

KIWIEL



POLSKA AKADEMIA NAUK
Instytut Badań Systemowych

WSPOMAGANIE DECYZJI

SYSTEMY EKSPERCKIE

pod redakcją

Romana Kulikowskiego i Lucyny Bogdan

Warszawa 1995

WSPOMAGANIE DECYZJI

SYSTEMY EKSPERCKIE

pod redakcją

Romana Kulikowskiego i Lucyny Bogdan

Warszawa 1995

Wydano z wykorzystaniem dotacji
KOMITETU BADAŃ NAUKOWYCH

Materiały konferencji: "Analiza Decyzyjna, Systemy Ekspertckie, Zastosowania Systemów Komputerowych",
Warszawa, 25-27 maja 1994r.

Komitet Programowy Konferencji:

Andrzej Ameljańczyk, Zdzisław Bubnicki, Wiesław Grudzewski, Olgierd Hryniewicz, Janusz Kacprzyk, Lech Kruś, Roman Kulikowski (przewodniczący), Kazimierz Mańczak, Ireneusz Nykowski, Zdzisław Pawlak, Roman Słowiński, Andrzej Straszak, Andrzej Weryński, Andrzej Wierzbicki.

Wykonano z oryginałów tekstowych dostarczonych przez autorów

© Instytut Badań Systemowych PAN, Warszawa 1995

ISBN 83-85847-85-5

MODEL SYSTEMU PROLOGU Z ODREBNIIE SPECYFIKOWANĄ WIEDZĄ STERUJĄCĄ

Grażyna Brzykcy,

Katedra Automatyki, Robotyki i Informatyki Politechniki Poznańskiej

Program prologowy, czyli skończony zbiór klauzul. mimo iż może być traktowany jako zestaw zdań logicznych, a rezultat wykonania tego programu jest konsekwencją zbioru tych zdań, ma jednak zawsze określone znaczenie operacyjne. W związku z tym, użytkownik systemu Prologu w swoich zadaniach programistycznych musi dbać nie tylko o poprawną i pełną aksjomatyzację interesującej go dziedziny, ale także brać pod uwagę sposób wykonywania programu.

Mechanizm wykonywania programów Prologu uzyskano z abstrakcyjnego interpretera programów w logice poprzez wybór, w kolejnych cyklach redukcji wejściowego zapytania, skrajnie lewego podcelu z rezolwenty oraz zastąpienie niedeterministycznego wyboru klauzuli programu przez sekwencyjne przeszukiwanie zbioru klauzul unifikowalnych z celem i tzw. nawroty.

Schemat wnioskowania przyjęty dla programów prologowych jest reprezentowany w systemie niejawnie, w interpreterze. W rzeczywistych systemach Prologu wychodzi się poza zaprezentowany schemat wnioskowania, obowiązujący w Prologu czystym. Odbywa się to zwykle przez wprowadzenie do języka dodatkowych predykatów systemowych. Ponieważ modyfikowanie sterowania oznacza zmianę procedury dowodowej, zatem dołączane predykaty mają charakter metapredykatów.

Przykładem jest powszechnie występujący w systemach Prologu predykat odcięcia (*cut*, !), którego efektem ubocznym jest modyfikacja sposobu wykonywania nawrotów. Inne, to np. predykat *geler* wprowadzony przez Colmerauera ([CO82]), czy deklaracje *wait* zaproponowane przez Naisha ([NA85]). Stosuje się również inne mechanizmy pozalogiczne, na przykład specjalne komentarze dotyczące zmiennych w IC-Prologu ([CC79]).

Zauważmy, że wprowadzane do języka rozszerzenia pogarszają czytelność programów i powodują "sklejenie" różnych poziomów wiedzy. Nie mamy wówczas możliwości niezależnego specyfikowania wiedzy sterującej i raz zdefiniowana w programie strategia, nie może być zmodyfikowana bez zmiany treści tego programu.

Dlatego podjęliśmy prace nad modelem obliczenia, w którym nie ma sztywnego schematu wnioskowania i użytkownik może definiować własną strategię wybierania podcelu i klauzuli. Nasza propozycja spełnia kilka istotnych założeń i postulatów, ważnych ze względów metodologicznych:

- program przedmiotowy jest napisany w Prologu, w którym nie ma mechanizmów wpływania na toczące się w systemie obliczenie;
- wiedza sterująca jest oddzielona od wiedzy przedmiotowej;
- jawnie reprezentowana wiedza sterująca jest deklaratywna (ma postać zbioru klauzul);
- rozróżnia się wiedzę sterującą zależną od programu przedmiotowego oraz wiedzę sterującą o charakterze ogólniejszym (mającą zastosowanie do wielu programów).

W pracy nad definicją modelu wychodzimy od intuicji związanych z cechami funkcjonalnymi proponowanego systemu. Ich analiza pozwala na ogólne sformułowanie własności i pojęć, które należy wprowadzić do modelu. Rodzi się z niej również pewna idea języka, w którym zapisujemy wiedzę sterującą. Formalne zdefiniowanie semantyki tego języka (stosujemy algebry dynamiczne [GU91]) owocuje ustaleniem poziomu abstrakcji opisu i kompletną specyfikacją modelu. Stanowi ona bazę przyszłych implementacji oraz ewentualnych rozszerzeń. Wyprowadzamy z niej też ostateczną postać języka, będącą konsekwencją decyzji o tym, co z uzyskanej specyfikacji zastronić, a co ujawnić w języku.

W systemach Prologu od wiedzy sterującej oczekujemy rozstrzygnięć co do dwóch kroków: wyboru podcelu z bieżącej rezolwenty oraz wyboru klauzuli programu ze zbioru klauzul kandydujących do redukcji danego celu. Obie te decyzje mogą być odrębnie specyfikowane. Zakładamy, że we wszystkich przypadkach, gdy wiedza sterująca jest częściowa, w mocy pozostają ustalenia sztywnej strategii prologowej.

Założmy, że pierwszą z decyzji sterujących reprezentuje procedura $sl(Res, Lit, Others)$, gdzie Res jest listą literałów i oznacza bieżącą rezolwentę, Lit - wybranym podcelem, a $Others$ - zmodyfikowaną rezolwentą. Drugą decyzję definiujemy w procedurze $sc(Lit, Cls, NewCls)$, gdzie Lit oznacza aktywny podcel, Cls - zbiór klauzul kandydujących do redukcji podcelu Lit , a $NewCls$ - uporządkowany podzbiór klauzul.

Wśród strategii sterujących można wyróżnić takie, które nie zależą od własności literałów lub klauzul, ani od stanu obliczenia (np. standardowa strategia prologowa) oraz takie, które te własności wykorzystują.

Na przykład, w przypadku współpracy z dużymi bazami danych, wyznacza się koszty uzyskania odpowiedzi na określone zapytania. Bardziej efektywna jest strategia wybierania najpierw zapytań mniej kosztownych. Definiujemy ją poniżej, posilując się predykatem *before* do ustalenia relacji częściowego porządku na zbiorze literałów:

```
before(L1,L2):-  
  literal(L1,X),  
  literal(L2,Y),  
  cost(X,N1),  
  cost(Y,N2),  
  less(N1,N2).
```

oraz predykatem *literal* do wskazania literału unifikowalnego z zadany wzorcem i predykatem *cost* do wyrażenia kosztu zapytania. Powyższa relacja warunkuje decyzje sterującą zgodnie z następującą definicją:

```
sl(Res,X,Others):-
  sl1(Res,X,[],Others).
sl1([L:Ls],X,O1,O):-
  before(Y,L),
  delete(Ls,Y,Ls1),
  sl1([Y:Ls1],X,[L:O1],O).
sl1([L:Ls],L,O1,O):-
  append(O1,Ls,O).
```

i powoduje wybór literału o mniejszym koszcie przed wyborem literału o koszcie wyższym.

Analiza treści programu pozwala także na wykrycie literałów o istotnym znaczeniu dla efektywności procesu obliczeniowego. Są to w szczególności wołania deterministyczne (*determ*) oraz testy (*test*). W drzewie poszukiwań, reprezentującym wszystkie możliwe decyzje sterujące, wiele spośród gałęzi kończy się stwierdzeniem niepowodzenia. Wczesne wykrycie wołań, które zawodzą, może przyspieszyć proces przeszukiwania tego drzewa. Testy dobrze się nadają do wykrywania porażek. Strategię uwzględniającą wiedzę o własnościach poszczególnych wołań (pochodzącą od Naisha) można zdefiniować w następujący sposób:

```
sl(Ls,L,Others):-
  append(X,[L:Y],Ls),
  test(L),
  append(X,Y,Others).
sl(Ls,L,Others):-
  append(X,[L:Y],Ls),
  determ(L),
  append(X,Y,Others).
sl(Ls,L,Others):-
  append(X,[L:Y],Ls),
  ready(L),
  append(X,Y,Others).
```

gdzie predykat *ready* definiuje gotowość literału do wyboru ze względu na postać jego argumentów.

W przypadku szeregowania klauzul często uwzględnia się ich długość (długość klauzuli $A_1 \leftarrow B_1, B_2, \dots, B_n$ jest równa n). Warunek wybierania najpierw klauzul krótszych można zadać, wykorzystując predykat *opbefore* do definiowania relacji częściowego porządku na zbiorze klauzul:

```
opbefore(L,C1,C2):-
  clause(C1,N1),
  clause(C2,N2),
  less(N1,N2).
```

oraz predykat *clause* do definiowania długości klauzuli. Strategia, w której uwzględnia się długości klauzul, może być zdefiniowana w następujący sposób:

```
sc(L,[CICs],NewCls):-
  opbefore(L,C1,C),
  append(X,[C1|Y],Cs),
  append([C1|X],[C1Y],Cs1),
  sc(L,Cs1,NewCls).
sc(L,[CICs1],[CICs2]):-
  sc(L,Cs1,Cs2).
sc(L,[],[]).
```

Skrajnym przypadkiem zadawania częściowego porządku jest wskazanie klauzuli, która ma być wybrana jako pierwsza. Jeśli decyzję tę reprezentuje predykat *opfirst*, to strategia uwzględniająca taki porządek ma następującą definicję:

```
sc(L,Cs,[CICs1]):-
  opfirst(L,C),
  append(X,[C1Y],Cs),
  append(X,Y,Cs1).
```

Przedstawione tu strategie sterujące, chociaż nie są uniwersalne, mają jednak walor ogólności. Np. strategia wybierania mniej kosztownych odwołań do baz danych przed odwołaniami kosztowniejszymi, może być stosowana we wszystkich programach współpracujących z dużymi bazami danych. Podobnie strategię zaproponowaną przez Naisha można wykorzystywać w wielu programach. Definicje tych strategii, rozumiane jako zapis ogólnej metody postępowania, stanowią część wspólną wiedzy sterującej dużej grupy programów. Sensowne jest zatem wyspecyfikowanie tych strategii w odrębnych programach-teoriach. Wiedza z tych teorii mogłaby być dziedziczona w teoriach podrzędnych, ukierunkowanych na programy przedmiotowe. W teoriach tych winna być zebrana wiedza o spełnianiu warunków uwzględnianych w poszczególnych strategiach, a związanych z treścią programu przedmiotowego, np. odwołujących się do własności literałów zdefiniowanych w tym programie.

W prezentowanym systemie można, niezależnie od wiedzy przedmiotowej, definiować wiedzę sterującą. Ma ona postać deklaratywną i jest zorganizowana w hierarchię teorii. Rozróżnia się obszary wiedzy sterującej zależne od programu przedmiotowego i od niego niezależne. Zatem zostały spełnione sformułowane na wstępie postulaty. W kilku przykładach przedstawiliśmy predykaty użyteczne w języku opisu sterowania. Dzięki hierarchicznej strukturze wiedzy sterującej, uzyskaliśmy możliwość łatwego rozbudowywania tego zbioru predykatów. Zdefiniowaliśmy też formalnie bazę wszelkich implementacji i ewntualnych rozszerzeń systemu. Stanowi ją definicja algebry dynamicznej. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu, musimy poprzestać na ogólnym omówieniu tej definicji.

Algebra dynamiczna składa się z algebry statycznej (zwykłej algebry) oraz zbioru reguł przejść (tranzycji). W algebrze statycznej definiuje się sygnaturę na takim

poziomie abstrakcji, jaki najbardziej odpowiada pojęciom i intuicjom związanym z modelem obliczenia, a w tranzycjach zapisuje się bazowe akcje systemu.

W naszej propozycji stan obliczenia jest modelowany za pomocą elementów sortu NODE, wśród których wyróżnia się korzeń i wierzchołki bieżący. Na zbiór wierzchołków nałożona jest struktura drzewa (reprezentuje ją funkcja *father*). Ponadto, z każdym wierzchołkiem wiąże się, poprzez odpowiednie funkcje, informację o bieżącej rezolwencji (*goalseq*), o podcelu aktywnym (*act*), o zbiorze reguł uczestniczących w redukcji (*cands*), o bieżącym podstawieniu (*s*).

Do opisu tranzycji wykorzystuje się także dodatkowe informacje o charakterze globalnym, np. mamy funkcję reprezentującą proces unifikacji termów (*mgu*), wyszukiwanie klauzul w programie (*procddef*), aktualny poziom przemianowywania zmiennych (*v*) czy stan procesu obliczeniowego (*stop*, w toku lub zakończony).

Ponieważ obliczenia toczą się w obrębie różnej wiedzy, to aktualnie podlegający interpretacji fragment wiedzy jest wskazywany jako wartość specjalnej funkcji (*db*). Ze względu na odmienny sposób organizowania wiedzy sterującej i przedmiotowej, i różne strategie dowodowe (dla wiedzy sterującej obowiązuje standardowa strategia prologowa), rozróżniamy poszczególne kroki w obliczeniach za pomocą tzw. trybu (funkcja *mode*).

Decyzje sterujące dla programu przedmiotowego, reprezentowane przez procedury *sl* i *sc*, są wypracowywane w efekcie wykonania pomocniczych obliczeń w obrębie wiedzy sterującej. Po zdefiniowaniu tranzycji dla działań bazowych obliczenia prowadzonego na poziomie sterowania (reguła wołania opisuje akcje związane z wyszukiwaniem wiedzy w hierarchii teorii, a reguła selekcji - sposób wybierania klauzuli i modyfikację rezolwenty), pozostaje do ustalenia tryb inicjowania obliczeń pomocniczych i interpretacja ich zakończenia.

Na poziomie przedmiotowym, w regule selekcji literału, opisujemy dołączenie do drzewa stanów nowego wierzchołka z rezolwentą zawierającą stosowne zapytanie (w tym przypadku *sl*) oraz odpowiedni znacznik. Wprowadzenie znacznika pozwala na przekazanie wyniku pomocniczego obliczenia po jego pomyślnym zakończeniu. Właściwą reakcję w przypadku wystąpienia porażki opisujemy w odrębnej regule. W analogiczny sposób jest konstruowana reguła reprezentująca proces porządkowania zbioru klauzul.

Aktualnie trwają prace nad rozszerzeniem systemu o możliwość dynamicznego formułowania sterowania przez użytkownika.

LITERATURA

- [CC79] K.Clark,F.McCabe: The Control Facilities of IC-PROLOG. In Expert Systems in the Microelectronic Age. D.Michie (ed.), University of Edinburgh, 1979,pp.153-167.
- [CO82] A.Colerauer: Prolog II Manuel de reference et Modele Theorique. Groupe Intelligence Artificielle. University d'Aix-Marseille II, 1982.
- [GU91] Y.Gurevich: Evolving Algebras. A Tutorial Introduction. Bulletin of the European Association for Theoretical Computer Science, 1991, pp.264-284.
- [NA85] L.Naish: Automating Control in PROLOG. University of Melbourne, 1985.

System wspomagania decyzji w planowaniu rozwoju ekonomicznego z uwzględnieniem ochrony środowiska

Wiesław Ciechanowicz, Piotr Holnicki, Antoni Żochowski

*Instytut Badań Systemowych PAN,
01-447 Warszawa, ul. Nowelska 6*

1. WSTĘP

Polska należy do grupy krajów europejskich o największej emisji tlenków siarki i azotu, pochodzącej przede wszystkim z zakładów energetyki zawodowej (elektrownie, elektrociepłownie). Poza bezpośrednim zanieczyszczeniem powietrza, powoduje to negatywne oddziaływanie na inne elementy środowiska (gleba, wody podskórne i powierzchniowe, lasy, uprawy rolnicze) a także na zdrowie ludzkie i to nie tylko w Polsce ale i w krajach sąsiednich, w wyniku transgranicznego transportu zanieczyszczeń. Z drugiej strony, emisja największych elektrowni zlokalizowanych na terenach byłej NRD oraz w północnej części Czech (regiony Usti nad Labą oraz Ostrawy) ma decydujący wpływ na degradację środowiska w południowo-zachodniej Polsce [4].

Jest kilka głównych przyczyn, które złożyły się na tę sytuację. Po pierwsze, węgiel kamienny i brunatny były i pozostaną przez najbliższe dekady podstawowymi nośnikami energii pierwotnej w energetyce, przemyśle i gospodarstwach domowych. Oba te nośniki, w porównaniu z ropą a zwłaszcza gazem, charakteryzują się jednak wysoką zawartością siarki. Powoduje to bardzo istotne skutki dla środowiska, zwłaszcza że większość polskich elektrowni i elektrociepłowni jest oparta na przestarzałych technologiach, bez instalacji odsiarczających. Węgiel był przy tym w ostatnich dekadach paliwem tanim, w związku z wysokim dotowaniem stosowanym gospodarce centralnie planowanej. Skutkiem niskiej ceny był brak motywacji do jego oszczędzania i mała efektywność wykorzystania, szczególnie w gospodarstwach domowych. Z drugiej strony natomiast, brak właściwej izolacji budynków, przy niskiej wydajności stosowanych urządzeń grzewczych, przyczyniały się dodatkowo do dużego zanieczyszczenia powietrza w skali lokalnej.

W ostatnich latach można zauważyć bardzo silną presję międzynarodową, głównie dotyczącą krajów Europy Wschodniej, na ograniczenie emisji substancji zanieczyszczających do atmosfery [3,4]. W kompleksowej analizie tego problemu należy brać pod uwagę następujące ograniczenia: (i) dostępność technologii wytwarzania energii (ze źródeł odnawialnych i nieodnawialnych), które umożliwiają ograniczenie lub wyeliminowanie emisji zanieczyszczeń, (ii) dostępność środków finansowych niezbędnych do wprowadzenia tych technologii, (iii) techniki sterowania jakością powietrza, które biorą pod uwagę lokalizację i parametry źródeł emisji, fizykę procesów rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń oraz koszt wprowadzenia technologii proekologicznych.

W pracy rozważany jest system wspomagania decyzji dotyczących rozwoju sektora energii, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień ochrony środowiska i przedstawionych wyżej uwarunkowań [1,2]. Umożliwia on analizę różnych scenariuszy rozwoju sektora energii (w ramach całej gospodarki narodowej) oraz wynikających z ich wdrożenia efektów środowiskowych. Głównymi funkcjami systemu są:

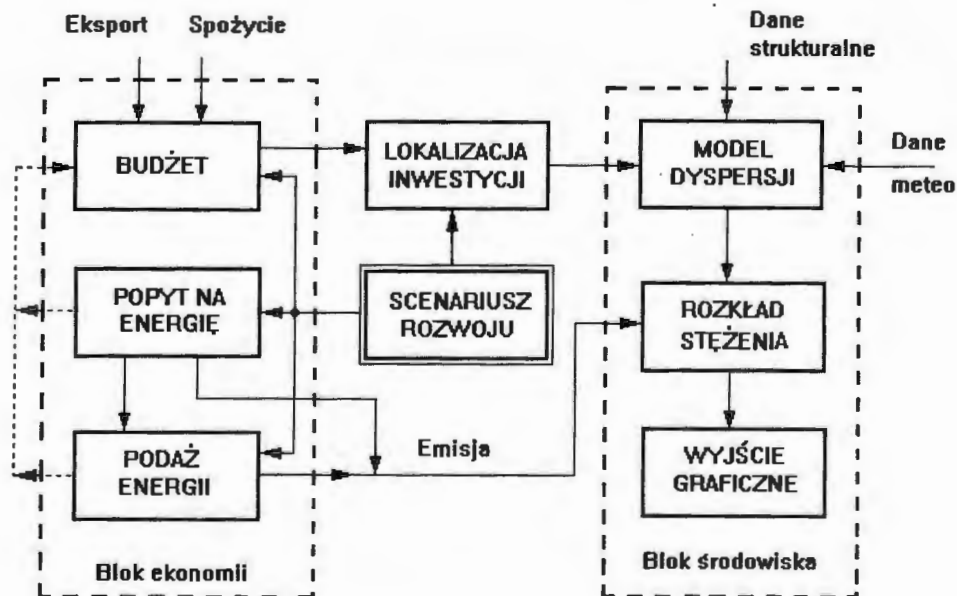
- ocena konsekwencji wybranego scenariusza rozwoju, dla sektorów popytu na energię i podaży energii,
- weryfikacja możliwości gospodarki narodowej na realizację założonego scenariusza,
- wybór optymalnej strategii inwestowania w sektorze energii, która zapewni minimalizację negatywnych skutków środowiskowych, związanych z realizacją danego scenariusza.

W kolejnych rozdziałach przedstawiona będzie ogólna charakterystyka systemu oraz przykłady wykorzystania go do wyboru ekonomicznie akceptowalnych scenariuszy rozwoju sektora produkcji energii w Polsce w najbliższych dekadach. Prognozowany poziom emisji tlenków siarki wykorzystany jest do oceny związanych z tym scenariuszem efektów środowiskowych.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA SYSTEMU

Rozważany system komputerowy składa się z dwóch części: (i) modelu gospodarki narodowej, zawierającego m.in. sektor energii oraz (ii) modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń atmosferycznych wraz z oceną skutków ekologicznych. Cały system można podzielić na kilka następujących bloków funkcjonalnych, przedstawionych na rys. 1: budżet, popyt na energię, podaż energii, lokalizacja nowych inwestycji, symulacja dyspersji zanieczyszczeń powietrza, ocena ostatecznych skutków środowiskowych, graficzna prezentacja wyników. Główne funkcje systemu polegają na określeniu: (i) scenariusza rozwoju sektora energii, który umożliwi ograniczenie jej zużycia oraz zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska, (ii) środków

finansowych niezbędnych do realizacji tego scenariusza, (iii) warunków ekonomicznych, przy których środki te będą osiągalne, (iv) dostępności niezbędnych technologii produkcji energii (w tym technologii odnawialnych), (v) optymalnej lokalizacji nowych inwestycji w sektorze energii, pod kątem minimalizacji ich oddziaływania na środowisko, (vi) map rozkładów zanieczyszczeń powietrza (lub depozycji na powierzchni ziemi) związanych z realizacją danego scenariusza.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu

MODUŁ BUDŻETU symuluje podstawowe wielkości ekonometryczne gospodarki. Podstawowymi jego zadaniami są: (i) prognoza produkcji globalnej we wszystkich gałęziach gospodarki, wykorzystywana jako wejście dla modułu popytu na energię, (ii) sprawdzenie warunków ekonomicznych dla realizacji danego scenariusza rozwoju. Scenariusze są tworzone poprzez odpowiednią modyfikację trendów rozwojowych w dziedzinie podstawowych komponentów, takich jak: materiały, koszty paliw i energii, akumulacja finansowa poszczególnych gałęzi, zatrudnienie, płace, podatki. Główne wielkości wejściowe stanowią prognozy dla eksportu oraz konsumpcji krajowej, natomiast wyjściami są produkcja globalna oraz potencjał finansowy gospodarki [1].

Podstawowym celem MODUŁU POPYTU NA ENERGIĘ jest oszacowanie konsekwencji rozwoju sektora energii. Najważniejszymi wielkościami wyjściowymi są: popyt na energię, przewidywane koszty pierwotnych i wtórnych nośników energii oraz wielkość emisji zanieczyszczeń.

Głównymi wejściami MODUŁU PODAŻY ENERGII są: prognoza popytu na energię, zestaw dostępnych technologii produkcji energii, odnawialne i nieodnawialne źródła energii możliwe do wykorzystania w rozważanych scenariuszach oraz prognoza cen nośników energii. Moduł generuje prognozy podaży nośników energii (w tym paliw płynnych, gazowych, elektryczności) oraz emisji zanieczyszczeń.

MODUŁ EFEKTÓW ŚRODOWISKOWYCH generuje mapy rozkładów przestrzennych koncentracji lub depozycji zanieczyszczeń powietrza, będących wynikiem realizacji danego scenariusza. W schemacie blokowym pokazanym na rys. 1, reprezentowany jest przez trzy podstawowe bloki: rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń, określania końcowego wpływu na środowisko oraz graficznej prezentacji wyników. Pierwszy z nich stanowi implementację modelu matematycznego, który oblicza średnioroczne lub średniosezonowe rozkłady koncentracji/depozycji zanieczyszczeń na jednostkę emisji, dla każdego z rozważanych źródeł (elektrowni, elektrociepłowni). Zbiór danych wejściowych wykorzystywany przez model składa się z charakterystyki strukturalnej terenu (geometria, rzeźba terenu, szorstkość aerodynamiczna), danych meteorologicznych dla okresu symulacji (pole wiatru, opad atmosferyczny, wysokość warstwy mieszania, warunki równowagi atmosfery) oraz opisu pola emisji. Jednostkowe (bazowe) mapy rozkładów zanieczyszczeń dla każdego źródła emisji są obliczane w trybie off-line za pomocą lagrange'owskiego modelu trajektorii. Każda taka mapa jest równoważna pewnej macierzy przejścia, która wiąże emisję danego źródła z jego oddziaływaniem na środowisko. Dla rzeczywistej emisji źródeł, wynikającej z realizacji danego scenariusza, sumaryczny rozkład zanieczyszczeń obliczany jest w następnym bloku jako odpowiednia kombinacja liniowa tych bazowych macierzy przejścia. Ostateczne wyniki są prezentowane w postaci izoliniowych map stężenia/depozycji zanieczyszczeń, uśrednionych za okres symulacji.

3. WYBRANE WYNIKI OBLICZENIOWE

System zastosowano do analizy skutków ekologicznych związanych z realizacją kilku wybranych scenariuszy rozwoju sektora energii w Polsce. Symulację przeprowadzono dla okresu obejmującego lata 1989 – 2030, zdyskretyzowanego dla celów obliczeniowych z krokiem 2.5 roku. Przyjmuje się, że potencjalne możliwości oszczędności energii w przemyśle są rzędu 10 – 30%, zależnie od konkretnej gałęzi przemysłu. Założono ponadto, że jednostkowe zużycie ciepła w gospodarce komunalno-bytowej będzie malało w okresie symulacji, od 190 – 340 kWh/(m²·rok) obecnie, do około 50 kWh/(m²·rok) w roku 2030.

Rozważane są następujące cztery scenariusze rozwoju sektora energii:

Scenariusz 1. Nie wprowadza się żadnych zmian technologicznych w systemie produkcji energii,

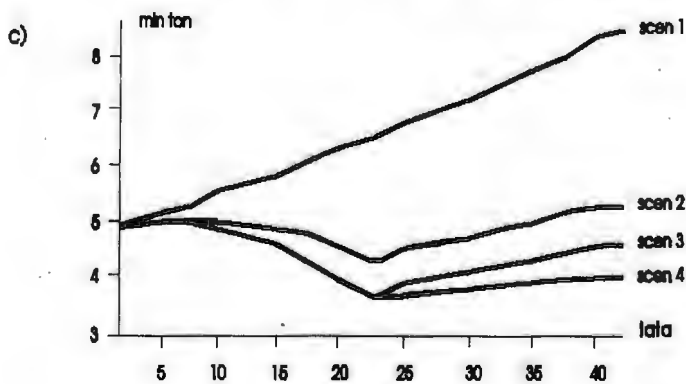
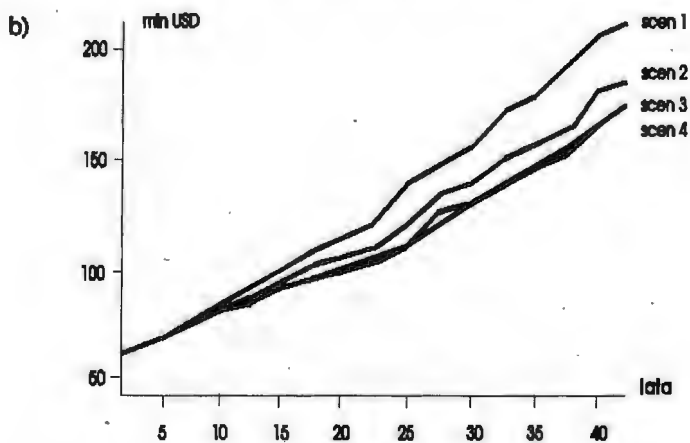
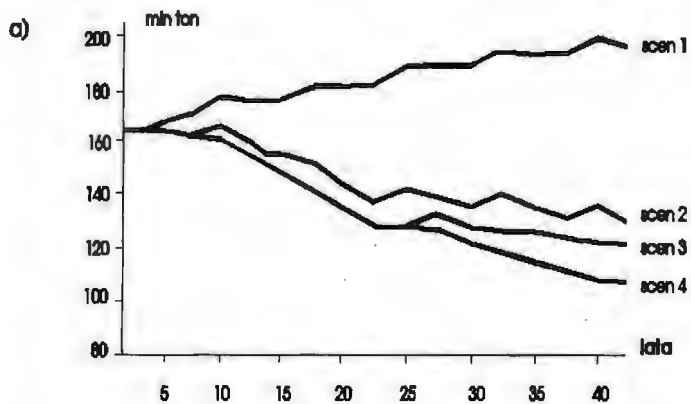
Scenariusz 2. Główne inwestycje modernizacyjne wprowadzane są w sektorze komunalno-bytowym i polegają na: (i) poprawie izolacji budynków, prowadzącej do zmniejszenia jednostkowego zużycia ciepła, (ii) wprowadzeniu systemów ogrzewania wykorzystujących energię słoneczną z sezonowym gromadzeniem energii, wspomaganego przez pompy ciepłe (elektryczne, gazowe lub inne),

Scenariusz 3. Realizacja scenariusza 2, z dodatkowym wprowadzeniem technologii ograniczających zużycie energii we wszystkich gałęziach przemysłu,

Scenariusz 4. Realizacja scenariusza 3, z dodatkowym wykorzystaniem następujących technologii niekonwencjonalnych: (i) stacje generatorów wiatrowych zlokalizowanych na morzu w pobliżu wybrzeża, (ii) uprawy leśne o szybkiej rotacji do produkcji masy drzewnej wykorzystywanej jako paliwo w elektrowniach, (iii) chemiczne przetwarzanie drewna w paliwa płynne.

Na rys. 2 zestawiono niektóre wyniki prognozy ekonomicznej, otrzymane w przypadku realizacji powyższych czterech scenariuszy. Prognozowane zużycie węgla w czterech badanych scenariuszach przedstawione jest na rys. 2(a). Wykres pokazuje potencjalne możliwości prowadzenia polityki oszczędzania energii. Jest oczywiste, że największe rezerwy w tym zakresie kryją się w sektorze komunalno-bytowym i dotyczą przede wszystkim zastosowania odpowiedniej izolacji budynków. Jest to wynik niskich cen energii (wysokie dotowanie) w centralnie planowanej gospodarce w poprzednich dekadach. Duże prognozowane zużycie gazu w scenariuszu 2 wynika z założonego stosowania pomp ciepłych, wspomagających system ogrzewania wykorzystujący energię słoneczną. Prognozowany koszt nośników energii pierwotnej przedstawiono na rys. 2(b). Należy tu zauważyć, że oszczędności finansowe związane z zastosowaniem scenariuszy 2 – 4 mogą być uzyskane poprzez zmniejszenie zużycia energii w sektorze komunalno-bytowym oraz w przemyśle. Wykres 2(c) przedstawia prognozę średniorocznej emisji dwutlenku siarki dla czterech rozważanych scenariuszy. Można zauważyć, że polityka racjonalizacji zużycia energii w sektorze komunalno-bytowym (scenariusz 2) będzie odgrywać istotną rolę w ograniczaniu emisji, w porównaniu z innymi działaniami sektorowymi. Jest to związane z dominującym w Polsce wykorzystaniem węgla jako nośnika energii pierwotnej.

Prognoza emisji przedstawiona na wykresie z rys. 2(c) wykorzystana została jako wejście dla części środowiskowej systemu. Na tej podstawie określono prognozy efektów ekologicznych związanych z realizacją omawianych scenariuszy. W rozważanym przypadku wpływ na środowisko ilustrowany jest poprzez średnioroczny rozkład koncentracji dwutlenku siarki, który jest jednym z głównych czynników zanieczyszczenia powietrza, związanym z sektorem produkcji energii.



Rys. 2. Prognozowane zużycie węgla (a), ceny węgla (b) oraz emisja SO_2 (c) dla czterech scenariuszy rozwoju (początkowy rok 1989)

Całkowite pole emisji zanieczyszczeń powietrza dla każdego scenariusza jest charakteryzowane przez zbiór istniejących oraz planowanych elektrowni i elektrociepłowni. Są one następnie wykorzystywane do określania sumarycznych efektów środowiskowych, związanych z realizacją tego scenariusza. Do określenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń zastosowano jednowarstwowy (uśredniony w warstwie mieszania) model trajektorii typu lagrange'owskiego. Za pośrednictwem tego modelu obliczono w trybie off-line bazowe (dla jednostkowej intensywności emisji) mapy średniorocznych rozkładów zanieczyszczeń, pochodzących od wszystkich analizowanych źródeł emisji. Symulację przeprowadzono dla prostokątnego obszaru pokrywającego terytorium Polski, a ograniczonego współrzędnymi 14° – 24° długości wschodniej oraz 49° – 55° szerokości północnej (porównaj rys. 3). Rozważany obszar obliczeniowy $660\text{km} \times 660\text{km}$ został zdyskretyzowany siatką kwadratową o kroku około 11.5km .

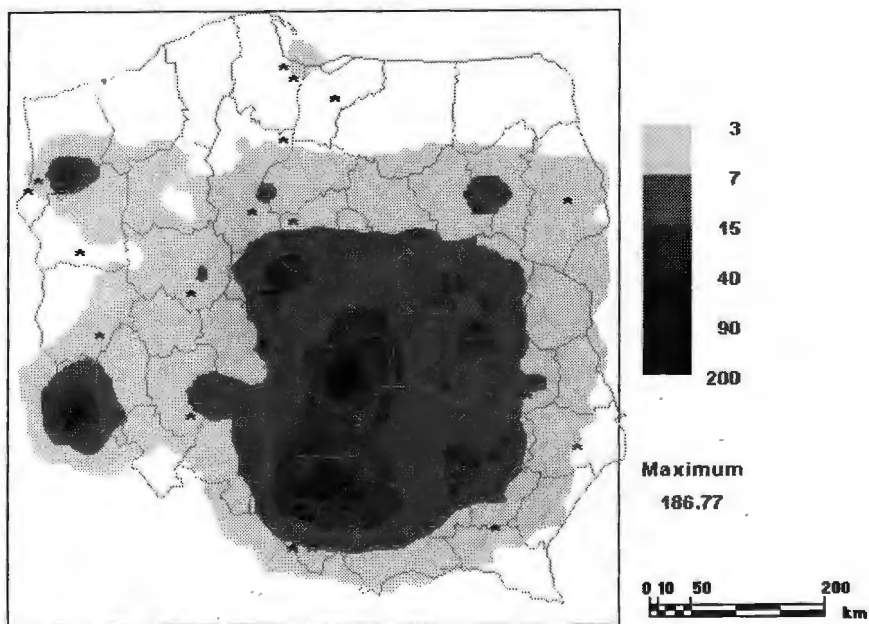
Model oblicza średniosezonowe lub średnioroczne rozkłady stężenia dwutlenku siarki oraz sumarycznej depozycji siarki w obszarze, uwzględniając przy tym procesy suchej depozycji zanieczyszczeń oraz wymywania przez opady. Horyzont czasowy symulacji (rok, sezon lub kwartał) jest dyskretyzowany z krokiem 12h. Z tą częstotliwością wprowadzane są zależne od czasu dane wejściowe: składowe pola wiatru, wysokość warstwy mieszania, stabilność atmosfery, intensywność opadu atmosferycznego. Ciągłe trajektorie pola wiatru w obszarze są obliczane przez wyspecjalizowany model, który interpoluje dane ze stacji meteorologicznych, uwzględniając przy tym wpływ rzeźby terenu i szorstkości aerodynamicznej podłoża.

Obliczenia dyspersji zanieczyszczeń przeprowadzono dla 70-ciu głównych, istniejących elektrowni i elektrociepłowni oraz dla 10-ciu planowanych instalacji (konwencjonalnych i odnawialnych), których lokalizacja i parametry wynikały z realizowanego scenariusza. Wykorzystano ciąg danych meteorologicznych dla reprezentatywnego roku 1989, przy czym uwzględniono dane z czterech stacji pomiarowych, zlokalizowanych w Legionowie, Lebie, Poznaniu i Wrocławiu. Na tej podstawie określane są trajektorie pola wiatru w całym obszarze obliczeniowym, w każdym kroku czasowym. Uzyskane w wyniku symulacji jednostkowe, średnioroczne macierze dyspersji zanieczyszczeń dla wszystkich źródeł, były następnie wykorzystane do obliczenia sumarycznych map rozkładu zanieczyszczeń dla czterech rozważanych scenariuszy.

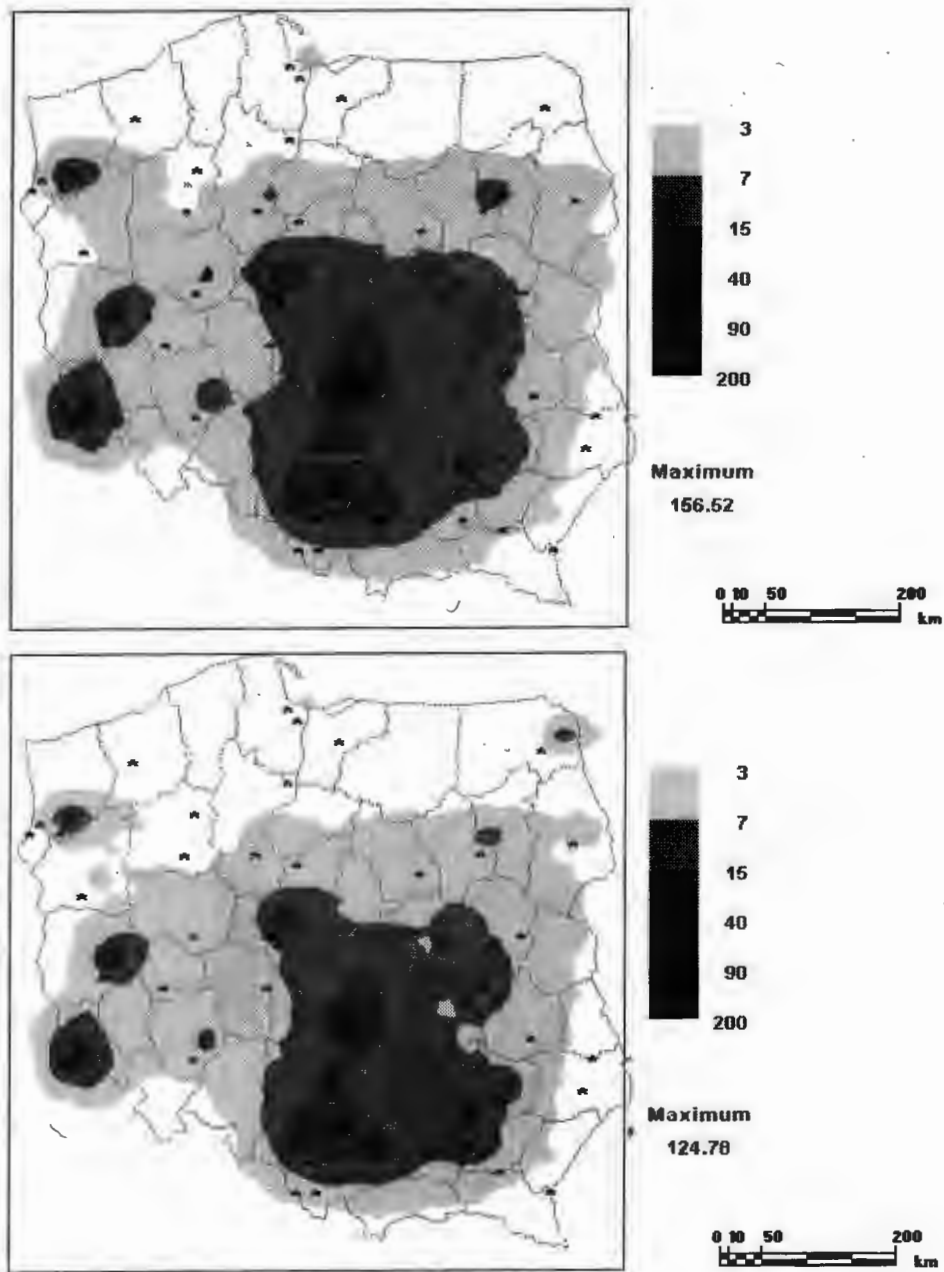
Na rys. 3 przedstawiono początkowy rozkład stężenia SO_2 , dla roku 1989. Kolejne mapy, załączone jako rys. 4(a) oraz rys. 4(b), pokazują prognozowane rozkłady stężenia, otrzymane przy realizacji scenariusza 4, odpowiednio dla lat 2010 oraz 2030. Widoczne tu, ogólne obniżenie koncentracji SO_2 jest wynikiem realizowanej w tym scenariuszu polityki oszczędzania energii oraz wykorzystania "czystych" technologii przy jej produkcji (porównaj rys. 2). Zmniejszenie w roku 2030 obszaru, w którym występują maksymalne wartości stężenia w porównaniu z rokiem 2010, wynika z relatywnie mniejszego udziału elektrowni spalających węgiel brunatny.

LITERATURA

1. Ciechanowicz W. oraz P. Holnicki: Computer system for energy sector expansion analysis with emphasis on environment quality control. W: (Owsiński J.W., Stefański J. oraz A. Straszak, ed.), *Proceedings of the IFORS Conference on Transition to Advanced Market Economies*, Warsaw, 1992, str. 435 – 444.
2. Ciechanowicz W., Holnicki P. oraz A. Kałuszko: Komputerowa analiza rozwoju energetyki z uwzględnieniem ochrony środowiska, *Biuletyn Instytutu Badań Systemowych PAN*, No. 1, 1993, str. 10 – 20.
3. Comission of the European Communities. 88/609/EEC Council Directive of 24 Nov. 1988 on the limitations of emissons of certain pollutants into the air from large combustion plants, *Official Journal of the European Communities*, 31, 1990, str. 1 – 13.
4. Klimont, Z., Amann, M., Cofala, J., Gyarfás, G., Klaassen, G. oraz W. Schopp: An emission inventory for Central Europe Initiative 1988, *Atmos. Environment*, vol. 28, 1993, str. 235 – 246.



Rys. 3. Początkowe (1989) średnioroczne stężenie SO_2 ze źródeł energetyki zawodowej



Rys. 4. Prognozowany rozkład stężenia SO_2 dla lat 2010 (góra) oraz 2030 (dół) przy realizacji scenariusza 4

PROCEDURA METAHEURYSTYCZNA P-SA DLA ZADAŃ WIELOKRYTERIALNEJ OPTYMALIZACJI KOMBINATORYCZNEJ

Piotr Czyżak, Andrzej Jaskiewicz
Instytut Informatyki
Politechniki Poznańskiej
60-965 Poznań, ul.Piotrowo 3a

Streszczenie. Artykuł przedstawia koncepcję procedury metaheurystycznej P-SA (ang. Pareto - Simulated Annealing) dla rozwiązywania wielokryterialnych problemów o charakterze kombinatorycznym. Celem metody jest generowanie "dobrej" próby rozwiązań sprawnych i przedstawianie jej decydentowi. Proponowane podejście łączy idee pochodzące z jednokryterialnych technik metaheurystycznych: symulowanej relaksacji (ang.simulated annealing) oraz algorytmów genetycznych (ang.genetic algorithm). Z pierwszej z nich zapożyczono technikę unikania pozostawiania w lokalnych optimach. Z drugiej natomiast, koncepcję równoległego przetwarzania zbioru rozwiązań (populacji) wzajemnie na siebie oddziałujących zamiast pojedynczego rozwiązania.

1.Wstęp

W ostatnim dziesięcioleciu dużą popularność zdobyły procedury metaheurystyczne typu symulowanej relaksacji [4,5], przeszukiwania tabu [2] oraz algorytmy genetyczne [3]. Stosowano je do zagadnień kombinatorycznych o dużym rozmiarze. Dla tej klasy zadań nieprzydatne okazały się dokładne metody optymalizacyjne charakteryzujące się dużą złożonością obliczeniową. Ponadto, w wielu praktycznych sytuacjach decydenta satysfakcjonują rozwiązania suboptymalne uzyskane w możliwym do akceptacji czasie.

Ocena generowanych rozwiązań realizowana była najczęściej za pomocą pojedynczej miary jakości. W problemach rzeczywistych często niezbędnym jest uwzględnienie wielu różnych aspektów oceny. Prowadzi to do sformułowania problemu

wielokryterialnej optymalizacji kombinatorycznej, który w ogólności może być zapisany następująco:

$$\begin{array}{c} \max\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_K(x)\} \\ \text{przy ograniczeniach} \\ x \in D \end{array}$$

gdzie D jest skończonym, lecz bardzo licznym zbiorem dostępnych rozwiązań (alternatyw) x , $f_i(x)$ ($i=1, \dots, K$) wyraża ocenę alternatywy z i -tego punktu widzenia.

Matematycznie, powyższe sformułowanie problemu optymalizacji kombinatorycznej jest niepoprawne, niemożliwe jest bowiem, w ogólnym przypadku, jednoczesne maksymalizowanie różnych, zwykle wzajemnie sprzecznych kryteriów. Stosuje się tu zatem koncepcję rozwiązań niezdominowanych (Pareto-optymalnych), zgodnie z którą rozwiązania różniące się wartościami ocen dla poszczególnych kryteriów jednocześnie w sposób zgodny i przeciwny kierunkowi preferencji decydenta są z matematycznego punktu widzenia nierozróżnialne.

Celem proponowanej procedury wielokryterialnej jest wygenerowanie jak najliczniejszej próby rozwiązań dopuszczalnych będących rozwiązaniami niezdominowanymi lub bliskimi niezdominowanym. Ponieważ algorytmy metaheurystyczne okazały się efektywnymi narzędziami optymalizacji jednokryterialnej sensowne wydaje się wykorzystanie zawartych w nich idei dla budowy algorytmów optymalizacji wielokryterialnej.

2. Ogólny schemat metody P-SA

Podstawową ideą metody P-SA jest znajdowanie zamiast pojedynczego rozwiązania, jak to miało miejsce w przypadku metod jednokryterialnych, próby rozwiązań będących dobrą reprezentacją zbioru rozwiązań Pareto-optymalnych. Podobnie jak jednokryterialne metaheurystyki, proponowana metoda wielokryterialna jest także tylko ogólnym schematem procedury optymalizacyjnej. Schemat ten musi za każdym razem być odpowiednio adaptowany dla rozwiązania konkretnego problemu optymalizacji kombinatorycznej.

Proponowane podejście wykorzystuje szereg koncepcji zaproponowanych dla metaheurystyk jednokryterialnych: symulowanej relaksacji i algorytmów genetycznych. Koncepcje zaczerpnięte z obu algorytmów można w skrócie opisać następująco:

- Algorytmy Genetyczne
 - Zastosowanie próby rozwiązań (populacji)
- Symulowana Relaksacja
 - Koncepcja sąsiedztwa
 - Akceptacja nowych rozwiązań z pewnym prawdopodobieństwem
 - Zależność prawdopodobieństwa akceptacji od parametru zwanego temperaturą
 - Zastosowanie schematu zmiany temperatury.

Przyjmijmy następujące oznaczenia:

D - zbiór rozwiązań dopuszczalnych wielokryterialnego problemu optymalizacji kombinatorycznej;
 $x, y \in D$ - rozwiązania sprawne problemu optymalizacji kombinatorycznej;
 S - próbka generująca rozwiązania sprawne;
 N - zbiór rozwiązań potencjalnie sprawnych;
 $V(x)$ - sąsiedztwo rozwiązania x (zbiór rozwiązań osiągalnych za pomocą pojedynczego "ruchu" z rozwiązania x);
 T - temperatura;
 T_0 - temperatura początkowa;
 $p_{xy}(T, S)$ - prawdopodobieństwo akceptacji rozwiązania y należącego do sąsiedztwa $V(x)$ przy temperaturze T , gdzie $x \in S$;

Ogólny schemat metody P-SA w zapisie Pascalo-podobnym można wyrazić następująco:

```

Wybierz próbę rozwiązań początkowych S
Wykorzystaj S do uaktualnienia zbioru rozwiązań potencjalnie
niezdominowanych N
T := T0
repeat
    repeat
        for każdego  $x \in S$  do
            Wybierz  $y \in V(x)$ 
            Uaktualnij zbiór N ze względu na y
             $x := y$  (akceptuj y) z prawdopodob.  $p_{xy}(T, S)$ 
        until warunki zmiany temperatury będą spełnione
        T :=  $\alpha T$ 
until spełniono warunki stopu
  
```

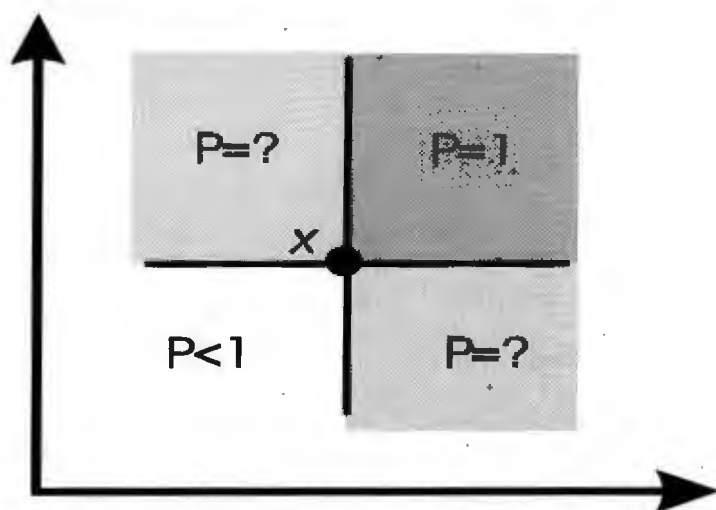
Adaptacja powyższego schematu metody dla konkretnego zadania wielokryterialnej optymalizacji kombinatorycznej polega na zdefiniowaniu pojęcia sąsiedztwa dla dowolnego rozwiązania dopuszczalnego, określeniu warunków które muszą być spełnione dla zmiany temperatury oraz zatrzymania procedury. Ponadto ustalona być musi wielkość próby generującej S (populacji) oraz temperatura początkowa T_0 .

Ogólny schemat proponowanej metody podobny jest do schematu klasycznej, jednokryterialnej symulowanej relaksacji. Proponowana metoda stosuje jednak próbę generującą S , zamiast pojedynczego rozwiązania jak to było w metodzie jednokryterialnej. Inną różnicą jest sposób określania prawdopodobieństwa akceptacji nowego rozwiązania. Prawdopodobieństwo to określane jest tak aby powodować, z jednej strony, ruch próby generującej S w stronę zbioru rozwiązań niezdominowanych, z drugiej zaś strony, dyspersję rozwiązań w próbie, w sposób możliwie równomierny, po całym zbiorze rozwiązań niezdominowanych.

W celu wytworzenia tendencji przemieszczającej zbiór S w stronę zbioru rozwiązań sprawnych proponuje się zastosowanie tzw. reguł wielokryterialnej akceptacji [1,6]. W przypadku jednokryterialnym prawdopodobieństwo akceptacji zależy od wartości pojedynczego kryterium i jest równe jeden jeśli nowe rozwiązanie ma wartość kryterium nie gorszą od poprzedniego rozwiązania oraz mniejszą od jeden w przeciwnym przypadku. Gdy mamy do czynienia z wieloma kryteriami, gdy dokonujemy porównania ze sobą aktualnego i nowego rozwiązania, mogą wystąpić trzy sytuacje:

- nowe rozwiązanie dominuje lub jest równe aktualnemu,
- nowe rozwiązanie jest zdominowane przez aktualne,
- nowe rozwiązanie jest nie-zdominowane ze względu na aktualne rozwiązanie.

Wszystkie stosowane reguły wielokryterialnej akceptacji przyjmują, że w sytuacji pierwszej prawdopodobieństwo akceptacji jest równe 1 i w sytuacji drugiej jest mniejsze od 1. Reguły te różnią się jedynie sposobem traktowania przypadku trzeciego, gdy rozwiązanie nowe i aktualne się wzajemnie nie dominują (zobacz Rys. 1). Przykłady różnych reguł akceptacji nowego rozwiązania przedstawiono w kolejnym rozdziale.



Rys 1. Prawdopodobieństwo akceptacji dla reguł wielokryterialnej akceptacji w przypadku dwóch kryteriów.

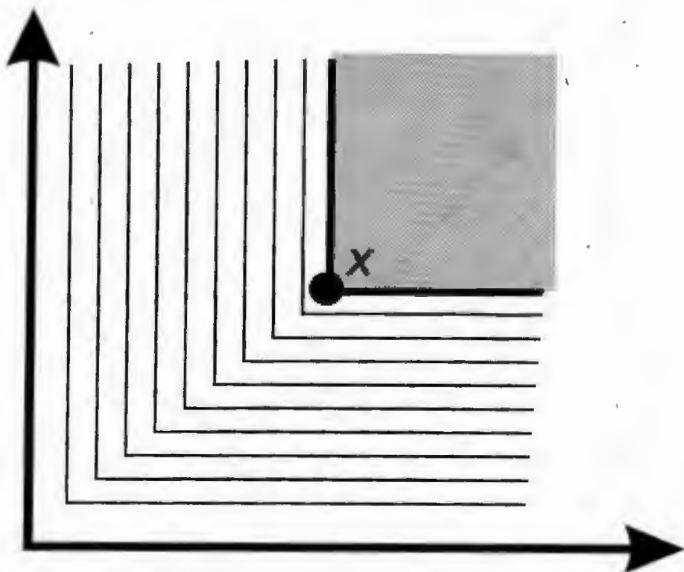
3. Różne reguły akceptacji nowych rozwiązań

Reguła C używa następującego wyrażenia dla określenia prawdopodobieństwa akceptacji:

$$P_{xy}(T) = \min \left\{ 1, \exp \left(\max_j \left\{ \lambda_j (f_j(x) - f_j(y)) / T \right\} \right) \right\}$$

gdzie $\Lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_p]$ jest wektorem wag.

Reguła ta może być rozumiana jako lokalna agregacja wszystkich kryteriów za pomocą ważonej normy Czebyszewa. Graficznie powyższą regułę przedstawiono na Rys.2.

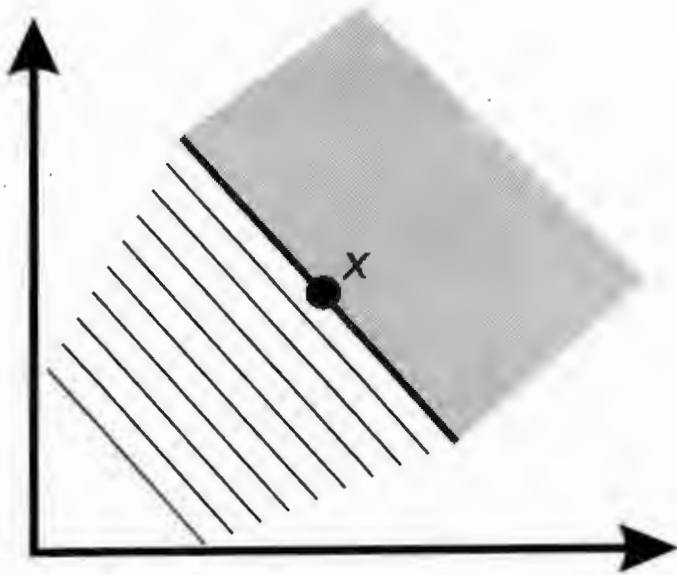


Rys. 2. Graficzna prezentacja reguły C w przypadku dwukryterialnym (linie przedstawiają obszary o tym samym prawdopodobieństwie akceptacji).

Prawdopodobieństwo akceptacji reguły SL zdefiniowane jest za pomocą następującego wyrażenia:

$$P_{xy}(T) = \min \left\{ 1, \exp \left(\sum_j (\lambda_j (f_j(x) - f_j(y)) / T) \right) \right\}$$

Reguła ta realizuje zasadę lokalnej agregacji kryteriów za pomocą ważonej, liniowej sumy. Graficznie regułę SL ilustruje Rys.3.

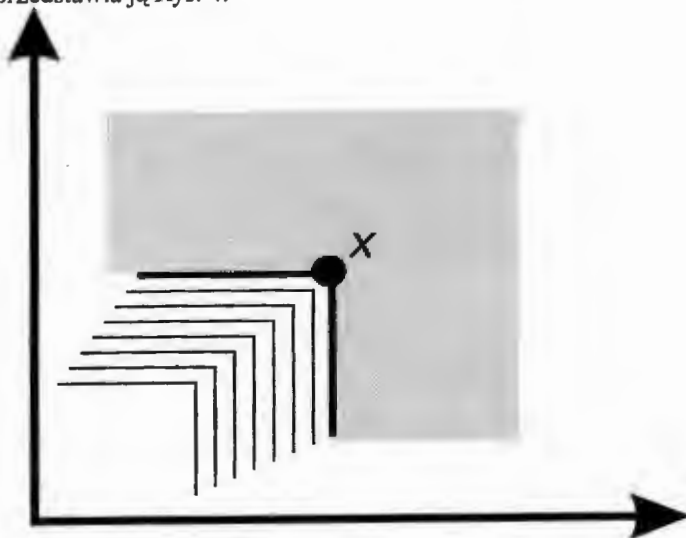


Rys. 3. Graficzna reprezentacja reguły SL dla dwóch kryteriów.

Reguła W wykorzystuje następującą definicję prawdopodobieństwa akceptacji:

$$P_{xy}(T) = \min \left\{ 1, \exp \left(\min_j \left\{ \lambda_j (f_j(x) - f_j(y)) / T \right\} \right) \right\}$$

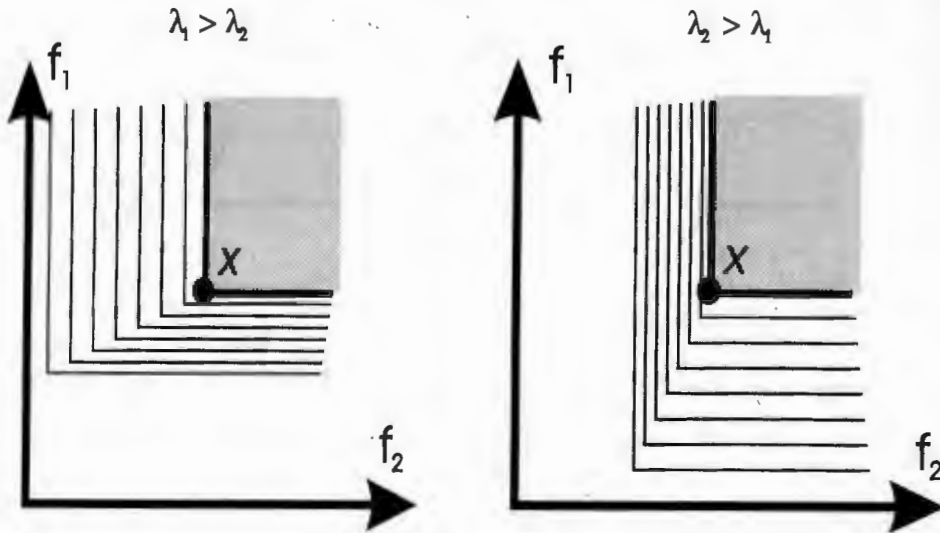
Graficznie przedstawia ją Rys. 4.



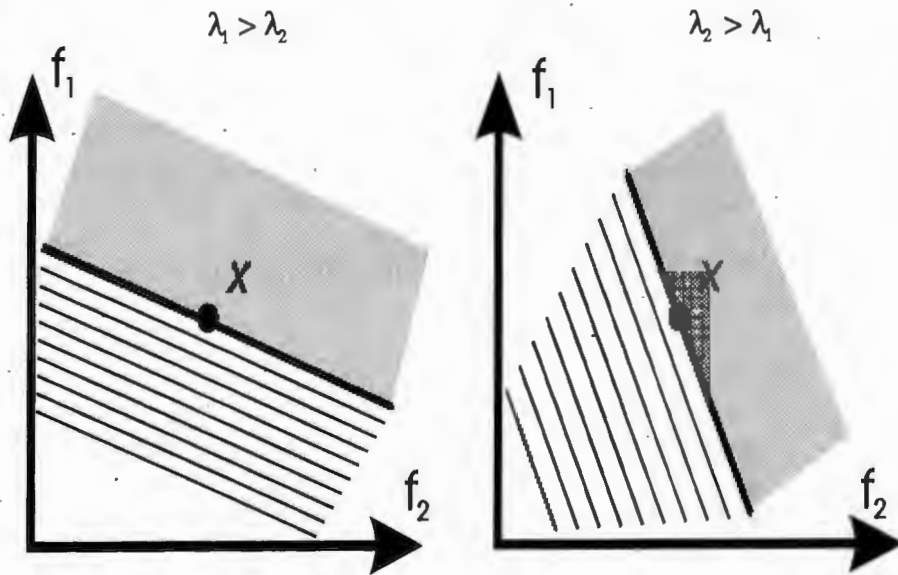
Rys. 4. Graficzna reprezentacja reguły W dla dwóch kryteriów.

4. Znaczenie wektora wag dla poszczególnych reguł akceptacji

Wszystkie przedstawione powyżej reguły akceptacji rozwiązań wykorzystują wektor wag $\Lambda = [\lambda_1, \dots, \lambda_p]$. W ogólności, im wyższa waga związana z danym kryterium tym niższe prawdopodobieństwo akceptacji nowego rozwiązania pogarszającego wartość tego kryterium. Z drugiej strony, im niższa waga kryterium tym większa możliwość akceptacji rozwiązania pogarszającego to kryterium. Sytuacja ta jest graficznie przedstawiona na Rys. 5 oraz Rys. 6 dla reguł, odpowiednio, C i SL oraz różnych relacji pomiędzy wagami..



Rys. 5. Rola wag w regule C.



Rys. 6. Rola wag w regule SL.

W prezentowanej metodzie metaheurystycznej odpowiednia modyfikacja wag służy zapewnieniu realizacji równomiernej dyspersji rozwiązań z próbki generującej w zbiorze rozwiązań niezdominowanych. W związku z tym, wagi przeliczane są przed każdym krokiem dla każdego z rozwiązań $x \in S$.

Algorytm przeliczania wag wygląda następująco:

Znajdź rozwiązanie $x' \in S$ nie zdominowane ze wzgl. na x i najbliższe x (ze wzgl. na pewną miarę odległości L_p)

if jeśli nie istnieje $x' \in S$ niezdominowane ze wzgl. na x **then**

Nadaj wagom wartości losowe spełniające warunki:

$$\forall_j \lambda_j \geq 0 \text{ and } \sum_j \lambda_j = 1$$

else

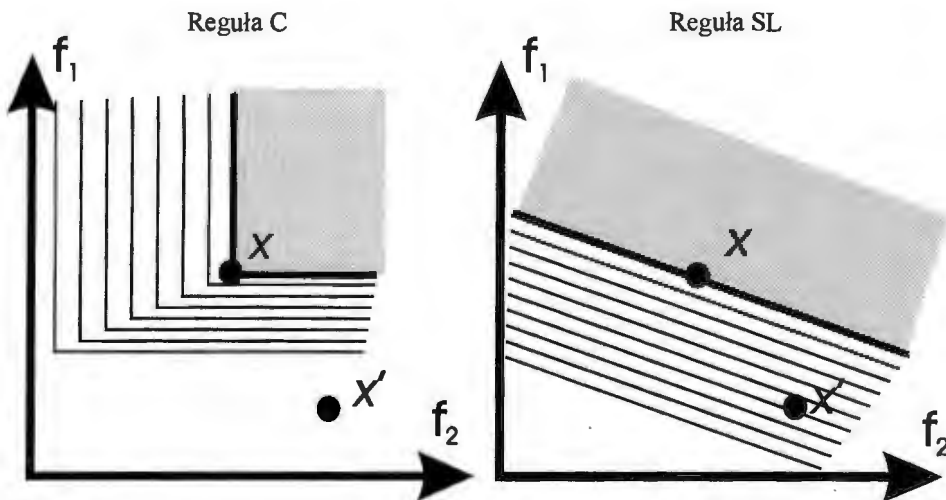
for dla każdego kryterium j **do**

$$\lambda_j = \begin{cases} \alpha, & \text{dla } f_j(x) \geq f_j(x') \\ \beta, & \text{dla } f_j(x) \leq f_j(x') \end{cases}$$

gdzie: α jest stałą dodatnią, bliską 1, a β jest stałą dodatnią bliską 0.

Celem powyższego algorytmu jest obniżenie prawdopodobieństwa akceptacji ruchów zmniejszających dystans pomiędzy x i x' oraz zwiększanie prawdopodobieństwa akceptacji ruchów zwiększających ten dystans. Cel ten jest osiąganym poprzez

przydzielanie niższego prawdopodobieństwa ruchom, które pogarszają znacznie wartość kryteriów lepszych dla rozwiązania x . Sytuacja ta jest graficznie zilustrowana na Rys.7 dla reguł C oraz SL.



Rys 7. Obliczanie wag kryteriów dla reguł C i SL.

5.Zastosowania metody P-SA

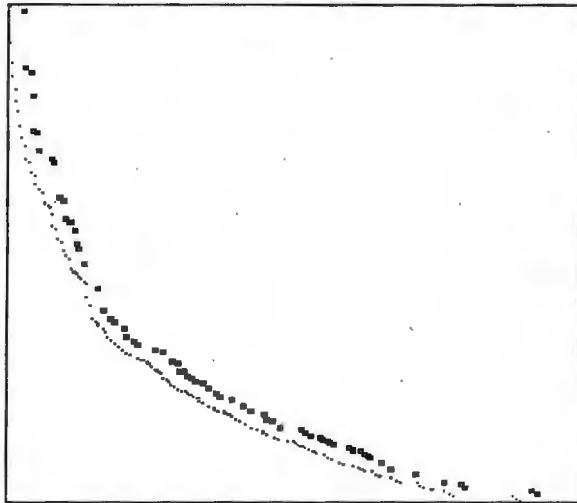
Przedstawiona w artykule metoda metaheurystyczna dla kombinatorycznych problemów wielokryterialnych służy do generowanie zbiorów rozwiązań będących dobrym przybliżeniem zbioru rozwiązań Pareto- optymalnych. Przykład takiego przybliżenia pokazano na Rys.8.

Uzyskane w ramach tej procedury rozwiązania mogą być następnie przeglądane przez decydena w celu znalezienia rozwiązania będącego najlepszym kompromisem. Przegląd ten może być oczywiście wspomagany za pomocą różnych metod służących do analizy skończonych zbiorów alternatyw, np. metodami typu ELECTRE.

Innym sposobem wykorzystania procedury P-SA jest wbudowanie jej jako procedury obliczeniowej do metody dialogowego rozwiązywania problemu wielokryterialnej optymalizacji kombinatorycznej. W tym wypadku, kolejne iteracje procedury służyłyby dokładniejszej eksploracji otoczeń rozwiązań wskazanych przez decydena jako interesujące.

Na koniec pragniemy zwrócić uwagę na potencjalne możliwości dotyczące implementacji procedury P-SA. Ponieważ w procedurze uwzględnia się jednocześnie wiele punktów generujących (zbiór S) i w każdej iteracji procedury dla każdego z nich wykonuje się niezależne obliczenia można w sposób bardzo naturalny dokonać

równoległej implementacji procedury P-SA. Implementacja taka powinna w znaczny sposób poprawić efektywność algorytmu oraz umożliwić jego dialogowe wykorzystanie.



Rys.8. Przybliżenie zbioru rozwiązań Pareto- optymalnych dla zadania dwukryterialnego (punkty reprezentują zbiór rozwiązań Pareto- optymalnych, kwadraty zbioru rozwiązań potencjalnie Pareto- optymalnych)

LITERATURA

- [1] Fortemps P., Teghem J., Ulungu B. , Heuristics for multiobjective combinatorial optimization by simulated annealing, *Proc. of the XI-th Internat. Conf. on MCDM, Coimbra 1-6.08.94.*
- [2] Glover F., Tabu Search - Part I, *ORSA J.Comput.*, 1, 190-206, 1989.
- [3] Goldberg D.E., *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- [4] Kirkpatrick S., Gelatt C.D. and Vecchi M.P., Optimization by simulated annealing, *Science*, 220, 671-680, 1983.
- [5] Laaroven P.J.M. and Aarts E.H.L., *Simulated Annealing: Theory and Applications*, Reidel, Dordrecht, 1987.
- [6] Serafini P., Simulated annealing for multi-objective optimization problems. *Proceedings of the Tenth International Conference on Multiple Criteria Decision Making*, Taipei, 1, 87-96, 1992.

ISBN 83-85847-85-5

**W celu uzyskania bliższych informacji i zakupu dodatkowych egzemplarzy
prosimy o kontakt
z Instytutem Badań Systemowych PAN
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa
tel. 36-19-01 w. 241 e-mail: kotuszew@ibspan.waw.pl**