

ALGORYTMY OPTYMALIZACJI DLA WYBRANYCH KLAS ZAGADNIENI HARMONOGRAMOWANIA I SZEREGOWANIA

Józef Grabowski, Eugeniusz Nowicki, Czesław Smutnicki, Stanisław Zdrzałka
Instytut Cybernetyki Technicznej, Politechnika Wrocławska

W pracy przedstawiono wyniki badań otrzymane dotychczas przy realizacji Projektu badawczego Nr. 3 P403 019 06 realizowanego od 1.02.1994. Przewidywany termin ukończenia Projektu to 30.12.1995. Szczególną uwagę zwrócono na omówienie wyników badań testowych proponowanych algorytmów aproksymacyjnych.

1. Wstęp

Celem projektu jest opracowanie metod i algorytmów rozwiązywania wybranych trudnych (ze względu na złożoność obliczeniową) problemów optymalizacji dyskretnej występujących w harmonogramowaniu produkcji. W szczególności badania dotyczą:

- I. Klas zagadnień, w których występują dodatkowe, w stosunku do modeli standardowych, założenia i ograniczenia związane z:
 - występowaniem rodzin zadań podobnych, czasami przebrojeń maszyn, grupowaniem lub porcjowaniem zadań (*zagadnienia grupowania zadań lub porcjowania zadań*),
 - zmieniającymi się w zależności od dostarczonych zasobów czasami wykonywania zadań (*zagadnienia ze zmiennymi czasami wykonywania*).
- II. Opracowania efektywnych algorytmów aproksymacyjnych opartych na metodach sztucznej inteligencji dla rozwiązywania klasycznych problemów optymalizacyjnych harmonogramowania i szeregowania zadań. W szczególności projekt przewiduje konstrukcję i badania eksperymentalne algorytmów typu *tabu search*, to jest algorytmów lokalnego przeszukiwania z zabronionymi ruchami.

2. Klasa zagadnień I

W tej klasie zagadnień skupiono się na rozwiązywaniu klasycznych problemów harmonogramowania produkcji z pewnymi dodatkowymi założeniami i ograniczeniami w stosunku do standardowych modeli. Restrykcje te wynikają przede wszystkim z potrzeb praktycznych.

2.1 Problemy grupowania i porcjowania zadań

W dziedzinie grupowania zadań badane były zagadnienia jednomaszynowe z zadanymi pożądanymi czasami zakończenia realizacji (w wersji równoważnej, z zadanymi czasami dostarczania) oraz dwumaszynowy permutacyjny problem przepływowy. W dziedzinie porcjowania zadań, badany był jednomaszynowy problem harmonogramowania z zadanymi czasami zgłoszeń i czasami dostarczania zadań.

Dla zagadnienia grupowania zadań w którym celem jest minimalizacja maksymalnego czasu dostarczenia zadań (równoważna minimalizacji maksymalnej nieterminowości) przy zerowych czasach zgłoszeń opracowano metodykę przybliżonego rozwiązywania problemu i przedstawiono dwa algorytmy aproksymacyjne, obydwa posiadające wskaźnik dokładności dla najgorszego przypadku równy $3/2$ [11]. Badania eksperymentalne potwierdziły, że obydwa podejścia są również dokładne w sensie średnim.

To samo zagadnienie, przy niezerowych, znanych a priori czasach zgłoszeń badane było w pracy [12]. Rozpatrzono oddzielnie problem przy założeniu typu technologii grupowej, kiedy wszystkie zadania tej samej rodziny muszą być wykonywane jedno po drugim, oraz problem grupowania zadań (gdy podział rodziny na grupy zadań wykonywanych łącznie jest dopuszczalny). Dla pierwszego zagadnienia podano uogólnienie rozszerzonego algorytmu Jacksona szeregowania rodzin, traktowanych jako odpowiednio sformułowane zadania złożone, i wykazano szereg jego własności będących uogólnieniami znanych własności dla problemu standardowego. W oparciu o nie otrzymano algorytm metody podziału i ograniczeń rozwiązujący problemy z liczbą zadań do $n=400$ w bardzo krótkim czasie. Dla zagadnienia grupowania zadań zaproponowano algorytm aproksymacyjny o wskaźniku dokładności dla najgorszego przypadku $2C_A \leq 3C^* + 2\min\{q_{\max}, r_{\max}\}$, gdzie C_A , C^* są, odpowiednio, wartością funkcji celu otrzymaną przez algorytm i minimum funkcji celu, a $q_{\max}$ i $r_{\max}$ jest, odpowiednio, maksymalnym czasem dostarczania i maksymalnym czasem zgłoszenia zadania. Na podstawie tego algorytmu sformułowano dalsze jego uogólnienia i zbadano eksperymentalnie ich dokładność.

W pracy [14] pokazano, że zagadnienie grupowania zadań dla permutacyjnego, przepływowego systemu wytwarzania z dwoma maszynami i funkcją celu w postaci czasu zakończenia zadań jest problemem NP-trudnym. Dla jego rozwiązywania zaproponowano dwa algorytmy aproksymacyjne o wskaźniku dokładności dla najgorszego przypadku $3/2$ i $4/3$.

Dla modelu jednomaszynowego z zadanymi czasami zgłoszeń i czasami dostarczania zadań (pożądanymi czasami zakończenia wykonywania zadań) badany był również problem porcjowania zadań przy kryterium minimalizacji czasu dostarczenia wszystkich porcji. Pokazano, że problem ten jest NP-trudny i podano dla jego rozwiązywania algorytm aproksymacyjny o wskaźniku dokładności dla najgorszego przypadku równym $3/2$, [13].

2.2 Problemy ze zmiennymi czasami wykonywania zadań

W wielu praktycznych przypadkach czas wykonania zadania produkcyjnego nie jest stały ale może zmieniać w pewnym przedziale w zależności od ilości przydzielonych zasobów nieodnawialnych. W takich wypadkach oprócz tradycyjnych wskaźników jakości uszeregowania pojawia się nowy będący kosztem wykonania zadań. Powoduje to pojawienie się całego szeregu nowych problemów optymalizacyjnych. Kilka z nich przedstawiono w pracach [2], [8].

W pracy [2] rozważano jednomaszynowy problem szeregowania z czasami gotowości, czasami dostarczenia i zmiennymi czasami wykonywania zadań. Jako wskaźnik jakości przyjęto kombinację liniową terminu dostarczenia wszystkich zadań i kosztu ich wykonania. Zaproponowano algorytm aproksymacyjny o wskaźniku dokładności dla najgorszego przypadku $r+1/3$, gdzie r jest wskaźnikiem dokładności pomocniczego algorytmu (wybranego z literatury) dla tego problemu z ustalonymi czasami wykonywania zadań.

W pracy [8] badano problem szeregowania zadań na równoległych maszynach ze zmiennymi czasami wykonywania, w którym przyjęto dwukryterialny wskaźnik jakości: czas wykonania oraz koszt wykonania wszystkich zadań. Dla przypadku maszyn identycznych przedstawiono zachłanny algorytm o złożoności obliczeniowej $O(n^2)$, wyznaczający zbiór rozwiązań Pareto-optymalnych. Dla przypadku maszyn jednorodnych podano algorytm o złożoności

$O(n \max\{n, \log n\})$ rozwiązujący problem minimalizacji kosztu przy zadanym górnym ograniczeniu na czas wykonywania. Na jego podstawie opracowano algorytm znajdowania pewnej dowolnie dokładnej aproksymacji zbioru rozwiązań Pareto-optymalnych.

2.3 Inne problemy

W pracy [1] przedstawiono problem optymalizacji procesu produkcyjnego nowej generacji automatów tokarskich, zwanych elastycznymi centrami tokarsko - frezarskimi. Umożliwiają one pełną automatyzację produkcji małoseryjnej i jednostkowej. Prace konstrukcyjne nad tego typu centrami były prowadzone, między innymi, w Fabryce Automatów Tokarskich RAFAMET. Ze względu na dużą kapitałochłonność automatów, wymagany jest wysoki stopień ich wykorzystania. W trakcie produkcji, detale poddawane są procesowi obróbki polegającemu na wykonywaniu operacji tokarskich, frezarskich i pomiarowych. Przed obróbką każdy detal mocowany jest na specjalnej palecie zaś narzędzia niezbędne do wykonania operacji pobierane są automatycznie z magazynów narzędzi.

W pracy [1] rozważano dwa problemy: (i) wyznaczenie kolejności wykonywania detali, (ii) określenie współdziałania obrabiarki z magazynami narzędzi oraz wykorzystanie narzędzi w trakcie operacji na detalach. Do rozwiązania tych problemów zaproponowano odpowiednie algorytmy heurystyczne, które w istotny sposób zwiększają stopień wykorzystania automatów - w stosunku do metod dotychczas stosowanych.

3. Klasa zagadnień II

Zdecydowana większość problemów harmonogramowania produkcji należy do klasy problemów NP-trudnych tzn. takich, dla których najprawdopodobniej nie istnieją wielomianowe (a tym samym szybkie) algorytmy wyznaczające rozwiązanie optymalne. Podstawowe metody stosowane przy konstrukcji dokładnych algorytmów niewielomianowych (wykładniczych) to metoda podziału i ograniczeń oraz programowanie dynamiczne. Niestety rozmiar badanych problemów wyklucza stosowanie tych metod. Dlatego też pozostają nam jedynie szybkie algorytmy aproksymacyjne. Algorytmy te można podzielić na dwie grupy: algorytmy *konstrukcyjne* i algorytmy *popraw*. Pierwsze na bazie pewnych reguł budują harmonogram i po jego otrzymaniu kończą swoje działanie. Algorytmy typu popraw startują już z pewnego harmonogramu i następnie w kolejnych iteracjach próbują go poprawić. Jest oczywiste, iż te ostatnie produkują harmonogramy o lepszej jakości - w sensie funkcji celu.

Jedną z podstawowych technik stosowanych przy konstrukcji algorytmów typu popraw polega na przeglądaniu tzw. *sąsiedztwa* pewnego bazowego rozwiązania w celu znalezienia rozwiązania o mniejszej wartości funkcji. Jeżeli takie rozwiązanie istnieje to algorytm traktuje je jako bazowe i kontynuuje proces poszukiwań. W przeciwnym wypadku algorytm kończy działanie. W etapie inicjacji algorytmu jako rozwiązanie bazowe przyjmuje się z reguły rozwiązanie otrzymane w wyniku działania wybranego algorytmu konstrukcyjnego.

Niestety w wielu wypadkach algorytmy tego typu bardzo szybko znajdują pewne minima lokalne i oczywiście w nich się zatrzymują. Im badany problem ma więcej minimów lokalnych tym częściej występuje to bardzo niekorzystne zdarzenie. Nie trzeba chyba dodawać, że właśnie problemy harmonogramowania produkcji charakteryzują się dużą liczbą minimów lokalnych. Dlatego też, aktualne badania skupiają się na takich technikach, które umożliwiają możliwie szybko i możliwie blisko zbliżyć się do minimów globalnych. Do podstawowych z nich należą: (i) techniki genetyczne, (ii) techniki symulowanego wyżarzania (simulated annealing) oraz (iii) techniki przeszukiwania z zabronionymi ruchami (tabu search). Wyniki dotychczas przeprowadzonych badań wskazują, że techniki (i) - (ii) wymagają bardzo dużych

nakładów obliczeniowych w celu znalezienia satysfakcjonujących rozwiązań. Aktualnie, na bazie literatury wydaje się, iż technika (iii), wstępnie zasugerowana przez Glovera w połowie lat osiemdziesiątych i następnie rozwinięta w pracach tego autora w latach 1989-1990, nie ma tej wady. Dlatego też przede wszystkim ona została wykorzystana do naszych badań.

Podstawowymi elementami techniki tabu search są:

- ruch,
- zbiór ruchów (sąsiedztwo),
- pamięć krótkoterminowa (lista tabu określająca ruchy zabronione),
- pamięć długoterminowa,
- funkcja aspiracji,
- strategia wyboru ruchu,
- warunki stopu.

Ruch jest definiowany jako zestaw czynności, które należy wykonać przy przejściu z jednego rozwiązania do drugiego. Następnie dla każdego rozwiązania określamy zbiór ruchów, który precyzuje jego sąsiedztwo. Po wybraniu najlepszego ruchu (i w konsekwencji najlepszego rozwiązania) ze zbioru ruchów dla danego rozwiązania bazowego, zapamiętuje się na *liście tabu* ruch odwrotny tzn. ruch transformujący rozwiązanie aktualnie wybrane do rozwiązania bazowego - jest to tzw. ruch zabroniony. Ruch ten pozostaje na liście tabu przez określoną liczbę iteracji algorytmu. Powoduje to, że analizowane następnie zbiory ruchów są pomniejszane o ruchy zabronione. Funkcja aspiracji zmniejsza restrykcyjne działanie zabronień dzieląc ruchy zabronione na tzw. ruchy korzystne oraz ruchy niekorzystne. W konsekwencji strategia wyboru ruchu na danej iteracji algorytmu polega na uwzględnianiu tylko ruchów niezabronionych oraz korzystnych ruchów zabronionych. Zastosowanie pamięci długoterminowej umożliwia skierowanie algorytmu, po wykonaniu określonej liczby kroków nie dostarczających lepszych rozwiązań, do obszarów dotychczas nie penetrowanych.

Opracowanie konkretnego algorytmu opartego na technice tabu search dla danego problemu szeregowania polega na precyzyjnym zdefiniowaniu wszystkich powyżej sformułowanych podstawowych elementów tej techniki. Dalej krótko omówimy, zaproponowane przez autorów niniejszej pracy, algorytmy dla kilku klasycznych problemów szeregowania zadań skupiając się przede wszystkim na prezentacji wyników badań testowych. We wszystkich algorytmach stosowano najbardziej popularną funkcję celu typu $C_{\max}$. Poprawa uszeregowania będzie mierzona przez 100% $(C_{\max}^L - C_{\max}^{TS}) / C_{\max}^L$, gdzie $C_{\max}^L$ jest wartością funkcji celu dla uszeregowania wygenerowanego przez pewien znany z literatury algorytm zaś $C_{\max}^{TS}$ przez proponowany algorytm typu tabu search.

3.1 Problem gniazdowy

W pracy [5], przedstawiono algorytm aproksymacyjny oparty na technice tabu search dla zagadnienia gniazdowego (job shop). W celu polepszenia własności algorytmu zastosowano pewną oryginalną pamięć długoterminową polegającą na zapamiętywaniu określonej liczby najlepszych rozwiązań wraz z odpowiadającymi im listami tabu oraz zbiorami ruchów pomniejszonych o ruchy już wykonane. Po wykonaniu pewnej liczby nieskutecznych iteracji (brak poprawy wartości funkcji celu) algorytm powraca do rozwiązań zapamiętanych w pamięci długoterminowej i rozpoczyna poszukiwania od nich.

Do testowania wybrano powszechnie stosowane w literaturze przykłady do tego typu problemów oraz zestaw przykładów generowanych losowo (jeżeli przykłady są znane, to w nawiasach podano autorów oraz rok ich opublikowania):

- (a) 43 przykłady (Fisher and Thompson, 1963; Adams, Balas and Zawack, 1988; Lawrence 1984); 36 - 215 operacji,

- (b) 80 przykładów (Taillard, 1993); 225 - 2 000 operacji,
- (c) 100 przykładów (losowanych); 2 500 - 10 000 operacji.

Wyniki testów na PC AT 386DX są następujące:

- (a) - Dla 45% przykładów znaleziono uszeregowania o mniejszej wartości funkcji celu niż znane w literaturze. Czas pracy algorytmu był 2 - 3 razy krótszy w porównaniu do innych algorytmów popraw do tego typu problemów.
 - W porównaniu do pracy Van Laarhoven, E.H.L. Aarts and J.K. Lenstra, "Job shop scheduling by simulated annealing", *Operations Research* 40, (1992), w której przedstawia się algorytm bazujący na technice symulowanego wyżarzania, czas jest 120 razy krótszy.
 - Znany przykład 10 zadań, 10 maszyn (Fisher and Thompson, 1963) rozwiązano w czasie 29 sekund.
- (b) Dla 40% przykładów znaleziono uszeregowania o mniejszej wartości funkcji celu w 10 - 20 razy krótszym czasie w porównaniu do najlepszego algorytmu tabu search z pracy E. Taillard, "Benchmarks for basic scheduling problems", *European Journal of Operational Research* 64, (1993).
- (c) Otrzymano 20% poprawę uszeregowania wygenerowanych przez algorytmy konstrukcyjne. Czas pracy algorytmu był rzędu kilku - kilkunastu minut.

Reasumując, algorytm z [5] jest aktualnie najlepszym algorytmem (czas obliczeń - jakość otrzymanego uszeregowania) znanym w literaturze dla tego typu zagadnień, patrz dodatkowo praca porównawcza R.J.M. Vaessens, E.H.L. Aarts, J.K. Lenstra.: Job Shop Scheduling by Local Search, *Memorandum COSOR 94-05*, Eindhoven, 1994, The Netherlands. Umożliwia on skuteczne rozwiązywanie przykładów o bardzo dużych rozmiarach (rzędu 10 000 operacji) przy użyciu komputerów osobistych.

3.2 Permutacyjny problem przepływowy

W pracy [6], przedstawiono algorytm aproksymacyjny oparty na technice tabu search dla permutacyjnego problemu przepływowego (permutation flow shop). W algorytmie tym wykorzystuje się pamięć długoterminową podobną jak w [5] oraz pewną, bardzo efektywną czasowo, technikę wyliczania wartości funkcji celu dla wszystkich uszeregowień z otoczenia uszeregowania bazowego. Technika ta wykorzystuje specyficzne własności problemu w powiązaniu z zaproponowanym zbiorem ruchów (sąsiedztwo uszeregowania bazowego).

Do testowania algorytmu użyto następujących przykładów:

- (a) 12 przykładów (Carlier 1986); 45 - 120 operacji,
- (b) 120 przykładów (Taillard, 1993); 100 - 10 000 operacji.

Wyniki testów na PC AT 486DX są następujące:

- (a) - Dla wszystkich przykładów znaleziono uszeregowanie optymalne w czasie kilkunastu sekund.
- (b) - Otrzymano 2% - 6% poprawę uszeregowania wygenerowanych przez najlepszy algorytm konstrukcyjny (algorytm Nawaz-Enscore-Ham),
 - Dla 40% przykładów znaleziono uszeregowania o mniejszej wartości funkcji celu w czasie 10 - 150 razy krótszym w porównaniu do najlepszego algorytmu tabu search z pracy E. Taillard, "Some efficient heuristic methods for flow shop sequencing", *European Journal of Operational Research* 47, (1990).

Podobnie jak w sekcji 3.1 algorytm z [6] jest aktualnie najlepszym algorytmem (czas obliczeń - jakość otrzymanego uszeregowania) znanym w literaturze dla permutacyjnego problemu przepływowego.

3.3 Problem przepływowy z maszynami równoległymi

W pracy [7], przedstawiono algorytm aproksymacyjny oparty na technice tabu search dla problemu przepływowego z maszynami równoległymi (flow shop with parallel machines). Problem ten jest bazowym problemem przy szeregowaniu elastycznej linii przepływowej. Ze względu na brak w literaturze odpowiednio dużych przykładów testowych, w testach skupiono się przede wszystkim na przykładach losowych.

Do testowania algorytmu użyto następujących przykładów:

- (a) 6 przykładów (Wittrock 1988); 30 - 50 zadań, 3 stanowiska, 2 - 3 maszyn w stanowisku,
- (b) 1200 przykładów losowych z różnymi zadaniami; 20 - 300 zadań, 2 - 10 stanowisk, 2 - 6 maszyn w stanowisku,
- (c) 600 przykładów losowych z grupami zadań podobnych; 10 - 20 grup zadań (łącznie 100 zadań), 5 - 10 zadań w grupie, 2 - 10 stanowisk, 2 - 6 maszyn w stanowisku.

Wyniki testów na PC AT 486DX są następujące:

- (a) W czasie 10 sekund znaleziono o 3.1% lepsze uszeregowania w porównaniu do powszechnie stosowanego algorytmu z pracy R. J. Wittrock, "An adaptable scheduling algorithm for flexible flow lines", *Operations Research* 36, 1988.
- (b) - Otrzymano 2% - 14% poprawę uszeregowania wygenerowanych przez najlepsze algorytmy konstrukcyjne do tego typu problemów: (i) F. Y. Ding, D. Kittichartphayak, "Heuristics for scheduling flexible flow lines", *Computers Industrial Engineering* 26, 1994, (ii) J.L. Hunsucker, J.R. Shah, "Comparative performance analysis of priority rules in a constrained flow shop with multiple processors environment", *European Journal of Operational Research* 72, 1994, (iii) T. Sawik, "A scheduling algorithm for flexible flow lines with limited intermediated buffers", *Applied Stochastic Models and Data Analysis* 9, 1993, (iv) R. J. Wittrock, "An adaptable scheduling algorithm for flexible flow lines", *Operations Research* 36, 1988. Czas pracy algorytmu wahał się od 2 sekund do 5 minut.
- (c) - Do porównania wykorzystano algorytmy opisane w (b). Otrzymano 2% - 12% poprawę uszeregowania w czasie od 7 do 49 sekund..

Prezentowane wyniki badań sugerują, że badany algorytm typu tabu search istotnie poprawia uszeregowania wygenerowane przez inne algorytmy w czasie akceptowalnym przez praktyków.

3.4 Inne problemy

W pracy [3] przedstawiono szybki algorytm aproksymacyjny oparty też na technice tabu search, dla problemu szeregowania zadań produkcyjnych w otwartym systemie obsługi (open shop problem) z kryterium będącym czasem wykonania wszystkich zadań. Praca ta jest pierwszą próbą zastosowania techniki tabu do tego typu problemów. Bazując na tzw. blokach maszynowych i blokach zadaniowych, wykazuje się pewne własności eliminujące z przeszukiwań harmonogramy nieefektywne. Następnie wykorzystując te własności, podaje się oryginalną definicję otoczenia harmonogramu o stosunkowo niewielkiej liczności. Wykorzystanie tego otoczenia, znacznie przyspiesza proces poszukiwań w skonstruowanym dalej algorytmie. Otrzymany algorytm został przetestowany na szeregu problemach testowych wziętych z literatury i powszechnie stosowanych do testowania nowych algorytmów dla badanego problemu. Wyniki badań numerycznych wskazują, że proponowany algorytm charakteryzuje się krótkim czasem obliczeń, produkując jednocześnie harmonogramy bliskie lub równe optymalnym. Co więcej wyniki badań wskazują, że przedstawiany algorytm ma znacznie korzystniejsze cechy obliczeniowe niż aktualnie znane w literaturze algorytmy dla badanego problemu.

W pracy [10] rozważany jest jednomaszynowy problem szeregowania z niezerowymi terminami gotowości, terminami dostarczenia oraz kryterium minimalizacji maksymalnego terminu zakończenia wykonywania zadań. Istotność tego problemu wynika z faktu, że jest on relaksacją szeregu praktycznych problemów harmonogramowania produkcji. Do jego rozwiązania zaproponowano algorytm oparty na technice tabu search. Wykorzystując specyfikę zagadnienia przedstawiono oryginalną definicję sąsiedztwa oraz funkcji aspiracji. W wyniku znacznej redukcji wielkości klasycznych sąsiedztw, algorytm działa znacznie szybciej niż aktualnie stosowane algorytmy do tego problemu - zachowując pożądaną dokładność. Wyniki analizy eksperymentalnej przeprowadzone na przykładach o rozmiarze tysiąca zadań w całej rozciągłości potwierdziły wspomnianą wyżej cechę.

W związku z realizacją projektu opracowano także nowy algorytm typu konstrukcyjnego dla szeregowania zadań w pojedynczym gnieździe produkcyjnym, posiadający wskaźnik dokładności dla najgorszego przypadku $3/2$ oraz złożoność obliczeniową $O(n \log n)$, [4]. Algorytm ten, przy zachowaniu takiej samej dokładności, posiada n -krotnie mniejszą złożoność obliczeniową (n - liczba zadań) niż inne znane z literatury algorytmy.

Wykaz ważniejszych prac wykonanych w ramach projektu

1. Adrański A., Grabowski J., Wodecki M.: Optymalizacja pracy elastycznego centrum obróbczego tokarsko-frezarskiego, *Matematyka Stosowana XXXVII*, (1994), 15-37.
2. Nowicki E.: An approximation algorithm for a single-machine scheduling problem with release times, delivery times and controllable processing times, *European J. Oper. Res.* 72 (1994) 74-81.
3. Nowicki E.: Zastosowanie techniki tabu search do problemów szeregowania w otwartych systemach obsługi, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Automatyka* z. 114 (1994), 211-220.
4. Nowicki E., Smutnicki C.: An approximation algorithm for a single-machine scheduling problem with release times and delivery times, *Discrete Applied Mathematics* 48, (1994), 69-79.
5. Nowicki E., Smutnicki C.: A fast tabu search algorithm for the job shop problem, *Management Science*, 1995 (w druku).
6. Nowicki E., Smutnicki C.: A fast tabu search algorithm for the permutation flow problem, *European J. Oper. Res.*, 1995 (w druku).
7. Nowicki E., Smutnicki C.: Flow shop with parallel machines. A tabu search approach, *Raport 30/95 Instytut Cybernetyki Technicznej, Politechnika Wrocławska*, 1995 (praca wstępnie zaakceptowana do specjalnego wydania *European Journal of Operational Research* poświęconego technice tabu search).
8. Nowicki E., Zdrzałka S.: A bicriterion approach to preemptive scheduling of parallel machines with controllable job processing times, *Discrete Applied Mathematics*, 1995 (w druku)

9. Nowicki E., Zdrzałka S.: "Single machine scheduling with major and minor setup times: Tabu search approach", *Raport 68/94, Instytut Cybernetyki Technicznej, Politechnika Wrocławska*, 1994.
10. Smutnicki C.: Algorytm Tabu Search dla pewnej klasy problemów szeregowania na jednej maszynie, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria: Automatyka* z. 114, (1994) 259-266.
11. Zdrzałka S.: Analysis of approximation algorithms for single-machine sequencing with delivery times and sequence independent batch setup times, *European J. Oper. Res.* 80 (1995) 371-380.
12. Zdrzałka S.: A sequencing problem with family setup times, *Discrete Applied Mathematics*, 1995, (zaakceptowano do publikacji).
13. Zdrzałka S.: Preemptive scheduling with release dates, delivery times and sequence independent setup times, *European J. Oper. Res.* 76 (1994) 60-71.
14. Zdrzałka S.: Two-machine flow shop scheduling problem with family setup times, *Instytut Cybernetyki Technicznej, Politechnika Wrocławska, Raport serii: Preprinty nr 16/95*.