

Zbigniew Banaszak¹, Marian Kopczewski²,
Stefan Kowalski³, Mariusz Mądry⁴

Planowanie przepływu w sieciach dystrybucji odpadów poprodukcyjnych przy zastosowaniu metod programowania w logice ograniczeń

Wstęp

Dbłość o środowisko naturalne, pakiet unijnych dyrektyw dotyczących zagospodarowania odpadów, powstających w procesie produkcji, zmusza przedsiębiorstwa, w tym zmilitaryzowane, do zlecenia procesu utylizacji specjalizowanym firmom posiadającym wymagane certyfikaty i zezwolenia. Gromadzone odpady w przedsiębiorstwie produkcyjnym – jednostce wojskowej, po wstępnej selekcji, przewożone są do odpowiednich zakładów utylizacji, które dokonują recyklingu lub unieszkodliwienia odpadów. Obsługa transportowa dokonywana jest w tym przypadku przez firmę posiadającą odpowiednie środki transportowe, przystosowane do przewozu różnego rodzaju odpadów, w tym materiałów niebezpiecznych [3].

Ze względu na specyficzny charakter przewożonego materiału (niebezpieczeństwo skażenia środowiska) pojawia się potrzeba integracji specjalistycznego systemu transportu (odpowiednich środków transportowych, ich pojemności i ilości, struktury dostępnych tras, itp.) z siecią zorganizowanej utylizacji. W rozważanym przypadku mamy do czynienia z typowymi problemami planowania i harmonogramowania przepływów odpadów. Ograniczenia obejmują ilości gromadzonych odpadów, pojemności magazynów przedsiębiorstw i zakładów, wydajności przedsiębiorstw produkcyjnych oraz zakładów utylizacji, przepustowości systemu transportowego, ilości i pojemności środków transportu, dostępną strukturę tras transportowych, itd.

Poszukiwane rozwiązanie winno zapewniać taką integrację komponentów systemu, przy której odpowiednie odpady, w odpowiednich ilościach, będą trafiały zawsze na czas, na właściwe sobie miejsce przeznaczenia, zapewniając niezakłóconą pracę geograficznie rozproszonych przedsiębiorstw

- jednostek i zakładów [4]. Zważywszy, że problem obsługi transportowej sieci przedsiębiorstw cechuje duża złożoność obliczeniowa, konieczne staje się stosowanie komputerowych systemów wspomaganie podejmowania decyzji. Możliwości dostępnych na rynku pakietów komercyjnych nie spełniają oczekiwań stawianych im przez małe i średnie przedsiębiorstwa (MSP) oraz pojedyncze jednostki wojskowe MW, a szczególnie okręty na morzu, od których wymaga się by dopasowywały się do potrzeb przedsiębiorstw utylizacyjnych, m. in. struktury organizacyjnej, cechowały się obsługą niewymagającą zatrudnienia wysokokwalifikowanej kadry oraz uwzględniały sposób działania przedsiębiorstwa.

Przykład takiego pakietu stanowi profesjonalny program LINGO (wykorzystujący metody badań operacyjnych), TAYLOR (implementujący metody symulacji komputerowej) czy OptiTrans (wykorzystujący metody programowania w logice ograniczeń; ang. Constraint Logic Programming – CLP). Stosowanie pierwszego z nich w rozpatrywanych problemach decyzyjnych wiąże się z długim czasem oczekiwania na wynik, jak i złożony jest problem samego stawiania problemu, z kolei stosowanie drugiego wymaga przygotowywania i przeprowadzania czasochłonnych i pracochłonnych eksperymentów. Ponadto, wypracowane decyzje ograniczają się do wcześniej symulowanych wariantów, a każdorazowa zmiana parametrów rozpatrywanej sieci, bądź obsługującego ją systemu transportowego (choćby zmiana ładowności pojazdu), wiąże się z koniecznością ponawiania eksperymentu komputerowego. Trzeci z wymienionych pakietów (OptiTrans), mimo licznych modułów (mapy cyfrowe, rozkład załadunku, szczegółowy plan przewozów i szereg innych) nie uwzględnia w pełni planowania dystrybucji dokładnie na czas (nie bilansuje potrzeb przewozowych w każdej jednostce czasu horyzontu planowania). Program główny naciska na optymalizację załadunku. Obsługa tak złożonego systemu wymaga wykwalifikowanego personelu oraz odpowiedniej platformy sprzętowej [6].

¹ prof. dr hab. inż. Zbigniew Banaszak, Politechnika Warszawska, Wydział Zarządzania.

² dr hab. inż. Marian Kopczewski, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Wydział Dowodzenia i Operacji Morskich.

³ dr Stefan Kowalski, Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni, Wydział Dowodzenia i Operacji Morskich.

⁴ dr inż. Mariusz Mądry, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Sulechowie, Instytut Politechniczny.

Warto zaznaczyć, że istniejące rozwiązania zakładają np., że dany jest ustalony harmonogram przejazdu pojazdów i rozpatrują możliwość realizacji napływających zleceń [10], lub znane są wielkości zleceń a zadaniem systemu jest odpowiednie zaplanowanie przewozów, itp. Nie spotyka się rozwiązań, które traktują problem w sposób kompleksowy, tzn. integrują problemy marszrutowania, przydziału, porcjowania i harmonogramowania.

Szansę zaspokojenia wskazanych oczekiwań stwarzają metody sztucznej inteligencji (algorytmy ewolucyjne, tabu search czy symulowanego wyżarzania) a w szczególności metody programowania w logice ograniczeń. Te ostatnie są implementowane w pakietach takich jak np. Chip, ILOG czy OZ Mozart.

Metody CLP, pomimo rosnącej liczby zastosowań (np. w pakiecie OptiTrans, ProAlpha), są wciąż mało znane. Bazują one na procedurach propagacji ograniczeń i podstawiania wartości zmiennych. Propagacja ograniczeń polega na analizie ograniczeń, specyfikujących rozpatrywany problem, i odrzuceniu z dziedzin zmiennych decyzyjnych tych wartości, które nie spełniają żadnego z nich. Propagacja ograniczeń pozwala zatem w szybki sposób znacznie ograniczyć potencjalną przestrzeń rozwiązań, tym samym skrócić czas obliczeń. Z kolei procedury podstawiania nadają zmiennym decyzyjnym konkretne wartości z ich, ograniczonych już w procesie propagacji, dziedzin. Stosowanie naprzemienne procedur propagacji i podstawiania pozwala w szybki sposób wyszukać rozwiązanie dopuszczalne, bądź ich zbiór.

Rozważany problem sprowadza się do poszukiwania sposobu wyznaczenia dopuszczalnych wariantów obsługi transportowo - magazynowej systemu utylizacji odpadów, w warunkach występowania ograniczeń logistycznych [4]. Związane z nim badania koncentrują się na zastosowaniu metod bazujących na CP/CLP do rozwiązania odpowiedniego, uogólnionego problemu transportowego. W szczególności ogniskują się na ocenie możliwości wykorzystania technik programowania w logice ograniczeń (ang. CLP); technik języka programowania Oz Mozart.

Model sieci

Rozważana jest klasa systemów utylizacji odpadów poprodukcyjnych rozumianych jako uporządkowane dziesiątki postaci: $S = (P, Z, H, MP, MZ, WP, WZ, D, W, O)$, gdzie:

P - zbiór przedsiębiorstw: $P = \{P_i | i = 1, \dots, p\}$, gdzie P_i oznacza i -te przedsiębiorstwo, a p oznacza liczbę wszystkich przedsiębiorstw wchodzących w skład sieci S ;

Z - zbiór zakładów: $Z = \{Z_j | j = 1, \dots, z\}$, gdzie Z_j oznacza j -ty zakład, a z oznacza liczbę wszystkich zakładów wchodzących w skład sieci S ;

H - horyzont czasu, w którym rozpatrywany jest przepływ odpadów w sieci, wyrażony w umownych jednostkach czasu (ujc);

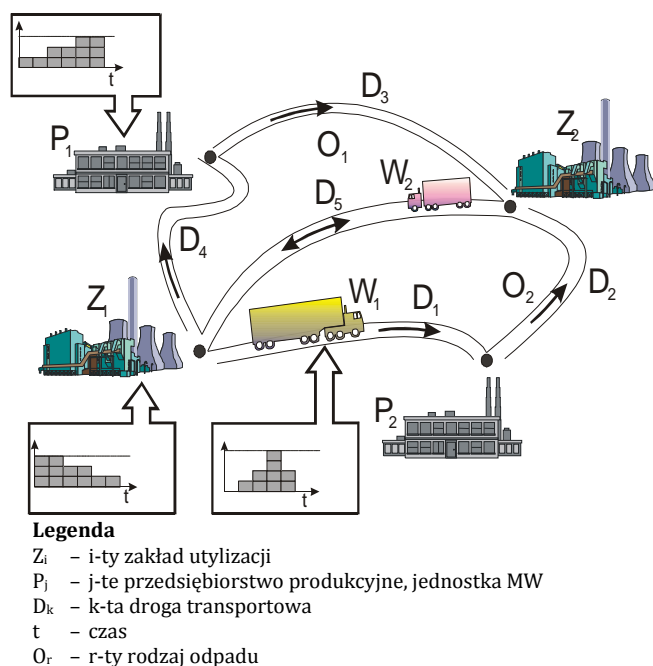
MP - zbiór magazynów odpadu w przedsiębiorstwach: $MP = \{MP_i | i = 1, \dots, p\}$, gdzie MP_i oznacza magazyn odpadu w i -tym przedsiębiorstwie, a p oznacza liczbę wszystkich przedsiębiorstw wchodzących w skład sieci S . Magazyn i -tego przedsiębiorstwa jest dwójką $MP_i = (mpv_i, mps_i)$, gdzie mpv_i oznacza pojemność magazynu odpadu w i -tym przedsiębiorstwie, wyrażoną w umownych jednostkach pojemności (ujp), a mps_i oznacza ilość odpadu, wyrażoną w ujp, jaka znajduje się w magazynie odpadu i -tego przedsiębiorstwa w początkowej chwili rozpatrywanego horyzontu planowania H ;

MZ - zbiór magazynów odpadu w zakładach: $MZ = \{MZ_j | j = 1, \dots, z\}$, gdzie MZ_j oznacza magazyn odpadu w j -tym zakładzie, a z oznacza liczbę wszystkich zakładów wchodzących w skład sieci S . Magazyn j -tego zakładu jest dwójką $MZ_j = (mzv_j, mzs_j)$, gdzie mzv_j oznacza pojemność magazynu odpadu w j -tym zakładzie, wyrażoną w ujp, a mzs_j oznacza ilość odpadu, wyrażoną w ujp, jaka znajduje się w magazynie odpadu w j -tym zakładzie w początkowej chwili rozpatrywanego horyzontu planowania H ;

WP - zbiór wielkości partii odpadu produkowanego przez przedsiębiorstwa: $WP = \{WP_i | i = 1, \dots, p\}$, gdzie WP_i oznacza wielkości partii odpadu produkowanego w i -tym przedsiębiorstwie, a p oznacza liczbę wszystkich przedsiębiorstw wchodzących w skład sieci S . Wielkości partii produkowanego odpadu WP_i w i -tym przedsiębiorstwie stanowią wektor $WP_i = [wp_{i,t} | t = 1, \dots, H]$, gdzie $wp_{i,t}$ stanowi wielkość partii odpadu dostarczonej do magazynu odpadu w i -tym przedsiębiorstwie, w t -tej chwili czasu;

WZ - zbiór wielkości partii odpadu utylizowanego przez zakłady: $WZ = \{WZ_j | j = 1, \dots, z\}$, gdzie WZ_j oznacza wielkości partii odpadu utylizowanego w j -tym zakładzie, a z oznacza liczbę wszystkich zakładów wchodzących w skład sieci S . Wielkości partii utylizowanego odpadu WZ_j w j -tym zakładzie stanowią wektor $WZ_j = [wz_{j,t} | t = 1, \dots, H]$, gdzie $wz_{j,t}$ stanowi wielkość partii odpadu pobieranej z magazynu odpadu w j -tym zakładzie, w t -tej chwili czasu;

- D - zbiór tras transportowych łączących ze sobą przedsiębiorstwa i zakłady: $D = \{D_k | k = 1, \dots, d\}$, gdzie D_k oznacza k -tą trasę, a d liczbę wszystkich tras, występujących w sieci dystrybucji odpadów S . Trasa D_k jest trójką $D_k = (dz_k, dd_k, dt_k)$, gdzie dz_k oznacza lokalizację początkową k -tej trasy, dd_k oznacza lokalizację końcową k -tej trasy, natomiast dt_k oznacza czas przejazdu po k -tej trasie;
- W - zbiór pojazdów transportowych przystosowanych do transportu odpadu: $W = \{W_l | l = 1, \dots, w\}$, gdzie W_l oznacza l -ty pojazd transportowy. Pojazd transportowy W_l jest dwójką $W_l = (wv_l, wl_l)$, gdzie wv_l określa dopuszczalną ładowność l -tego pojazdu, wyrażoną w ujp, a wl_l określa lokalizację, w której znajduje się l -ty pojazd transportowy w początkowej chwili rozpatrywanego horyzontu planowania H ;
- O - odpad przepływający przez sieć.



Rys. 1. Model systemu dystrybucji

W rozważanym modelu sieci dystrybucji przyjęto następujące założenia:

- każde z przedsiębiorstw sieci posiada magazyn odpadu o znanej skończonej pojemności, wyrażonej w ujp. Magazyn ten przeznaczony jest do gromadzenia odpadów poprodukcyjnych napływających do niego w wyniku działalności przedsiębiorstwa i oczekujących na transport do zakładu utylizacji;
- każdy z zakładów sieci posiada magazyn odpadów o znanej skończonej pojemności, wyrażonej w ujp. Magazyn ten przeznaczony jest do gromadzenia odpadów poprodukcyj-

nych dowożonych z przedsiębiorstw produkcyjnych i oczekujących na rozpoczęcie procesu utylizacji;

- przepełnienie magazynu przedsiębiorstwa jest stanem niedopuszczalnym, gdyż skutkuje wstrzymaniem jego pracy;
- niewystarczająca ilość odpadów potrzebnych do rozpoczęcia procesu utylizacji w zakładzie jest stanem niedopuszczalnym, gdyż skutkuje wstrzymaniem jego pracy;
- odpady są transportowane przez przystosowane do tego pojazdy, o znanych skończonych ładownościach, wyrażonych w ujp;
- każdy z pojazdów porusza się pomiędzy lokalizacjami sieci z tą samą prędkością średnią;
- czasy za- i wyładunku są wliczone w czas przejazdu pojazdu transportowego;
- transport odpadów odbywa się partiami transportowymi, nie większymi niż dopuszczalna ładowność;
- w cyklu załadunek - wyładunek pojazd, w każdym odwiedzanym przedsiębiorstwie, dokonuje załadunku jednokrotnie i wyładunku, w każdym z odwiedzanych zakładów, również jednokrotnie;
- pojazd nie może odwiedzać danej lokalizacji, o ile nie jest z tym związana operacja za- lub wyładunku;
- pojazd może dokonywać operacji załadunku wyłącznie w przedsiębiorstwach produkcyjnych;
- pojazd może dokonywać operacji wyładunku wyłącznie w zakładach utylizacji;
- pojazd nie może oczekiwać w przedsiębiorstwie na operację załadunku (np. w oczekiwaniu na mającą spłynąć z procesu produkcyjnego partię odpadów poprodukcyjnych);
- pojazd nie może oczekiwać w zakładzie utylizacji na operację wyładunku (np. w oczekiwaniu na zwolnienie się miejsca w magazynie wejściowym);
- pojazd nie może wyjechać z lokalizacji będącej zakładem do lokalizacji będącej przedsiębiorstwem, jeśli nie jest w całości rozładowany;
- pojazd może się poruszać wyłącznie po istniejących trasach transportowych;
- trasy transportowe są jednokierunkowe;
- początek i koniec trasy nie może być tą samą lokalizacją.

Łatwo zauważyć, że powyższy model uwzględnia następujące ograniczenia logistyczne:

- zmienne w czasie wydajności przedsiębiorstw produkcyjnych (wynikające np. z sezonowości produkcji, planowanych remontów, urlopów, itp.);

- zmienne w czasie wydajności zakładów recyklingu (wynikające np. z sezonowości nasilania produkcji odpadów poprodukcyjnych, planowanych remontów lub urlopów, itp.);
- ograniczone pojemności magazynów przedsiębiorstw i zakładów;
- ograniczona liczba pojazdów transportowych;
- ograniczone ładowności pojazdów transportowych;
- dostępna struktura tras transportowych;
- niezerowe czasy transportu odpadów pomiędzy lokalizacjami sieci.

W powyższym modelu wyróżniono następujące zmienne decyzyjne: *LK* – liczba kursów, *PK* – przydział kursów, *SK* – start kursów, *MK* – marszruta kursu i *WP* – wielkości partii. Zmienna *LK* określa całkowitą liczbę kursów, wykonanych przez wszystkie pojazdy, niezbędną do poprawnej obsługi transportowej rozważanej sieci w zadanym horyzoncie czasu. Pojęcie kursu transportowego oznacza w tym przypadku wyjazd pustego pojazdu po odpady z zakładu utylizacji do przedsiębiorstw produkcyjnych. Kurs kończy się w zakładzie utylizacji, w którym następuje całkowite rozładowanie pojazdu, a zatem kurs może kończyć się w innym zakładzie utylizacji niż rozpoczyna.

Zmienna *PK* odzwierciedla przydział, będących w dyspozycji, pojazdów transportowych do realizacji określonych kursów. Stąd zmienną stanowi wektor *LK* elementowy, gdzie każdy z elementów przyjmuje wartości od 1 do liczby pojazdów będących w dyspozycji. Wartości kolejnych elementów oznaczają numery pojazdów przydzielonych do realizacji określonych kursów. Zmienna *MK*, będąca wektorem o długości *LK*, odzwierciedla numery marszrut, wzdłuż których realizowane będą poszczególne kursy.

Zgodnie z przyjętymi założeniami, z istniejących tras transportowych można zbudować skończony zbiór marszrut spełniających przyjęte ograniczenia. Wartości elementów zmiennej *MK* wskazują na konkretne marszruty w uporządkowanym zbiorze marszrut.

Zmienna *SK*, którą stanowi wektor o długości równej liczbie pojazdów będących w dyspozycji, określa czasy rozpoczęcia realizacji kursów przez konkretne pojazdy. Zgodnie z przyjętymi założeniami, pomiędzy kolejnymi kursami, realizowanymi przez ten sam pojazd, nie są przewidziane przerwy, stąd wystarczy określić tylko termin pierwszego wyjazdu dla każdego z pojazdów.

Zmienna *WP* wskazuje na wielkości partii ładowanych w przedsiębiorstwach lub wyładowywanych w zakładach. Rozmiar zmiennej wyznaczany

jest przez iloczyn liczby pojazdów, horyzontu czasu i ilości lokalizacji tworzących sieć.

Strategie poszukiwania rozwiązań w programowaniu z ograniczeniami

Jak już wcześniej wspomniano, w ogólności techniki CLP bazują na naprzemiennym stosowaniu procedur propagacji ograniczeń (usuwania niezgodności) i ukonkretniania (podstawiania) wartości zmiennych decyzyjnych. Procedury usuwania niezgodności odrzucają te wartości dziedzin zmiennych decyzyjnych, co do których wiadomo, że na pewno nie spełniają żadnego z ograniczeń. Procedury podstawiania umożliwiają zawężanie obszaru potencjalnych rozwiązań, poprzez nadanie określonej wartości jednej ze zmiennych decyzyjnych [1].

Połączenie technik usuwania niezgodności i podstawiania wartości zmiennych decyzyjnych (tzn. rozszerzania zbioru ograniczeń) daje możliwość budowy algorytmów poszukiwania rozwiązania *problemu zgodności ograniczeń (PZO)*. Istotnym problemem w opracowaniu strategii propagacji ograniczeń są różne sposoby specyfikacji w dostępnych językach programowania *CP/CLP* (np. *Prolog*, *CHIP*, *Ilog*, *Mozart*). Dotyczy to, w szczególności, implementacji ograniczeń nieliniowych, takich gdzie występują wartości bezwzględne, część całkowita z dzielenia (lub reszta z dzielenia), funkcje logiczne itp. Sytuacja taka powoduje, że pewne implementacje ograniczeń, nie stwarzające trudności w jednym języku, stanowią istotne ograniczenie implementacyjne w drugim, i odwrotnie. Rzutuje to oczywiście na efektywność implementowanych strategii propagacji ograniczeń. W rozważanym przypadku badania koncentrują się na wykorzystaniu języka programowania *Oz Mozart*.

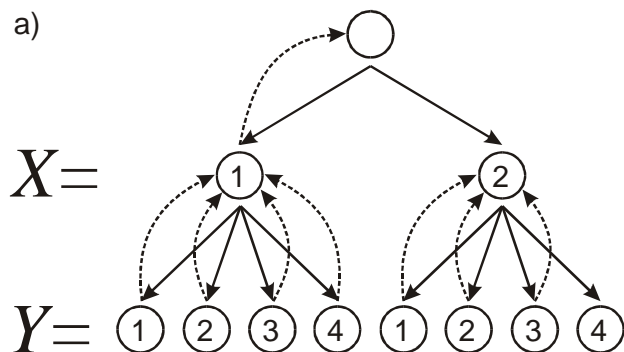
Istotne znacznie na efektywność wybranej strategii ma kolejność, w jakiej ustalane będą, występujące w rozpatrywanym problemie, wartości zmiennych decyzyjnych. Kolejność ukonkretniania zmiennych stanowi o liczbie potencjalnych nawrotów (ang. *backtracking*). Celem ilustracji rozważany jest następujący przykład. Dane są dwie zmienne decyzyjne *X* i *Y*. Dane są dziedziny zmiennych $D(X) \in \langle 2, 3 \rangle$, $D(Y) \in \langle 1, 5 \rangle$. Należy znaleźć strategie przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, z najmniejszą liczbą nawrotów.

W rozpatrywanym przypadku występują dwie zmienne decyzyjne, stąd istnieją tylko dwie możliwe kolejności podstawiania wartości zmiennych: (X, Y) i (Y, X) . Drzewa przeszukiwania wraz z potencjalnymi nawrotami zamieszczono na rys. 3.

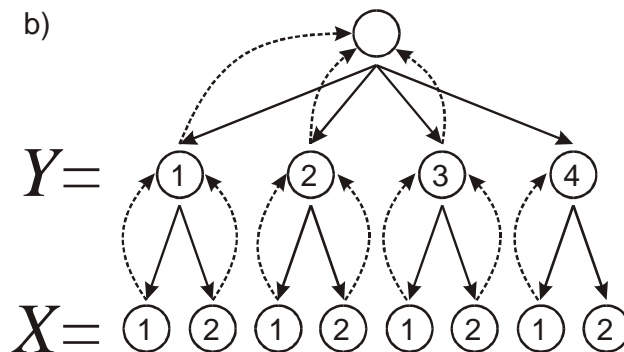
Jak łatwo zauważyć, liczba potencjalnych nawrotów, w przypadku strategii wykorzystującej kolejność (X, Y) , wynosi 8, w przypadku kolejności (Y, X) liczba potencjalnych nawrotów wynosi 10.

Stąd, w rozpatrywanym przypadku strategię z najmniejszą liczbą nawrotów stanowi strategia (X, Y) . Liczba potencjalnych nawrotów nie wpływa na ilość potencjalnych rozwiązań, natomiast ściśle wpływa na czas poszukiwania rozwiązania.

a)



b)



Legenda

- ② - podstawiona wartość zmiennej
- > - nawrót (backtracking)
- > - ukonkretnianie (podstawianie)

Rys. 2. Strategie przeszukiwania przestrzeni rozwiązań

Strategia planowania przepływu odpadów w sieciach dystrybucji

Rozważany w pracy problem **PZO** ma następującą postać: $PZO = ((X, D) C)$,

gdzie:

$X = \{LK, PK, SK, MK, WP\}$ – zbiór zmiennych decyzyjnych,

$D = \{D_i \mid D_i = [d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{im}], i \in \{lk, pk, sk, mk, wp\}\}$ – rodzina dziedzin zmiennych decyzyjnych,

$C = \{C_i \mid i = 1..c\}$.

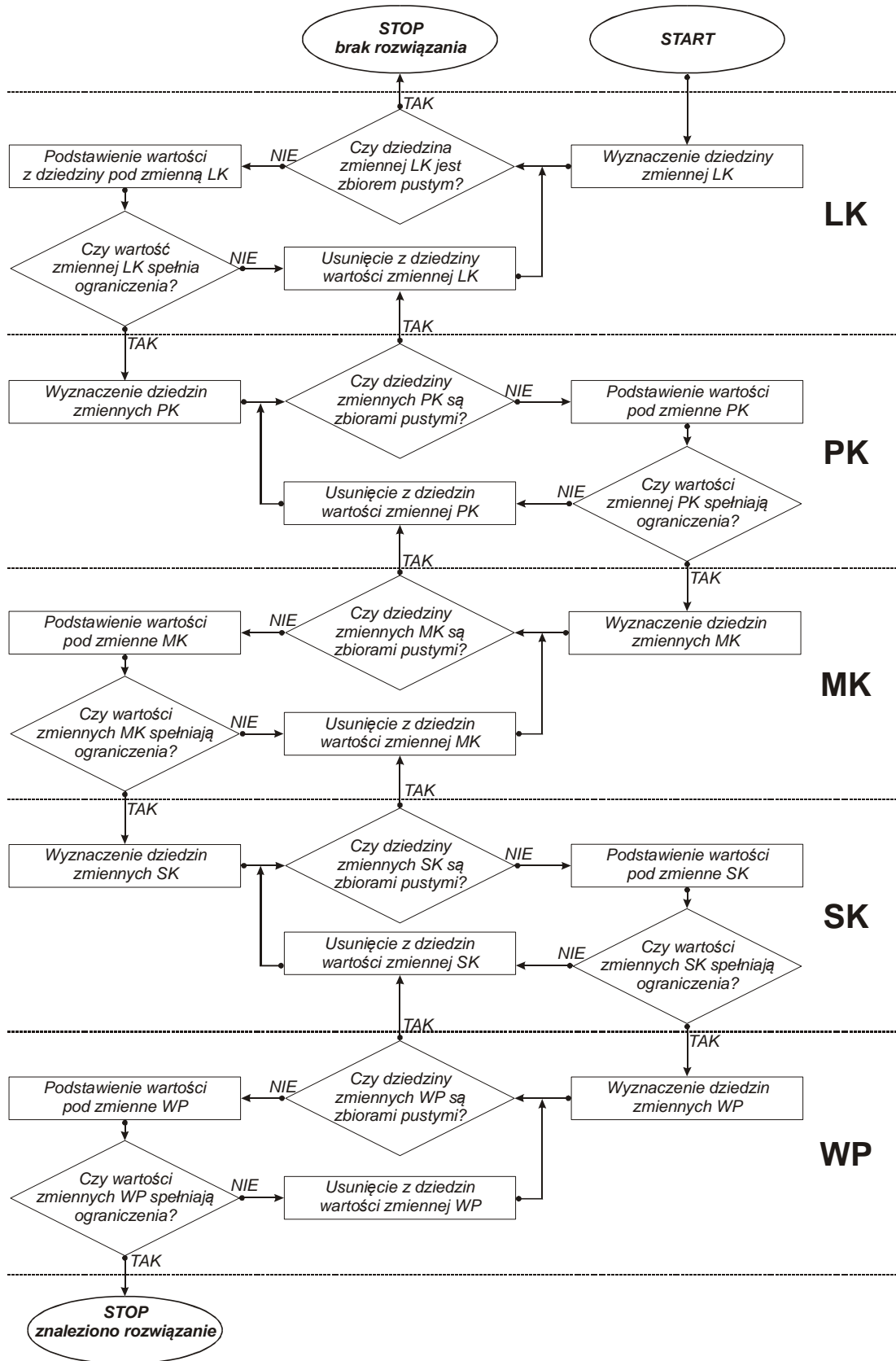
Schemat proponowanej strategii zamieszczono na rys. 4. Proponowana na schemacie kolejność wyznaczania wartości poszczególnych zmiennych decyzyjnych jest wynikiem prowadzonych badań. W proponowanej strategii jako pierwsza wyznaczana jest wartość zmiennej LK .

W tym celu najpierw wyznaczana jest dziedzina zmiennej. Dziedzina wyznaczana jest w oparciu o ograniczenia stanowiące o wielkości odbioru z przedsiębiorstw, wielkości dowozu do zakładów, ilość i dopuszczalne ładowności pojazdów transportowych, rozpatrywany horyzont czasu oraz czasy przejazdu wzdłuż najkrótszej i najdłuższej marszruty. Jeżeli dziedzina jest zbiorem pustym, wówczas potrzeby transportowe sieci nie zostaną zaspokojone przez istniejącą infrastrukturę transportową. W następnej kolejności wyznaczana jest wartość zmiennej LK . Jeżeli wyznaczona wartość nie spełnia ograniczeń, wówczas jest ona usuwana z dziedziny, a wartość zmiennej jest wyznaczana ponownie –

ang. *backtracking* (pod warunkiem, że dziedzina zmiennej nie jest, po usunięciu wartości nie spełniającej ograniczeń, zbiorem pustym). Wyznaczona wartość zmiennej LK wyznacza rozmiary zmiennych PK oraz MK .

W następnej kolejności wyznaczane są wartości elementów zmiennej PK . W tym celu na początku wyznaczana jest dziedzina każdego z elementów zmiennej PK . Dziedzina wyznaczana jest na podstawie ograniczeń, które uwzględniają m. in. lokalizację początkową pojazdów, ładowność pojazdu, czas przejazdu po najdłuższej i najkrótszej marszrucie, osiągalnej dla pojazdu (nie każda marszruta jest osiągalna z określonej lokalizacji początkowej pojazdu). Po wyznaczeniu dziedziny wyznaczane są wartości wszystkich elementów zmiennej PK . Jeżeli wartość któregoś z elementów nie spełnia ograniczeń, wówczas jest ona usuwana z jego dziedziny, a wartość elementu jest ustalana ponownie.

W przypadku gdy dziedzina chociaż jednego elementu zmiennej PK jest zbiorem pustym, wówczas wartość zmiennej LK jest usuwana z dziedziny i wyznaczanie wartości zmiennych rozpoczyna się od początku. Wartości pozostałych zmiennych ustalane są w sposób analogiczny. Ustalenie wartości wszystkich zmiennych decyzyjnych, spełniających zadane ograniczenia, oznacza wyznaczenie poszukiwanego rozwiązania dopuszczalnego.



Rys. 3. Schemat strategii wyznaczania rozwiązania

Komputerowa implementacja strategii planowania przepływu odpadów w sieciach dystrybucji

Przedstawiona powyżej strategia została zaimplementowana w propozycji komputerowego *Systemu Wspomagania Planowania Obsługi Sieci Dystrybucji Odpadów*. Zadaniem *Systemu* jest weryfikacja możliwości przewozowych infrastruktury transportowej przeznaczonej do obsługi określonej sieci dystrybucji odpadów. Wynikiem pracy programu jest wyznaczenie (o ile istnieje) dopuszczalnego harmonogramu obsługi sieci przez podsystem transportu. Wyznaczenie harmonogramu polega na znalezieniu takiego planu obsługi sieci, obejmującego liczbę kursów, przydziały pojazdów, marszruty transportowe, terminy odbiorów i dostaw, itp., które spełni ograniczenia wynikające ze struktury sieci dystrybucji oraz istniejącej infrastruktury transportowej. Ideę działania systemu zilustrowano na rys. 5



Rys. 5. Idea działania systemu

Opracowany pakiet komputerowego wspomagania planowania przepływu odpadów pozwala na analizę m. in. następujących scenariuszy:

- dana jest sieć dystrybucji o określonych parametrach. Należy ocenić, czy dostępna infrastruktura transportowa pozwala na terminową realizację przewozu odpadów z *przedsiębiorstw* do *zakładów* utylizacji, w zadanym horyzoncie czasu, przy jednoczesnym spełnieniu ograniczeń sieci;
- dana jest sieć dystrybucji o określonych parametrach. Wiadomo, że w zadanym horyzoncie czasu istniejący podsystem transportowy gwarantuje realizację dopuszczalnego (tzn. spełniającego zadane ograniczenia) przepływu odpadów. Należy ocenić:
 - czy możliwa jest poprawna obsługa tej sieci również w przypadku wyłączenia (np. awarii)

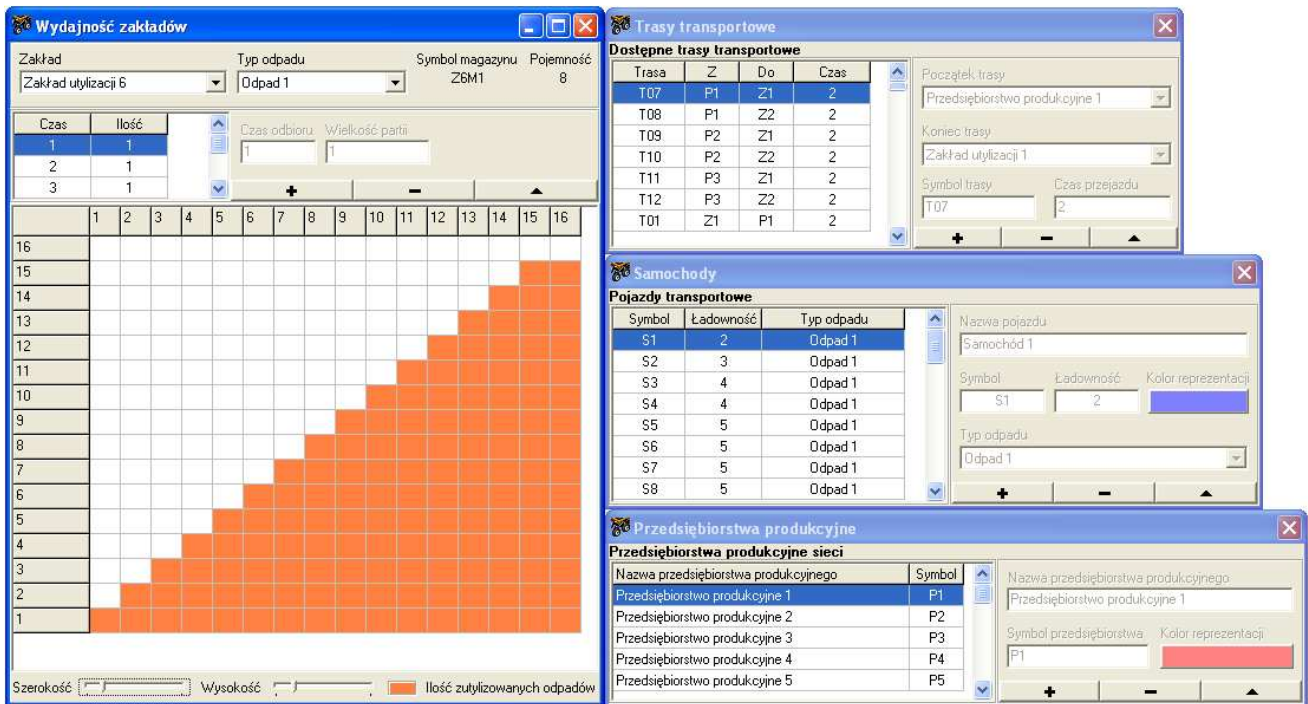
rii) z jej obsługi jednego z pojazdów transportowych W_x ?

- czy wymiana pojazdów W_a i W_b na pojazdy W_a' i W_b' , o mniejszych dopuszczalnych ładownościach, również pozwoli na wyznaczenie i realizację dopuszczalnego wariantu przepływu odpadu?;
- dana jest sieć dystrybucji o określonych parametrach. Należy ocenić, czy:
 - wyłączenie jednego z *przedsiębiorstw* nie spowoduje wstrzymania pracy pozostałych zasobów sieci (pozostałych *przedsiębiorstw* i *zakładów*) w zadanym horyzoncie czasu? (Czy istnieje wariant obsługi transportowo magazynowej dla takiej sieci?);
 - liczba dostępnych pojazdów transportowych jest w stanie zapewnić dopuszczalny przepływ odpadu w rozpatrywanym horyzoncie czasu jeśli do powyższej sieci zostanie „dołączone” kolejne *przedsiębiorstwo* P_y określonych parametrach MP_y , WP_y i dodatkowo gdy istniejąca struktura tras transportowych zostanie wzbogacona o trasy D_w i D_z ;
 - dana jest sieć recyklingu o parametrach jak wyżej. Należy ocenić, czy:
 - usunięcie trasy D_t (np. z powodu remontu) pozwoli na wyznaczenie alternatywnego, dopuszczalnego sposobu przepływu?
 - zmiana (zmniejszenie) planu produkcji *przedsiębiorstwa* P_x nie spowoduje wstrzymania pracy któregoś z *zakładów*?
 - wyłączenie dodatkowo jednego z *zakładów* pozwoli na poprawne funkcjonowanie pozostałej części sieci? itd.

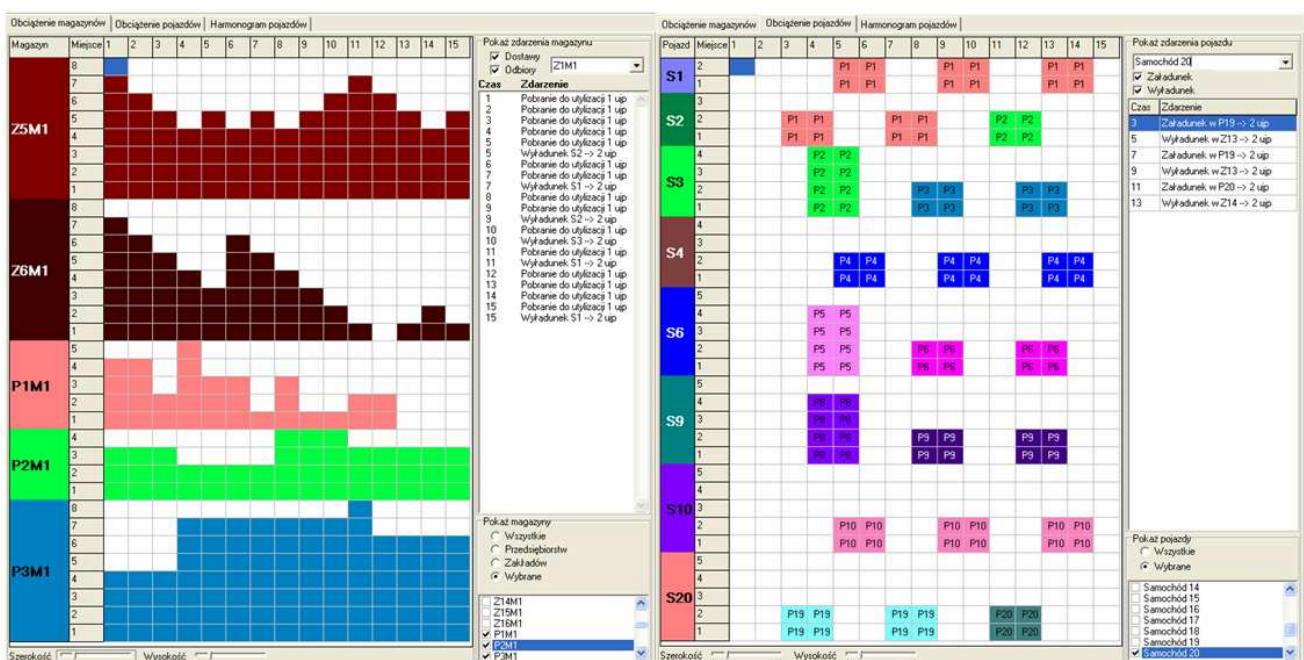
Należy zaznaczyć, że proponowany *System* wyszukuje jedynie rozwiązania dopuszczalne, nie szuka rozwiązań optymalnych, mimo, że zarówno wykorzystywane techniki CP/CLP, jak i proponowana strategia stwarzają takie możliwości.

Parametry, przytoczonej w rozdziale 3.1 sieci dystrybucji odpadów, zostały wprowadzone do zaproponowanego *Systemu* przy pomocy dedykowanych formularzy (rys. 6).

Implementowana w systemie strategia (wyszukiwania rozwiązania dopuszczalnego), pozwoliła uzyskać rozwiązania, których szczegóły zamieszczono w rozdziale 3.1. Wyznaczone przez *System* rozwiązania prezentowane są w formie graficznej, z jednoczesną ich wizualizacją. Ponadto *System* generuje również szczegółowe raporty, związane zarówno z harmonogramem podsystemu transportowego, jak i obsługą magazynową (rys 7).



Rys. 6. Formularze wprowadzania danych



Rys. 7. Okna prezentacji wyników

Istotą proponowanego Systemu jest jednoczesne (zintegrowane) wypracowywanie decyzji planistycznych w obszarach marszrutowania, przydziału, harmonogramowania i porcjowania. Dla porównania, uzyskanie wyniku przy zastosowaniu specjalistycznego pakietu Lingo nie było w ogóle możliwe – skala rozważanego problemu przekracza możliwości obliczeniowe pakietu.

Inny, komercyjny pakiet „Optitrans” uwagę skupia na optymalizacji załadunku (odpowiednim zagospodarowaniu przestrzeni ładunkowej pojazdu). Ponadto bazuje na gotowych zleceniach wprowadzonych do systemu – nie wypracowuje zleceń na podstawie potrzeb transportowych zmiennych w czasie.

Wyniki badań przedstawionych w pracach [7, 8] koncentrują się na optymalizacji zysków wypracowanych przez realizację zleceń. Istotna różnica między proponowanym podejściem a przedstawionym w pracach [7, 8] polega na sposobie wykorzystania pojazdów (pojazdy przypisane do realizacji zlecenia nie mogą być doładowywane/rozładowywane w wielu punktach). Podobnie traktowane są pojazdy w systemie ProALPHA.

Wyniki przedstawione w pracy [9] koncentrują się na doborze zleceń, które mogą być realizowane przez dany system transportowy, maksymalizując zysk z przyjętych zleceń. Należy zaznaczyć, że podobnie jak w systemie ProALPHA, pojazdy przydzielane do zleceń nie mogą być doładowywane/rozładowywane w wielu miejscach. Tym samym problem porcjowania jest w tych systemach pomijany.

Ze względu na zintegrowane podejście do rozważanego w pracy problemu, stanowiące o istocie proponowanego pakietu, trudno jest porównać osiągi pakietu z innymi aplikacjami wspomagania decyzji. Dla celów orientacyjnych czasy, w których zostały uzyskane poszczególne rozwiązania dopuszczalne (przedstawione w rozdziale 3.1) zestawiono w tabeli 3. Warto zaznaczyć, że rozwiązanie z $LK = 40$ gwarantuje poprawny przepływ odpadów w sieci przy wykorzystaniu tylko 16 pojazdów (spośród 24, będących w dyspozycji).

Tabela 3. Czasy uzyskania wyników

LK	Czas uzyskania wyniku [m]
40	5
64	16
72	20

Zakończenie

Rozważany problem sprowadza się do poszukiwania sposobu wyznaczania dopuszczalnych wariantów obsługi transportowo-magazynowej systemu utylizacji odpadów, w warunkach występowania ograniczeń: ilość gromadzonych odpadów, pojemności magazynów przedsiębiorstw – jednostek MW oraz zakładów utylizacji odpadów, wydajności przedsiębiorstw i zakładów utylizacji, przepustowości systemu transportowego, dostępną strukturą tras, itd.

Zaproponowana strategia poszukiwania rozwiązania pokazuje możliwość praktycznego wykorzystania technik CP/CLP w rozwiązywaniu, spotykanych w praktyce, problemów transportowych.

Proponowany w pracy System stanowi alternatywę dla istniejących rozwiązań dedykowanych do rozwiązywania podobnej klasy problemów. Isto-

tą Systemu jest zintegrowane wypracowywanie decyzji obejmujących marszrutowanie, przydział, harmonogramowanie i porcjowanie. Pozwoliło to na uogólnienie problemu transportowego pozwalające rozszerzyć klasę rozpatrywanych problemów transportowych.

Streszczenie

W pracy przedstawiono sposób planowania obsługi magazynowo-transportowej przepływu odpadów poprodukcyjnych w sieci geograficznie rozproszonych przedsiębiorstw produkcyjnych i zakładów utylizacji, które w nawiązaniu do Marynarki Wojennej, będą rozumiane jako jednostki i okręty oraz ich elementy utylizacyjne. Zaproponowane rozwiązanie sprowadza się do wyznaczenia strategii poszukiwania dopuszczalnych wariantów obsługi transportowo-magazynowej systemu recyklingu przy wykorzystaniu metod programowania w logice ograniczeń. Ograniczeniami są tutaj ilość gromadzonych odpadów, pojemności magazynów organizacji oraz zakładów utylizacji odpadów, wydajności zakładów i przedsiębiorstw sieci dystrybucji, przepustowości systemu transportowego, dostępna struktura tras systemu transportowego, itd.

Abstract

In this paper a CP/CLP based model of management of the production waste recycling distribution network is presented. The considered problem regards of on-line decision making including selection of the right number of vehicles, their relevant routings and timetables as well as transportation batches sizing. The constraints taken into account regard to: the volume of waste, the capacity of warehouses both from enterprises and utilization stations sides, availability of transport means, route structure, etc. The illustrative example of a DSS designed is provided.

Literatura

1. Banaszak Z., Saniuk S., Sitek P., Bzdyra K., *Techniki programowania z ograniczeniami w systemach zintegrowanego wspomagania decyzji w MŚP*, Inżynieria Produkcji, w: Inżynieria produkcji: wybrane zagadnienia. Red. J. Jakubowski, R. Stryjski, Zielona Góra, Oficyna Wydaw. Uniwersytetu Zielonogórskiego, 2005, s. 7-30.
2. Bartak R., *On-line guide to constraint programming*, Prague, 1998, <http://kti.mff.cuni.cz/~bartak/constraints/>
3. Bzdyra K., Banaszak Z.: *Decision Support in Production Flow Planning Based on Constraint*

- Programming*, 6th Workshop of Constraint Programming for Decision and Control, Proc. of the 5th Workshop on Constraint Programming for Decision and Control. Silesian University of Technology, June 29th 2004, Gliwice, Poland, s.15-19.
4. Mądry M., Saniuk S., Banaszak Z., *Zastosowanie metod programowania w logice ograniczeń do planowania przepływu w sieciach dystrybucji*, w: Komputerowo zintegrowane zarządzanie. T. 2. Red. E. Nosala, Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne, 2005, s. 121-130.
 5. Sitek P., Wikarek J., Banaszak Z., *Zastosowanie metodyki programowania w logice z ograniczeniami do optymalizacji planowania zleceń produkcyjnych*, XIV Krajowa Konferencja Automatyzacji Procesów Dyskretnych, Zakopane 2004.
 6. <http://www.at-consulting.de/ilogCLP/optitrans.htm>
 7. Sokołowski M., Szlachcic E., *A New heuristic algorithm for the vehicle routing problem with time window*, 10th IEEE International Conference of Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje 2004.
 8. Sokołowski M., *Komputerowy system wspomagania projektowania złożonej sieci transportowej z uwzględnieniem okien czasowych*, Praca dyplomowa, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1999.
 9. Żak J., Sawicki P., Jaszkiwicz A.: *Porównanie wybranych procedur metaheurystycznych w zastosowaniu do rozwiązywania problemu marszrutyzacji*, Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej, Nr 32, 2003 (Materiały XXI Krajowej Konferencji Polioptymalizacja i Komputerowe Wspomaganie Projektowania), 2003, s. 156-167.
 10. Saniuk S., Banaszak Z., *Wariantowanie przepływu nowowprowadzanych zleceń produkcyjnych w systemach wieloasortymentowej produkcji cyklicznej*, Automation 2002, Automatykacja - nowości i perspektywy, Konferencja Naukowo-Techniczna. Warszawa, 2002, s. 124-129.