Boston 2005.
- [23] Donath B., Mazel J., Dubin C., Patterson P., (Edt.), The IOMA Handbook of Logistics and Inventory Management, John Wiley & Sons, Inc., New York 2002.
- [24] Fijałkowski J., Opalach J., Badania efektów modernizacji magazynów z uwzględnieniem procesów kompletacji, Biuletyn Informacyjny Instytutu Gospodarki Magazynowej w Poznaniu, Poznań 1988 r.
- [25] Fijałkowski J., Projektowanie magazynów wysokoregółowych, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1983.
- [26] Fijałkowski J., Technologia magazynowania. Wybrane zagadnienia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995.
- [27] Fijałkowski J., Transport wewnętrzny w systemach logistycznych. Wybrane zagadnienia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [28] Fijałkowski J.: Czynniki kosztów w wymiarowaniu procesów przepływu ładunków w systemach logistycznych. Rocznik nr 5 (2008), Wybrane Zagadnienia Logistyki Stosowanej, PAN Komitet Transportu, Oficyna Wydawnicza TEXT, Kraków 2008.
- [29] Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A., Metody obliczeniowe optymalizacji. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1973.
- [30] Frazelle E., World-Class Warehousing and Material Handling, McGraw-Hill 2002 r.
- [31] Geunes J., Pardalos P. M. (Eds.), Applied Optimization. Supply Chain Optimizaton, Springer Science+Business Media, Inc., USA 2005.
- [32] Goldberg D. E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [33] Grinstead S. E., A guide to scheduling for cell managers, Logistics Technology International, Excel Logistics 1995.
- [34] Guidelines for Material Storage & Handling in the Cigarette Industry, PMI Engineering SA, Neuchâtel, Switzerland 2005.
- [35] Gupta J. N. D., Henning K., Werner F., Local Search Heuristics for Two-Stage Flow Shop Problems with Secondary Criterion, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg 1999 r.
- [36] Halevi G., Handbook of Production Management Methods, Butterworth-Heinemann, Reed Educational and Professional Publishing Ltd. 2001.
- [37] Hall R. W. (editor) Handbook of Transportation Science (2nd ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2003.
- [38] Hassan M. D. Mohsen, A framework for the design of warehouse layout, Emerald. Facilities vol. 20, Number 13/14, pp. 432-440, MCB UP Limited, 2002.
- [39] Homenda W.: Algorytmy, złożoność obliczeniowa, granice obliczalności, Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej, 2009 r.
- [40] Hompel t. M., Schmidt T., Warehouse Management. Automation and Organisation of Warehouse and Order Picking Systems, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2007
- [41] House R.G., Karrenbauer J.J., Logistics System Modelling, International Journal of Physical Distribution and Materials Management (IJPD & MM), Vol. 8, Issue 4, page 189-199, 1978.
- [42] Jaap Robert van der Meer, Operational Control of Internal Transport, ERIM Ph.D. series Research in Management 1, The Netherlands TRAIL Research School, Sep 2000.

- [43] Jacyna M., Wiśniewski K. A static model for selecting technical facilities of a logistics centre based on the tasks to be performed. *TOTAL LOGISTIC MANAGEMENT*. No. 1, 2008, PP. 33–42.
- [44] Jacyna M., Kłodawski M.: Wspomaganie komputerowe procesu kształtowania i wymiarowania obszaru magazynowego dla wybranej branży. *LOGISTYKA* 4/2008. Poznań 2008 r.
- [45] Jacyna M., Lewczuk K.: Wybrane aspekty techniczne organizacji systemów logistycznych. *Rocznik 2007, Wybrane Zagadnienia Logistyki Stosowanej*, PAN Komitet Transportu, Oficyna Wydawnicza TEXT, Kraków 2007.
- [46] Jacyna M., Modelowanie i ocena systemów transportowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009 r.
- [47] Jacyna M., Modelowanie wielokryterialne w zastosowaniu do oceny systemów transportowych, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej – seria Transport*, z. 47, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2001
- [48] Jain A.S, Meeran S., Deterministic job-shop scheduling: Past, present and feature, *European Journal of Operational Research*, 1999, 113, 390-434.
- [49] Kizyn M., Instrukcja BHP dla regałów magazynowych niskich obsługiwanych ręcznie. Ośrodek Doradztwa i Doskonalenia Kadr Sp. z o.o., Gdańsk 2004.
- [50] Klir G.J., Bo Yuan, Fuzzy sets and fuzzy logic. Theory and applications, Prentice Hall P T R, New Jersey 1995.
- [51] Kolman R.: Ilościowe określanie jakości, PWE, Warszawa 1973.
- [52] Korzan B., Elementy Teorii Grafów i Sieci. Metody Zastosowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.
- [53] Korzeń Z., Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania tom I. Infrastruktura, technika, informacja, Instytut Logistyki i Magazynowania w Poznaniu, 1999.
- [54] Korzeń Z., Logistyczne systemy transportu bliskiego i magazynowania tom II. Projektowanie, modelowanie, zarządzanie, Instytut Logistyki i Magazynowania w Poznaniu, 1999.
- [55] Kotzab H., Seuring S., Müller, Reiner G. (editors), *Research Methodologies in Supply Chain Management*, Physica-Verlag Heidelberg – a Springer Company, Germany 2005.
- [56] Krzyżaniak S., Cyplik P., Zapasy i magazynowanie. Tom 1. Zapasy. Wyd. II., Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2008 r.
- [57] Kutz M. (editor), *Handbook of Transportation Engineering*, The McGraw-Hill Companies, 2004.
- [58] Lam S. S., Cai X., Single machine scheduling with nonlinear lateness cost functions and fuzzy due dates, *Nonlinear Analysis* 2002, 3, 307-316.
- [59] Leszczyński J., Modelowanie Systemów i Procesów Transportowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
- [60] Lewczuk K., Efektywność dwustopniowych systemów komisjonowania ze względu na przepływ ładunków i informacji, *Prace Naukowe PW Transport z.60 Transport w systemach logistycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2007.
- [61] Lewczuk K., Zadanie logistyczne – pierwszy etap projektowania systemu logistycznego, *Zeszyt Logistyczny Nr 1(1). Dodatek naukowy do logistycznych pism specjalistycznych*, Poznań, październik 2007 r.
- [62] Litoiu M., Tadei R., Fuzzy scheduling with application to real time systems, *Fuzzy Sets and Systems* 2001, 121, 523-535.
- [63] Litoiu M., Tadei R., Real time task scheduling with fuzzy deadlines and processing times, *Fuzzy Sets and Systems* 2001, 117, 35-45.
- [64] Little J. D. C., A proof of the queueing formula $L = \lambda W$. *Operations Research*, 9:383–387, 1961.
- [65] Majewski J., *Informatyka w magazynie. Biblioteka logistyka*. Instytut Logistyki i Magazynowania. Poznań 2006 r.
- [66] Markow J.: Racjonalizacja sieci terminali kompletacyjnych dla przesyłek drobnicowych, OWPW, Warszawa 2009 r.

-
- [67] Mattson S.-A., Embracing Change, Management strategies in the e-economy area, Varsta, Sweden 2000.
- [68] Muller M., Essentials of Inventory Management, AMACOM, USA 2003.
- [69] Murovec B., Suhel P., A repairing technique for the local search of the job shop problem, European Journal of Operational Research 2004, 153, 220-238.
- [70] Niemczyk A. Zapasy i magazynowanie. Tom 2. Magazynowanie. Wyd. II, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań 2008 r.
- [71] Nowosielski S. (red.), Procesy i projekty logistyczne, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, Wrocław 2008.
- [72] Pfohl H.-Ch., Systemy Logistyczne. Podstawy Organizacji i Zarządzania, Biblioteka Logistyka, Poznań 1998.
- [73] Pfohl H.-Ch., Zarządzanie logistyką. Funkcje i Instrumenty, Biblioteka Logistyka, Poznań 1998.
- [74] Rasiowa H.: Wstęp do matematyki współczesnej. PWN. Warszawa 1975 r.
- [75] Roberts S. D., Optimal Warehouse Bay Configurations. AIIE Transactions, Vol. 4 No. 3, pp. 178-185, September 1972r.
- [76] Siudak M. Badania operacyjne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
- [77] Slany W., Scheduling as a multiple criteria optimization problems, Fuzzy Sets and Systems 1996, 78, 197-222.
- [78] Stadler H., Kilger Ch., (Edt.), Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies, (3rd ed.), Springer Berlin Heidelberg 2005.
- [79] Sule D. R., Logistics of Facility Location and Allocation, Marcell Dekker, Inc., New York, 2001.
- [80] Sysło M., Deo N., Kowalik J., Algorytmy optymalizacji dyskretnej, WN PWN, Warszawa 1995 r.
- [81] T'kindt V., Billaut J.-Ch.: Multicriteria Scheduling: Theory, Models and Algorithms, Springer, Berlin 2006.
- [82] Taylor G. D. (Edt.), Logistics Engineering Handbook, CRC Press Taylor & Francis Group, USA 2008.
- [83] Waters D., Logistics. An Introduction to Supply Chain Management, Palgrave MacMillan, Great Britain 2003.
- [84] Whitley L. D., Howe A. E., Rana S., Watson J. P., Barbulescu L., Comparing Heuristic Search Methods and Genetic Algorithms for Warehouse Scheduling. Computer Science Department Colorado State University, Air Force Office of Scientific Research, Air Force Material Command, USAF. Grant No. F49620-97-1-0271. Kolorado 1997 r.
- [85] Witryna internetowa MTM Association for Standards and Research; www.mtm.org.

Spis rysunków

Rys. 1. Umiejscowienie i zakres tematyczny rozprawy	15
Rys. 2. Procedura projektowania obiektów logistycznych	30
Rys. 3. Schemat blokowy procedury projektowania obiektu logistycznego.....	31
Rys. 4. Zadanie logistyczne jako opis we/wy systemu logistycznego	32
Rys. 5. Struktura zadania logistycznego	33
Rys. 6. Formułowanie zadania logistycznego	34
Rys. 7. Miarodajna wielkość przepływu materiałów na wejściu do obiektu logistycznego – przykład.....	38
Rys. 8. Przetwarzanie strumienia materiałów w obiekcie logistycznym – przykład	41
Rys. 9. Podstawowe fazy kształtowania procesu przepływu materiałów w obiekcie magazynowym za pomocą narzędzi prezentacji: a) wykres Sankey'a, b) rozmieszczenie i wzajemna orientacja obszarów funkcjonalnych, c) wydzielanie zadań w wybranym fragmencie procesu przepływu materiałów	43
Rys. 10. Wybrane przykłady zależności pomiędzy szerokością korytarza roboczego Ast [m] strefy składowania, wysokością podnoszenia h_3 [m] i typem urządzenia, a) wózek czołowy z przeciwwagą, b) wózek z masztem wysuwym, c) wózek typu VNA, d) układnica regałowa.	50
Rys. 11. Przykładowa karta procesu transportu wewnętrznego z wyróżnionymi elementami statycznymi.....	71
Rys. 12. Odwzorowanie przykładowego procesu: a) czynności pojedyncze, b) czynności wielokrotne.....	74
Rys. 13. Przykład harmonogramu zorientowanego na: a) urządzenie, b, c) zadanie.....	77
Rys. 14. Natężenie realizacji danego cyklu transportowego w ciągu jednej zmiany roboczej – przykład.....	78
Rys. 15. Modyfikacja natężenia zapotrzebowania na realizację danego cyklu transportowego poprzez buforowanie – przykład.....	79
Rys. 16. Podział zadania na podzadania ze względu na nierównomierność natężenia godzinowego	79
Rys. 17. Etapy konstruowania wykresu pracochłonności sprowadzonej procesu: a) harmonogram zadań, b) wykres pracochłonności rzeczywistej, c) wykres pracochłonności rzeczywistej ze względu na typy urządzeń, d) wykres pracochłonności sprowadzonej procesu.....	81
Rys. 18. Buforowanie na styku dwóch cykli transportowych.....	83
Rys. 19. Wykresy logistyczne przepływu materiałów dla określenia pojemności buforów – przykłady.....	85
Rys. 20. Lokalizacja buforów w procesie transportu wewnętrznego.....	86
Rys. 22. a) Wykres logistyczny napełniania i opróżniania bufora B , b) histogram zajętości bufora B	88
Rys. 23. Ograniczenia ze względu na rozpiętość czasu dysponowanego dla zadań.....	94
Rys. 24. Przykład rozłożenia i -tego zadania w czasie a) bez zachowania ograniczeń (53), (54), b) z zachowaniem ograniczeń (53), (54).	96

Rys. 25. Liczba możliwych kombinacji układu harmonogramu dla jednego zadania, w funkcji r_i oraz T	104
Rys. 26. Interpretacja wyników uzyskanych w programie LINGO dla danych przykładowych.....	106
Rys. 27. Rozwiązanie intuicyjne dla danych przykładowych.....	107
Rys. 28. Algorytm przybliżonego rozwiązania problemu harmonogramowania PTW.....	108
Rys. 29. Algorytm generowania zbioru rozwiązań dopuszczalnych zadania optymalizacyjnego.....	111
Rys. 30. Algorytm poprawy rozwiązań dopuszczalnych problemu harmonogramowania PTW i wyboru rozwiązania do dalszego opracowania.....	112
Rys. 31. Algorytm pracy interaktywnej z harmonogramem PTW.....	113
Rys. 32. Praca z wykresem dobowej pracochłonności sprowadzonej PTW – przykład.....	115
Rys. 33. Praca z wykresem dobowej pracochłonności sprowadzonej PTW ze względu na wykorzystanie urządzeń $u = 1$ i $u = 2$ – przykład.....	117
Rys. 34. Widok zakładki Dane w programie SCHED.....	121
Rys. 35. Widok okna Katalogu Typów Urządzeń w programie SCHED.....	122
Rys. 36. Widok okna Katalogu Kategorii Pracy Ludzkiej w programie SCHED.....	122
Rys. 37. Widok okna Katalogu Czasów podjęcia/odstawienia w programie SCHED.....	122
Rys. 38. Widok okna Struktura PTW w programie SCHED.....	124
Rys. 39. Przykład odzwierciedlenia PTW za pomocą elementów dostępnych w programie SCHED.....	124
Rys. 40. Widok okna Rozpływ Materiałów w programie SCHED.....	125
Rys. 41. Widok okna Zadania PTW w programie SCHED.....	126
Rys. 42. Widok okna Danych i Ograniczeń Harmonogramu PTW w programie SCHED....	128
Rys. 43. Widok okna Harmonogramu PTW w programie SCHED.....	130
Rys. 44. Widok okna Wykresów Pracochłonności PTW w programie SCHED.....	130
Rys. 45. Widok okna Wykresów Obciążenia Buforów PTW w programie SCHED.....	131
Rys. 46. Widok okna Parametrów Rozwiązania w programie SCHED.....	132
Rys. 47. Magazyn dystrybucyjny – przykład obliczeniowy.....	136
Rys. 48. Karta procesu transportu wewnętrznego dla przykładowego obiektu magazynowego.....	139
Rys. 49. Struktura procesu transportu wewnętrznego w programie SCHED.....	142
Rys. 50. Rozpływy materiałowe w programie SCHED dla procesu transportu wewnętrznego.....	143
Rys. 51. Zestawy określone w programie SCHED.....	143
Rys. 52. Zestawienie wyników dla obiektu przykładowego.....	148
Rys. 53. Harmonogramy PTW i wykresy pracochłonności sprowadzonej dla rozwiązań nr 2 i 4 przykładu.....	149
Rys. 54. Wykres pracochłonności rzeczywistej pracy pracowników $c = 1$ kategorii pracy dla rozwiązań nr 2 i 4 przykładu.....	150
Rys. 55. Wykresy zależności buforowania i zapotrzebowania na powierzchnie buforowe dla rozwiązań nr 2 i 4 przykładu ($mp =$ miejsce paletowe).....	153

Spis tabel

Tabela 1. Komponenty decyzyjne systemu logistycznego.....	18
Tabela 2. Przykłady stosowania wybranych elementów projektowania w rozplanowaniu przestrzennym obiektu logistycznego opracowane na podstawie przeglądu literatury	19
Tabela 3. Kroki projektowe wg. Hassana (2002).....	19
Tabela 4. Lista zagadnień z zakresu projektowania obiektów logistycznych w przemyśle tytoniowym.....	20
Tabela 5. Procedura projektowania zakładowego układu logistycznego – kolejne kroki projektowe	22
Tabela 6. Składowe typowego procesu realizowanego w obiekcie logistycznym.....	72
Tabela 7. Liczba możliwych przypadków układu harmonogramu wybranego zadania, w funkcji r_i i T	103
Tabela 8. Czasy realizacji zadań w przykładzie.....	140
Tabela 9. Pracochłonność realizacji zadań w przykładzie	141
Tabela 10. Pracochłonność realizacji zadań ze względu na zasoby pracy w przykładzie	141
Tabela 11. Rozłożenie pracochłonności na typy urządzeń i kategorie pracy ludzkiej.....	141
Tabela 12. Zestawienie wyników pracy z harmonogramem PTW dla obiektu przykładowego.....	147
Tabela 13. Koszty realizacji zadań PTW dla obiektu przykładowego wg rozwiązań 4 i 2 ...	151
Tabela 14. Zestawienie urządzeń TW dla obiektu przykładowego wg rozwiązań 4 i 2	151
Tabela 15. Zestawienie pracowników dla obiektu przykładowego wg rozwiązań 4 i 2	152

Załączniki

Załącznik 1 – Plik danych programu SCHED

Liczba zadań: 15
Liczba zestawów: 6
Liczba odcinków czasu: 16
Ziarnistość: 30
Godzina rozpoczęcia: 6
Minuta rozpoczęcia: 0
Liczba buforów między-operacyjnych: 1

```
=====
ZADANIA=====
1      180    2,352  1      1: wyladunek jłpj z naczepy
2      180    2,584  4      4: odłożenie jłpj do gniazda GR
3      222    2,584  4      5: pobranie jłpj z gniazda GR
4      166    2,935  3      7: zasilanie strefy komisjonow.
5       56    2,273  3      6: odstawienie jłpj do bufora BWYj
6     5540    0,2414 6      15: załadunek ręczny oz na samoch.
7       277    6,6796 5      8: komisjonowanie
8       277    1,4814 5      9: odstawianie jłpk do BWYj
9       180    0,75    2      2: kontrola Nr 1 wejściowa (jłpj)
10      180    2,273  3      3: Odstawienie z BWE na ZOWE
11     333    0,65    2      10: kontrola Nr 2 (jłpj+jłpj)
12     139    2,062  1      12: Transport jłpk z BWYj do BWYk
13     194    2,352  1      11: Załadunek jłpj+jłpk na samoch.
14     139    0,55    2      13: kontrola Nr 3 (jłpk)
15     139    1,4814 1      14: Transport jłpk z BWYk na Rp
=====
```

```
=====
ZESTAWY=====
1      27,8    0,85    1      1
2      27,23  0,85    0      4
3      28,8    0,85    2      1
4      36,75  0,9     3      2
5      32,75  0,85    4      3
6      19,8    0,85    0      5
=====
```

```
=====
OGRANICZENIA=====
o_1: moment rozpoczęcia/zakończenia=====
```

```
1      0      0
2      0      0
3      0      0
4      0      0
5      0      0
6      0      0
7      0      0
8      0      0
9      0      0
10     0      0
11     0      0
12     0      0
13     0      0
14     0      0
15     0      0
```

```
o_2: wyłączenie przedziałów=====
```

```
1      2 2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 2 2 2 2
2      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
4      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
6      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 2
8      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
9      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
11     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
12     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
13     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

```

14 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
15 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
o_3: min/max czas dysponowany=====
1 1 0
2 1 0
3 1 0
4 1 0
5 1 0
6 1 0
7 1 0
8 1 0
9 1 0
10 1 0
11 1 0
12 1 0
13 1 0
14 1 0
15 1 0
o_4: liczba zasobów j=====
1 0
2 0
3 0
4 0
5 8
6 0
o_5: liczba zasobów j realizujących i-te zadanie=====
1 0
2 0
3 0
4 0
5 0
6 0
7 0
8 0
9 0
10 0
11 0
12 0
13 0
14 0
15 0
o_6: ziarnistość=====
1 2
2 2
3 2
4 2
5 2
6 2
7 3
8 3
9 2
10 2
11 2
12 2
13 2
14 2
15 2
o_7: równoległości zadań=====
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
2 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
4 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0
5 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
6 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
9 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
11 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
12 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0
13 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
14 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
15 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
o_8: sekwencje zadań=====
1 0 0 0
2 0 0 0
3 0 0 0
4 0 0 0
5 0 0 0
6 15 0 40
7 0 0 0
8 0 0 0
9 0 0 0
10 0 0 0

```

```

11      0      0      0
12      7      0      1
13      0      0      0
14      0      0      0
15     12      0      1
o_9: buforowanie=====
1      85      5      1,10
HARMONOGRAM=====
1      0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0
2      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
3      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
4      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1
5      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
6      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
7      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
8      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
9      1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
10     0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
11     1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0
12     1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
13     1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
14     1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
15     1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

```

Załącznik 2 – Plik wynikowy programu SCHED dla rozwiązania nr 4 przykładowo

Projekt: [tu_wpisz_nazwę_projektu]
Plik: C:\Documents and Settings\qqq\Moje dokumenty\=STUDIA DOKTORANCKIE\SCHED 4\Przykład do pracy\003 - drugie RD.txt
Data: 2010-09-13,

```

=====
Liczba typów urządzeń: 5
Liczba kategorii pracy ludzkiej: 5
Liczba zatrudnionych pracowników ogółem: 26 os/na dobę
Liczba typów zestawów: 6
Liczba grup materiałowych: 1
Liczba dni pracy w ciągu roku: 290
Liczba zmian pracy na dobę: 1
Liczba odcinków czasu: 16
Ziarnistość harmonogramu: 30 min.
=====

```

```

[F.C1a]: Max chwilowa pracochłonność sprowadzona PTW (dla zestawów):      24,628 r.h
         (przy braku harmonogramu PTW: 22,934 r.h).
[F.C1b]: Max chwilowa pracochłonność sprowadzona PTW (dla urządzeń):      5,677 r.h
         (przy braku harmonogramu PTW: 5,339 r.h).
[F.C1c]: Max chwilowa pracochłonność sprowadzona PTW (dla pracowników):  11,485 r.h
         (przy braku harmonogramu PTW: 10,664 r.h).
[F.C2a]: wskaźnik organizacyjny#1: 0,931
[F.C2b]: wskaźnik organizacyjny#2: 13,549 r.h
[F.C3a]: Równomierność obciążenia p-tych zestawów: 0,701
[F.C3b]: Równomierność obciążenia u-tych urządzeń: 0,756
[F.C3c]: Równomierność obciążenia c-tych kat.pracy: 0,867
[F.C4_]: Minimalne pojemności buforów: 70 jednostek.
=====

```

```

=====
Roczne koszty realizacji procesu PTW: 3580608,96 zł/rok, w tym:
  Roczne koszty operacyjne pracy ludzi: 1375571,86 zł/rok,
  Roczne koszty operacyjne pracy urządzeń: 284585,7 zł/rok
  Roczne koszty eksploatacyjne pracy urządzeń: 2205037,1 zł/rok,
Dobowe koszty operacyjne pracy ludzi: 4743,35 zł/dobę,
Dobowe koszty operacyjne pracy urządzeń: 981,33 zł/dobę
Roczne koszty pracy zestawów: 1227364,1 zł/rok
Dobowe koszty pracy zestawów: 4232,29 zł/dobę
=====

```

URZĄDZENIA transportu wewnętrznego:

- u=1, unoszący paletowy napędzany prowadzony, ku = 8 zł/h, Figtu = 0,85, Eu = 36 tys.zł.
 Zaangażowane do zadań: 1,12,13,15,
 Liczba urządzeń: 4,17, przyjęto 5 szt. z rezerwą: 16,6%
 Realizacja zadania i=1 angażuje 1,845 szt. przy 4,5 godz. pracy,
 Realizacja zadania i=12 angażuje 0,702 szt. przy 8 godz. pracy,
 Realizacja zadania i=13 angażuje 1,118 szt. przy 8 godz. pracy,
 Realizacja zadania i=15 angażuje 0,505 szt. przy 8 godz. pracy,
 Roczne odpisy amortyzacyjne oraz oprocentowania kapitału dla u=1:
 b1 = 3600 zł/rok/urządzenie, b2 = 3600 zł/rok/urządzenie, f = 3600 zł/rok/urządzenie
 Dobowy koszt operacyjny pracy urządzeń: 215,22 zł/dobę.
 Roczny koszt operacyjny pracy urządzeń przy 290 dniach roboczych: 62413,8 zł/rok.
 Roczny koszt eksploatacyjny urządzeń przy 290 dniach roboczych: 80413,8 zł/rok.
 Nakłady na urządzenia: 180000 zł.

2. $u=0$
Praca ręczna przy zadaniach: 6,9,11,14,
Brak kosztów i nakładów wynikających z pracy urzędzeń.
3. $u=2$, podnośnikowy paletowy, $ku = 9$ zł/h, $Figtu = 0,85$, $Eu = 70$ tys.zł.
Zaangażowane do zadań: 4,5,10,
Liczba urzędzeń: 7,515, przyjęto 8 szt. z rezerwą: 6,06%
Realizacja zadania $i=4$ angażuje 6,369 szt. przy 1,5 godz. pracy,
Realizacja zadania $i=5$ angażuje 0,384 szt. przy 6,5 godz. pracy,
Realizacja zadania $i=10$ angażuje 1,146 szt. przy 7 godz. pracy,
Roczne odpisy amortyzacyjne oraz oprocentowania kapitału dla $u=2$:
 $b1 = 7000$ zł/rok/urządzenie, $b2 = 7000$ zł/rok/urządzenie, $f = 7000$ zł/rok/urządzenie
Dobowy koszt operacyjny pracy urzędzeń: 180,64 zł/dobę.
Roczny koszt operacyjny pracy urzędzeń przy 290 dniach roboczych: 52386,62 zł/rok.
Roczny koszt eksploatacyjny urzędzeń przy 290 dniach roboczych: 108386,62 zł/rok.
Nakłady na urzędzenia: 560000 zł.
4. $u=3$, podnośnikowy z obrotowo-przesuwnymi w., $ku = 12$ zł/h, $Figtu = 0,9$, $Eu = 270$ tys.zł.
Zaangażowane do zadań: 2,3,
Liczba urzędzeń: 2,405, przyjęto 3 szt. z rezerwą: 19,85%
Realizacja zadania $i=2$ angażuje 1,077 szt. przy 8 godz. pracy,
Realizacja zadania $i=3$ angażuje 1,328 szt. przy 8 godz. pracy,
Roczne odpisy amortyzacyjne oraz oprocentowania kapitału dla $u=3$:
 $b1 = 27000$ zł/rok/urządzenie, $b2 = 27000$ zł/rok/urządzenie, $f = 27000$ zł/rok/urządzenie
Dobowy koszt operacyjny pracy urzędzeń: 230,88 zł/dobę.
Roczny koszt operacyjny pracy urzędzeń przy 290 dniach roboczych: 66955,2 zł/rok.
Roczny koszt eksploatacyjny urzędzeń przy 290 dniach roboczych: 147955,2 zł/rok.
Nakłady na urzędzenia: 810000 zł.
5. $u=4$, kompletacyjny - unoszący, napędzany, $ku = 8$ zł/h, $Figtu = 0,85$, $Eu = 42$ tys.zł.
Zaangażowane do zadań: 7,8,
Liczba urzędzeń: 6,819, przyjęto 7 szt. z rezerwą: 2,58%
Realizacja zadania $i=7$ angażuje 5,581 szt. przy 6,5 godz. pracy,
Realizacja zadania $i=8$ angażuje 1,238 szt. przy 6,5 godz. pracy,
Roczne odpisy amortyzacyjne oraz oprocentowania kapitału dla $u=4$:
 $b1 = 4200$ zł/rok/urządzenie, $b2 = 4200$ zł/rok/urządzenie, $f = 4200$ zł/rok/urządzenie
Dobowy koszt operacyjny pracy urzędzeń: 354,59 zł/dobę.
Roczny koszt operacyjny pracy urzędzeń przy 290 dniach roboczych: 102830,52 zł/rok.
Roczny koszt eksploatacyjny urzędzeń przy 290 dniach roboczych: 132230,52 zł/rok.
Nakłady na urzędzenia: 294000 zł.

KATEGORIE PRACY LUDZKIEJ:

1. $c=1$, Operator 1,
 $kco = 12$ zł/h, $kc = 19,8$ zł/h przy $\text{GammaKZ} = 0,65$, $\text{Figc} = 0,9$, wskaźnik urlopów: 2,1%
Zaangażowane do zadań: 1,4,5,10,12,13,15,
Niezbędna liczba pracowników (na zmianę):
Zmiana 1: $nc1 = 9,294$, zatrudniono 10 pracowników z rezerwą: 7,06%
ŁĄCZNIE: 10 pracowników
Dobowy koszt operacyjny pracy pracownika: 158,4 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
Dobowy koszt operacyjny pracy wszystkich pracowników 1-ej kat. pracy:
 $KDc1 = 10 * 158,4 = 1584$ zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
Roczny koszt operacyjny pracy pracownika: 46707,72 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)
Roczne koszty operacyjne pracy wszystkich pracowników 1-ej kat. pracy:
 $KRC1 = 10 * 46707,72 = 467077,2$ zł/rok
2. $c=4$, Kontroler,
 $kco = 16,5$ zł/h, $kc = 27,23$ zł/h przy $\text{GammaKZ} = 0,65$, $\text{Figc} = 0,85$, wskaźnik urlopów: 3,6%
Zaangażowane do zadań: 9,11,14,
Niezbędna liczba pracowników (na zmianę):
Zmiana 1: $nc4 = 1,171$, zatrudniono 2 pracowników z rezerwą: 41,44%
ŁĄCZNIE: 2 pracowników
Dobowy koszt operacyjny pracy pracownika: 217,8 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
Dobowy koszt operacyjny pracy wszystkich pracowników 4-ej kat. pracy:
 $KDc4 = 2 * 217,8 = 435,6$ zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
Roczny koszt operacyjny pracy pracownika: 64981,07 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)
Roczne koszty operacyjne pracy wszystkich pracowników 4-ej kat. pracy:
 $KRC4 = 2 * 64981,07 = 129962,14$ zł/rok
3. $c=2$, Operator 2,
 $kco = 15$ zł/h, $kc = 24,75$ zł/h przy $\text{GammaKZ} = 0,65$, $\text{Figc} = 0,9$, wskaźnik urlopów: 2,5%
Zaangażowane do zadań: 2,3,
Niezbędna liczba pracowników (na zmianę):
Zmiana 1: $nc2 = 2,405$, zatrudniono 3 pracowników z rezerwą: 19,85%
ŁĄCZNIE: 3 pracowników
Dobowy koszt operacyjny pracy pracownika: 198 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
Dobowy koszt operacyjny pracy wszystkich pracowników 2-ej kat. pracy:
 $KDc2 = 3 * 198 = 594$ zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
Roczny koszt operacyjny pracy pracownika: 58568,4 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)
Roczne koszty operacyjne pracy wszystkich pracowników 2-ej kat. pracy:
 $KRC2 = 3 * 58568,4 = 175705,2$ zł/rok
4. $c=3$, Pracownik komisjonowania,
 $kco = 15$ zł/h, $kc = 24,75$ zł/h przy $\text{GammaKZ} = 0,65$, $\text{Figc} = 0,9$, wskaźnik urlopów: 3%
Zaangażowane do zadań: 7,8,
Niezbędna liczba pracowników (na zmianę):
Zmiana 1: $nc3 = 6,44$, zatrudniono 7 pracowników z rezerwą: 7,99%
ŁĄCZNIE: 7 pracowników

Dobowy koszt operacyjny pracy pracownika: 198 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
 Dobowy koszt operacyjny pracy wszystkich pracowników 3-ej kat. pracy:
 $KDc3 = 7 * 198 = 1386$ zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
 Roczny koszt operacyjny pracy pracownika: 58798,08 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)
 Roczne koszty operacyjne pracy wszystkich pracowników 3-ej kat. pracy:
 $KRc3 = 7 * 58798,08 = 411586,56$ zł/rok

5. $c=5$, Pracownik załadunku ręcznego,
 $kco = 12$ zł/h, $kc = 19,8$ zł/h przy $\text{GammaKZ} = 0,65$, $\text{Figc} = 0,85$, wskaźnik urlopów: 5,1%
 Zaangażowane do zadań: 6,
 Niezbędna liczba pracowników (na zmianę):
 Zmiana 1: $nc5 = 3,278$, zatrudniono 4 pracowników z rezerwą: 18,05%
 ŁĄCZNIE: 4 pracowników
 Dobowy koszt operacyjny pracy pracownika: 158,4 zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
 Dobowy koszt operacyjny pracy wszystkich pracowników 5-ej kat. pracy:
 $KDc5 = 4 * 158,4 = 633,6$ zł/dobę (nie uwzględnia wskaźnika urlopów)
 Roczny koszt operacyjny pracy pracownika: 47810,19 zł/rok (uwzględnia wskaźnik urlopów)
 Roczne koszty operacyjne pracy wszystkich pracowników 5-ej kat. pracy:
 $KRc5 = 4 * 47810,19 = 191240,76$ zł/rok

ZESTAWY:

Uwaga! Jeżeli w Danych Zadania przypisano do poszczególnych zestawów typy urządzeń i kategorii pracy ludzkiej, należy skorzystać z osobnych wyliczeń dla urządzeń i pracowników.
 Obliczenia dotyczące zestawów nie rozróżniają pracy ludzkiej i pracy mechanicznej. Wyniki w tym przypadku będą inne niż przy obliczeniach dla ludzi i urządzeń.

1. $p=1$ ($u1 + c1$), $kp = 27,8$ zł/h
 Zaangażowane do zadań: $i = 1,12,13,15$,
 Liczba zestawów: 4,17, przyjęto 5 zest. z rezerwą: 16,6%
 Dobowy koszt pracy zestawów: 747,96 zł/dobę
 Roczny koszt pracy zestawów przy 290 dniach rob./rok: 216908,4 zł/rok
2. $p=2$ ($u0 + c4$), $kp = 27,23$ zł/h
 Zaangażowane do zadań: $i = 9,11,14$,
 Liczba zestawów: 1,171, przyjęto 2 zest. z rezerwą: 41,44%
 Dobowy koszt pracy zestawów: 228,47 zł/dobę
 Roczny koszt pracy zestawów przy 290 dniach rob./rok: 66256,3 zł/rok
3. $p=3$ ($u2 + c1$), $kp = 28,8$ zł/h
 Zaangażowane do zadań: $i = 4,5,10$,
 Liczba zestawów: 7,515, przyjęto 8 zest. z rezerwą: 6,06%
 Dobowy koszt pracy zestawów: 578,05 zł/dobę
 Roczny koszt pracy zestawów przy 290 dniach rob./rok: 167634,5 zł/rok
4. $p=4$ ($u3 + c2$), $kp = 36,75$ zł/h
 Zaangażowane do zadań: $i = 2,3$,
 Liczba zestawów: 2,405, przyjęto 3 zest. z rezerwą: 19,85%
 Dobowy koszt pracy zestawów: 706,94 zł/dobę
 Roczny koszt pracy zestawów przy 290 dniach rob./rok: 205012,6 zł/rok
5. $p=5$ ($u4 + c3$), $kp = 32,75$ zł/h
 Zaangażowane do zadań: $i = 7,8$,
 Liczba zestawów: 6,819, przyjęto 7 zest. z rezerwą: 2,58%
 Dobowy koszt pracy zestawów: 1451,66 zł/dobę
 Roczny koszt pracy zestawów przy 290 dniach rob./rok: 420981,4 zł/rok
6. $p=6$ ($u0 + c5$), $kp = 19,8$ zł/h
 Zaangażowane do zadań: $i = 6$,
 Liczba zestawów: 3,278, przyjęto 4 zest. z rezerwą: 18,05%
 Dobowy koszt pracy zestawów: 519,21 zł/dobę
 Roczny koszt pracy zestawów przy 290 dniach rob./rok: 150570,9 zł/rok

ZADANIA PTW:

- $i=1$; Opis: 1: wyladunek jłpj z naczepy
 Dobowa liczba cykli: 180, $t1 = 2,352$ min., $p=1$, $u=1$, $c=1$
 Koszt realizacji zadania (u/c): 244,61 zł/dobę, w tym:
 Praca urządzeń: 66,41 zł/dobę,
 Praca ludzka: 178,2 zł/dobę.
 Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia): 230,77 zł/dobę
 Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p): 250,2 zł/dobę
- $i=2$; Opis: 4: odłożenie jłpj do gniazda GR
 Dobowa liczba cykli: 180, $t2 = 2,584$ min., $p=4$, $u=3$, $c=2$
 Koszt realizacji zadania (u/c): 499,36 zł/dobę, w tym:
 Praca urządzeń: 103,36 zł/dobę,
 Praca ludzka: 396 zł/dobę.
 Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia): 316,54 zł/dobę
 Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p): 588 zł/dobę
- $i=3$; Opis: 5: pobranie jłpj z gniazda GR
 Dobowa liczba cykli: 222, $t3 = 2,584$ min., $p=4$, $u=3$, $c=2$
 Koszt realizacji zadania (u/c): 523,48 zł/dobę, w tym:
 Praca urządzeń: 127,48 zł/dobę,
 Praca ludzka: 396 zł/dobę.
 Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia): 390,4 zł/dobę
 Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p): 588 zł/dobę

i=4; Opis: 7: zasilanie strefy komisjonow.
Dobowa liczba cykli: 166, t4 = 2,935 min., p=3, u=2, c=1
Koszt realizacji zadania (u/c):293,88 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 85,98 zł/dobę,
Praca ludzka: 207,9 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):275,13 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):302,4 zł/dobę

i=5; Opis: 6: odstawienie jłpj do bufora BWYj
Dobowa liczba cykli: 56, t5 = 2,273 min., p=3, u=2, c=1
Koszt realizacji zadania (u/c):151,16 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 22,46 zł/dobę,
Praca ludzka: 128,7 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):71,88 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):187,2 zł/dobę

i=6; Opis: 15: załadunek ręczny oz na samoch.
Dobowa liczba cykli: 5540, t6 = 0,2414 min., p=6, u=0, c=5
Koszt realizacji zadania (u/c):633,6 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 0 zł/dobę,
Praca ludzka: 633,6 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):519,21 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):633,6 zł/dobę

i=7; Opis: 8: komisjonowanie
Dobowa liczba cykli: 277, t7 = 6,6796 min., p=5, u=4, c=3
Koszt realizacji zadania (u/c):1255,49 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 290,24 zł/dobę,
Praca ludzka: 965,25 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):1188,15 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):1277,25 zł/dobę

i=8; Opis: 9: odstawianie jłpk do BWYj
Dobowa liczba cykli: 277, t8 = 1,4814 min., p=5, u=4, c=3
Koszt realizacji zadania (u/c):386,12 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 64,37 zł/dobę,
Praca ludzka: 321,75 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):263,51 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):425,75 zł/dobę

i=9; Opis: 2: kontrola Nr 1 wejściowa (jłpj)
Dobowa liczba cykli: 180, t9 = 0,75 min., p=2, u=0, c=4
Koszt realizacji zadania (u/c):217,8 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 0 zł/dobę,
Praca ludzka: 217,8 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):72,08 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):217,84 zł/dobę

i=10; Opis: 3: Odstawienie z BWE na ZOWE
Dobowa liczba cykli: 180, t10 = 2,273 min., p=3, u=2, c=1
Koszt realizacji zadania (u/c):349,4 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 72,2 zł/dobę,
Praca ludzka: 277,2 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):231,04 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):403,2 zł/dobę

i=11; Opis: 10: Kontrola Nr 2 (jłpj+jłpj)
Dobowa liczba cykli: 333, t11 = 0,65 min., p=2, u=0, c=4
Koszt realizacji zadania (u/c):176,96 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 0 zł/dobę,
Praca ludzka: 176,96 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):115,57 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):177 zł/dobę

i=12; Opis: 12: Transport jłpk z BWYj do BWYk
Dobowa liczba cykli: 139, t12 = 2,062 min., p=1, u=1, c=1
Koszt realizacji zadania (u/c):203,36 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 44,96 zł/dobę,
Praca ludzka: 158,4 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):156,23 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):222,4 zł/dobę

i=13; Opis: 11: załadunek jłpj+jłpk na samoch.
Dobowa liczba cykli: 194, t13 = 2,352 min., p=1, u=1, c=1
Koszt realizacji zadania (u/c):388,37 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 71,57 zł/dobę,
Praca ludzka: 316,8 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):248,72 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):444,8 zł/dobę

i=14; Opis: 13: Kontrola Nr 3 (jłpk)
Dobowa liczba cykli: 139, t14 = 0,55 min., p=2, u=0, c=4
Koszt realizacji zadania (u/c):217,8 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 0 zł/dobę,
Praca ludzka: 217,8 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):40,82 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):217,84 zł/dobę

i=15; Opis: 14: Transport jłpk z BWYk na Rp
Dobowa liczba cykli: 139, t15 = 1,4814 min., p=1, u=1, c=1
Koszt realizacji zadania (u/c):190,7 zł/dobę, w tym:
Praca urządzeń: 32,3 zł/dobę,
Praca ludzka: 158,4 zł/dobę.
Koszt realizacji zadania (zes_bez_zaokrąglenia):112,24 zł/dobę
Koszt realizacji zadania (zes_zaokrąglone_do_p):222,4 zł/dobę

BUFORY PTW:

b=1: P1 = 85jedn., max wykorzystanie: 70 jedn.
użycie: 5, 5, 13, 20, 27, 34, 41, 48, 55, 63, 70, 57, 44, 31, 18, 5,