

Paweł Hoser¹✉, Luiza Ochnio²

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Komputerowe wspomaganie układania planu zajęć oparte na wybranych metodach heurystycznych

Computer-aided class timetable planning based on selected heuristic methods

Synopsis. Optymalizacja planu zajęć na wyższej uczelni ma ogromne znaczenie, od tego bowiem zależy komfort pracy wykładowców i studentów, oszczędność czasu, a to wszystko znacząco przekłada się na efekty kształcenia. W obecnych czasach do takich zadań wykorzystuje się coraz szybsze komputery i coraz lepsze techniki obliczeniowe. Jednak skuteczna optymalizacja planu zajęć jest niezwykle złożonym zadaniem, zbadanie wszystkich możliwości jest absolutnie niewykonalne w tej sytuacji. W takich sytuacjach często wykorzystuje się różne metody heurystyczne. Różni autorzy wciąż poszukują algorytmów, których zastosowanie przynajmniej częściowo zautomatyzowałoby proces układania zajęć przy założeniu wielu kryteriów i ograniczeń. Celem pracy jest opracowanie modelu komputerowego wspomaganie układania planu zajęć opartego na metodach heurystycznych. Proponowane algorytmy automatycznej optymalizacji planu zajęć wykorzystują system wieloagentowy oraz metaheurystykę symulowanego wyżarzania. Planowane jest także użycie algorytmów ewolucyjnych i grawitacyjnych.

Słowa kluczowe: układanie planu zajęć, metody heurystyczne, optymalizacja, sztuczna inteligencja

Abstract: Optimizing class schedules at a university is of great importance for the well-being of lecturers and students, as well as generating time savings; all these factors significantly influence the effects of education. Nowadays, faster, more powerful computers and better computing techniques are used for such tasks. On the other hand, effective optimization of the schedule is an extremely complex task; exploring all possibilities is absolutely impossible in this situation. Various heuristic methods are often used in such situations. The subject of the work is computer-aided timetable planning. Some authors are still looking for algorithms in which the application

¹✉ Paweł Hoser – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie; Katedra Sztucznej Inteligencji; Instytut Informatyki Technicznej SGGW; e mail: pawel_hoser@sggw.edu.pl; <https://orcid.org/0000-0003-4409-8989>

² Luiza Ochnio – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie; Katedra Logistyki; Instytut Ekonomii i Finansów; e mail: luiza_ochnio@sggw.edu.pl; <https://orcid.org/0000-0001-8875-7945>

would at least partially automate the process of arranging classes, assuming many criteria and constraints. The aim of the paper is the creation of computer-aided scheduling based on heuristic methods. The proposed algorithms for automatic schedule optimization use a multi-agent system and simulate annealing metaheuristics. The use of evolutionary and gravity algorithms is also planned.

Key words: Scheduling, heuristic methods, optimization, artificial intelligence

Kody JEL: O14, C88

Wstęp

Na wyższej uczelni dobrze ułożony plan zajęć jest bezcenny, dzięki temu osoby prowadzące i studenci nie mają niepotrzebnych przerw, mogą przyjeżdżać na uczelnie w czasie, kiedy jest to dla nich najdogodniejsze, dzięki temu łatwiej uniknąć kolizji z innymi zajęciami i obowiązkami. Dobrze ułożenie planu przekłada się na komfort pracy i na jakość kształcenia. W przypadku pracowników naukowo-dydaktycznych, wpływa to także pozytywnie na osiągnięcia naukowe. Optymalizację planu zajęć trudno nawet przecenić. Jest też rzeczą jasną, że w obecnych czasach do takich zadań używamy komputerów. Stale rosnące moce i zasoby komputerów stwarzają coraz większe możliwości, ale też i rosną stale oczekiwania. Jednak, optymalizacja planu zajęć jest niezwykle złożonym zadaniem. Należy też dodać, że plan zajęć na uczelni wyższej wiąże się z całą masą różnych ograniczeń, co dodatkowo utrudnia proces tworzenia dobrego planu. Nawet przy użyciu komputerów o znacznej mocy obliczeniowej, czyli obecnie o wartości minimum 2,35 PFLOPS, nie mamy żadnych szans, żeby sprawdzić wszystkie możliwe konfiguracje planu. Złożoność tego zagadnienia obecnie zdecydowanie przekracza nasze możliwości i tak też będzie jeszcze bardzo długo. W takich przypadkach, jak zwykle, pozostaje stosowanie różnych metod heurystycznych. Metody heurystyczne są ważnym obszarem badań, bardzo ściśle związanym z tematyką sztucznej inteligencji. W przypadku optymalizacji planów zajęć i podobnych problemów, bardzo często próbuje się stosować metody ewolucyjne. W celu optymalizacji zadań logistycznych bardzo często korzysta się z różnego rodzaju algorytmów heurystycznych w tym ewolucyjnych. Przykładami zastosowań takich rozwiązań są prace Ghomi i innych [2018] którzy stosowali algorytmy genetyczne do planowania i optymalizacji procesów logistycznych, podobnie prace nad harmonogramem prac remontowych sieci drogowej oraz logistyki pomocy rozwiązywane za pomocą algorytmów ewolucyjnych [Li i Teo 2018], czy też opracowanie Said i El-Rayes [2014] dotyczące wspomaganie planowania logistycznego. W swoim artykule na temat rozwiązania problemu wysyłek, dostaw i logistyki i zapasów Lin i inni [2009] sformułowali zintegrowany wieloetapowy model sieci logistycznej, skutecznie stosując hybrydowy algorytm ewolucyjny (hEA). Powszechna jest też wielokryterialna optymalizacja procesów w transporcie [Sawicki 2013, Pečený i in. 2020] również z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. W szczególności zastosowanie mają tu także systemy wieloagentowe np. do modelowania systemów logistyki serwisowej [Feliks i in. 2015], kształtowania sieci intermodalnej [Mindur i in. 2011] czy modelowania podaży transportu publicznego [Fierek 2015]. Zoptymalizowane planowanie jest problemem logistycznym, z którym zmagają

się wielu praktyków oraz teoretyków. Jednym z takich wielokryterialnych zadań logistycznych jest układanie planu zajęć na uczelni wyższej, w taki sposób by odpowiadał zarówno studentom, jak i wykładowcom oraz w sposób optymalny wykorzystywał zasoby jednostki. Podjętym przez autorów problemem badawczym jest wyszukanie metod odpowiedniego zautomatyzowania układania planu, tak by był jak najbardziej optymalny przy tak wielu kryteriach i ograniczeniach. Autorzy przyjęli tezę, że cel ten można zrealizować przy pomocy algorytmów heurystycznych, np. systemów wieloagentowych.

W przypadku metody heurystycznej nie oczekuje się, że działający system znajdzie sytuację optymalną, nawet nie oczekuje się, że będzie dostępna jakakolwiek wiedza na temat procesu znajdowania najlepszej sytuacji. Często wówczas poszukujemy tylko rozwiązania zadawalającego lub tylko akceptowalnego. Metoda heurystyczna pozwala także na poszukiwanie rozwiązania opartego na wiedzy niepełnej i niepewnej. Zaproponowane w tej pracy rozwiązanie częściowej optymalizacji planu zajęć spełnia właśnie dokładnie cechy metod heurystycznych. Swoje propozycje zastosowań różnych metod i różne podejścia do układania planu publikowało wielu autorów, m.in. Moszyński [2011], Reklaitis [2000], Alghamdi i inni [2020], Deris i inni [2000], podkreślając wyjątkową złożoność i trudność w jednoznacznym rozwiązaniu tego wielokryterialnego problemu. Wielu autorów zwraca uwagę na możliwość wykorzystania algorytmów ewolucyjnych (w tym genetycznych) w tego typu problemie, w szczególności w układaniu planów zajęć dydaktycznych na uczelni [Deris i in. 1999, Konstantinov i Coakley 2004, Suryadi i Pilipus 2012, Narang i in. 2013, Mittal i in. 2015, Soyemi i in. 2017, Kakkar i in. 2021]. Autorzy skupili się na możliwości wykorzystania swoistego rodzaju algorytmów do zaimplementowania własnej aplikacji służącej do wygodnego i efektywnego układania planu zajęć. Podczas poszukiwania inteligentnych metod automatycznego układania planu zdecydowano się na zastosowanie systemów wieloagentowych. Pomysł ten narodził się właśnie podczas układania rzeczywistych planów zajęć. Trzeba podkreślić, że zwykle się staramy, aby nasze plany zajęć były jak najlepsze dla wszystkich zainteresowanych osób. Podczas tworzenia planów bardzo często studenci i osoby prowadzące przychodzą do planistów z prośbami i różnymi sugestiami. Okazało się, że osoby zainteresowane potrafiły bardzo skutecznie zoptymalizować pewne części planu, pod warunkiem, że dobrze poznały inne ograniczenia związane z tą częścią planu. Co więcej, zauważono też, że dzięki temu cały plan był też stopniowo coraz lepiej zoptymalizowany pod wieloma względami. Tak więc, tego typu współpraca okazała się korzystna. Rozwijając dalej tego typu ideę, należy uwzględnić sytuacje, w których jedne grupy osób zainteresowanych stają w konflikcie z innymi podczas proponowanych zmian w planie. Wtedy należy rozwiązywać te konflikty najlepiej od razu przy uwzględnieniu optymalizacji całego planu. Jest więc jasne, że tego typu strategię powinny się znaleźć także w metodach komputerowego wspomaganie układania planu zajęć. To właśnie skłoniło nas do próby zastosowania systemów wieloagentowych. Komputerowa symulacja takich działań dokładnie przypomina działania systemu wieloagentowego [Netczuk i in. 2015]. Uznano, że w przypadku optymalizacji planu zajęć każdy agent powinien reprezentować pewną grupę osób zainteresowanych. W tym przypadku ustalono, że każda grupa laboratoryjna studentów ma być reprezentowana przez jednego agenta oraz każda osoba prowadząca też ma być reprezentowana przez jednego agenta. Dodatkowo przyjęto, że w tym systemie mają się znajdować jeszcze inni agenci – są to agenci roczników, agent sal i agent główny całego planu. W efekcie ma to być

system wieloagentowy częściowo zcentralizowany. Oprócz tego zastosowano jeszcze pewne metody mocno przypominające metaheurystykę symulowanego wyżarzania. Planowane jest też użycie algorytmów ewolucyjnych, grawitacyjnych i algorytmu świetlika. Nowe podejście do automatycznej optymalizacji planu było testowane na rzeczywistych planach zajęć, ale na razie w bardzo ograniczonym zakresie. W tym czasie uważa się, że automatyczna optymalizacja planu powinna być uruchamiana tylko po wstępnym ułożeniu planu przez planistę, ale też jeszcze przed realizacją specyficznych próśb i żądań osób zainteresowanych. Uważa się tak, ponieważ zakładamy, że po zrealizowaniu próśb i żądań osób zainteresowanych już nie można zmieniać planu. Za to uruchamianie tego systemu wspomagania na samym początku powodowałoby zbyt długie jego działanie i system ten i tak nie zastąpiłby (przy obecnych możliwościach sztucznej inteligencji) intuicji, wyobraźni i myślenia twórczego człowieka. Ponadto, zakłada się, że na samym starcie system wspomagający powinien już dostać plan w wersji bezkolizyjnej. Kolejne modyfikacje zaproponowanych algorytmów mogą spowodować, że automatyczne wspomaganie optymalizacji może być skuteczniejsze, a wtedy będzie można z takiego systemu korzystać w znacznie szerszym zakresie.

Materiał i metody

Dane potrzebne do zbudowania planu, ograniczenia, związki, zależności oraz zasady unikania kolizji budowano na podstawie tworzenia planu zajęć na Wydziale Zastosowań Informatyki i Matematyki SGGW. Projekt narzędzia do automatycznego układania planu testowano podczas kilku semestrów trwania zajęć, w rezultacie tworząc nowy program komputerowy do układania planu. Pomysłem na udoskonalenie i optymalizację tego procesu jest wykorzystanie systemów wieloagentowych, których zasadę działania opisano [Piotr 2019]. Rozważana metoda modelu scentralizowanego składającego się z wielu agentów należy do metod heurystycznych, rozproszonych w obszarze działania sztucznej inteligencji. Do wspomagania planowania zaproponowano metodę metaheurystyki symulowanego wyżarzania jako algorytmu heurystycznego przeszukującego przestrzeń dopuszczalnych rozwiązań problemu w celu wyszukania najlepszych rozwiązań danego problemu [Wooldridge 2009].

Struktury danych planu zajęć

Celem tworzonego algorytmu jest znalezienie jak najlepszego planu zajęć, czyli jak najlepszej konfiguracji zajęć dydaktycznych. Jak zawsze, w takich i podobnych zagadnieniach, każda taka konfiguracja jest definiowana poprzez odpowiedni zestaw parametrów. Matematycznie rzecz ujmując, zakłada się, że każda konkretna postać planu należy do pewnej przestrzeni wszystkich planów. Jest to więc zagadnienie przeszukiwania przestrzeni stanów. Trzeba też uwzględnić, że dane dotyczące planów zajęć są powiązane z innymi ważnymi danymi dotyczącymi pracy na wyższej uczelni. W przypadku planów w uczelni SGGW zakłada się, że system układania planów powinien być ściśle powiązany z systemem pensum oraz z systemem e-HMS służącym do organizacji pracy dziekanatu. W systemie pensum znajdują się informacje o obciążeniach osób

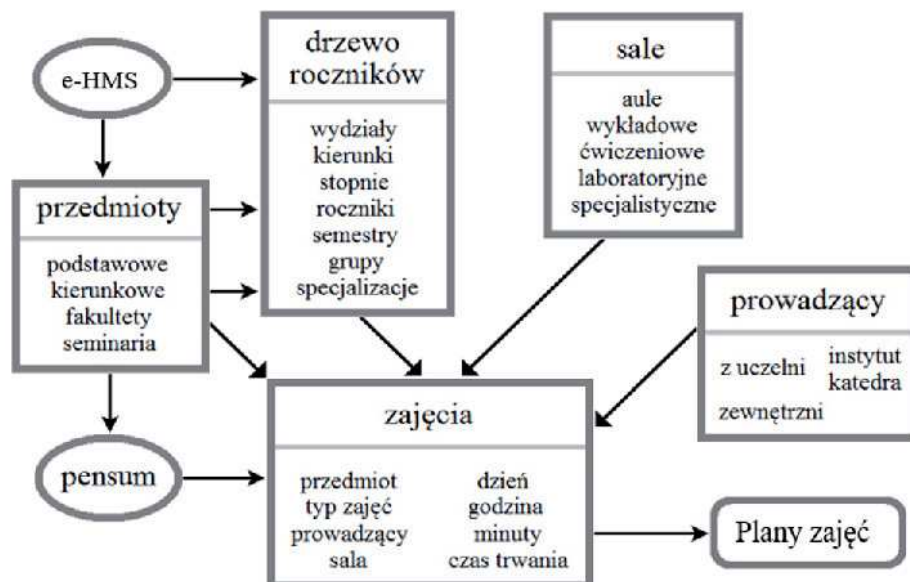
prowadzących zajęcia. A więc są to ilości godzin zajęć w semestrze z uwzględnieniem przedmiotów i typów zajęć. W systemie pensum znajdują się tak zwane plany pensum i sprawozdania pensum.

Zakłada się, że podczas planowania zajęć na początku semestru, plany zajęć powinny być jak najbardziej zgodne z planami pensum, a po zakończeniu semestru, informacje z planu zajęć powinny trafiać do sprawozdań pensum. W systemie e- HMS znajdują się, między innymi, wszystkie dane na temat programów studiów, przedmiotów, ilości grup na każdym roczniku oraz specjalizacji. Wszystkie te dane powinny być ustawione w specjalnej drzewiastej strukturze. W przypadku zajęć dydaktycznych cała uczelnia jest podzielona na wydziały, wydziały są podzielone na kierunki, kierunki są podzielone na stopnie, na każdym stopniu są roczniki i semestry. Bardzo ważną rzeczą są programy studiów, które nie mogą się zmieniać podczas studiowania dla danego rocznika. Nawet na tym samym kierunku studiów, różne roczniki mogą mieć inne programy studiów, ponieważ programy studiów się czasami zmieniają z roku na rok. Program studiów definiuje, jakie przedmioty muszą być przyporządkowane do danego rocznika studiów. Dotyczy to również każdej wybranej specjalizacji, która ma swoje przedmioty kierunkowe. Do tego należy jeszcze uwzględnić wszystkie fakultety, które są wybierane przez studentów. Jeśli uwzględnimy, że w systemie e-HMS znajdują się także informacje o liczbach grup i ich specjalizacjach, to z tego wszystkiego wynika jakie zajęcia trzeba umieścić w planie. Warto jeszcze dodać, że liczby grup są często trudno przewidywalne, zależy to bowiem od tego, ilu studentów przejdzie na następny rok lub od tego, ilu studentów wydział przyjmie w procesie rekrutacji. Specjalizacje też są wybierane przez studentów i to nawet czasem w ostatniej chwili na niektórych rocznikach, a od tego zależy zestaw przedmiotów kierunkowych. Warto jeszcze zaznaczyć, że jeśli różne specjalizacje mają te same przedmioty kierunkowe, to ich wykłady muszą być planowane wspólnie. Wszystko to musi być uwzględnione w programie do planowania zajęć. Dodatkowo jeszcze potrzebne są dwie proste struktury danych, dotyczące sal i osób prowadzących. Sale znajdujące się na uczelni są różnego typu, są to sale wykładowe, ćwiczeniowe, laboratoryjne i specjalistyczne. Sale wykładowe i ćwiczeniowe mają różne pojemności. Oczywiście typ przydzielanej sali musi odpowiadać prowadzonym zajęciom ze względu na zainstalowane oprogramowanie. W przypadku sal specjalistycznych, gdzie znajduje się cenny sprzęt, dostęp powinien być odpowiednio ograniczony. Nawet niektóre zajęcia mogą się odbywać tylko w jednej sali w skali całej uczelni. Oczywiście dane na temat osób prowadzących też są konieczne i te dane trzeba stale aktualizować.

W przypadku systemu pensum przydziały zajęć osobom prowadzącym odbywają się w pewien specjalnie sformalizowany sposób. Cała uczelnia jest podzielona na wydziały i jednocześnie na instytuty. Osoby prowadzące są pracownikami instytutów (a nie wydziałów). Wydziały zlecają prowadzenie zajęć instytutom. Wewnątrz każdego instytutu, wice-dyrektor przydziela zajęcia wybranej katedrze, a wewnątrz katedry zajęcia przydziela kierownik katedry wybranym osobom. W przyszłości, ten system ma być w pełni elektronicznie zautomatyzowany. Tak więc zmiana osób prowadzących zajęcia nie musi być prosta. System planowania będzie musiał współpracować z systemem pensum.

Jeśli więc program do układania planu zajęć ma współpracować z innymi systemami, to cała struktura danych w programie powinna być dobrze dostosowana do takiej współpracy. W programie do planowania zajęć zdefiniowano pięć struktur danych, są to:

„drzewo roczników”, „przedmioty”, „osoby prowadzące”, „sale” i „zajęcia”. Naturalnie struktury te są powiązane różnymi zależnościami i relacjami, co przedstawiono schematycznie na rysunku 1.



Rysunek 1. Struktury danych i ich relacje w programie do planowania zajęć

Figure 1. Data structures and their relations in the class planning program

Źródło: opracowanie własne.

Pierwsze cztery struktury są fundamentalne dla całego planu, dodatkowo mają umożliwiać wygodną współpracę z innymi systemami, a także są konieczne do różnego rodzaju wizualizacji planu i eksportu danych. Z tych struktur wynika, jakie zajęcia są do ułożenia w planie, wraz z osobami prowadzącymi. Z kolei samo ułożenie konkretnego planu znajduje się w strukturze „zajęcia”, w pozostałych strukturach są tylko dane zajęć do ułożenia, ale zajmują dużo więcej miejsca w pamięci. W strukturze „zajęcia” znajdują się poszczególne zajęcia, każde z nich ma numery grup studentów (lub grupy fakultetu), numer przedmiotu, typ zajęć, numer osoby prowadzącej, numer sali, czas zajęć (w tym jest dzień, godzina, minuty i czas trwania zajęć). A więc w tej sytuacji układanie planu polega na przyporządkowaniu tych liczb do każdego zajęcia. A wszystkie zajęcia do ułożenia w planie już powinny być wygenerowane na podstawie pozostałych struktur danych.

Dla oczywistej wygody w programie komputerowym wszystkie grupy studentów są indeksowane jednym parametrem całkowitym. Oczywiście, w strukturze roczników są zapisane te wszystkie indeksy, każdy rocznik ma indeksy swoich grup i numery ich specjalizacji. Podobnie wszystkie czasy rozpoczynania się zajęć są reprezentowane jednym parametrem całkowitym, jest to liczba kwadransów od początku tygodnia. W naszych planach przyjmuje się, że czas może być skwantowany do przedziałów 15 min. Przy czym pomijamy czas nocny, kiedy to zajęcia się nie odbywają. Zakłada się, że teoretycznie najpóźniejsza pora, kiedy zajęcia mogą się rozpocząć to godzina 21:00, mimo tego że zgodnie z regulaminem studiów zajęcia mogą trwać co najwyżej do godziny 20:00. Należy tu wyraźnie rozróżnić zakresy parametrów w systemie komputerowym od zakre-

sów podawanych przez regulamin studiów. Podczas procesu automatycznej optymalizacji, algorytm może działać na szerszych zakresach, a na końcu dopiero plan powinien być ułożony zgodnie ze wszystkimi zarządzeniami.

Elementarne składniki opisanych tu struktur danych, to:

- przedmiot \sim (nazwa, rocznik, liczba godzin, typy sal) = (nz, r, gw, gc, gl, ts) .
- grupa \sim (numer grupy, specjalizacja) = (ng, sp) .
- sala \sim (numer sali, numer budynku, typ sali, pojemność) = (ns, nb, ts, v) .
- prowadzący \sim (numer prowadzącego, ograniczenia, preferencje) = (np, gr, pf) .
- zajęcie \sim (numer grupy, numer przedmiotu, typ zajęć, numer prowadzącego, numer sali, czas, długość) = (g, pd, tz, pr, s, t, d) .

Liczba godzin w przedmiocie oznaczają kolejno: gw – liczba godzin wykładów, gc – liczba godzin ćwiczeń, gl – liczba godzin laboratoriów w semestrze. Typy sal (ts) oznaczają typy sal potrzebne do zajęć laboratoryjnych tego przedmiotu. Typ zajęć w grupie (tz) oznacza informację, czy zajęcia są wykładami, ćwiczeniami, laboratoriami, seminariami czy fakultetami. W tej sytuacji układanie planu zajęć polega tylko na ustaleniu wybranych parametrów zajęć. W procesie układania szkieletu planu ustalamy cztery ostatnie parametry każdego zajęcia, czyli prowadzącego, salę, czas i długość zajęć, grupa i przedmiot natomiast jest już z góry zadana. W praktyce głównie ustala się salę i czas zajęć, osoba prowadząca jest już często z góry narzucona, a długość zajęć wynika z liczby godzin w semestrze (parametr przedmiotu) i z liczby zajęć w semestrze (zwykle 15). Wyjątkiem są sytuacje, kiedy zajęcia są rozbijane na kilka mniejszych w ciągu jednego tygodnia, czasem tak bywa – choć rzadko.

Warto zwrócić uwagę na jeszcze jeden istotny fakt, w tej sytuacji wszystkie zajęcia $\{z_k\}$ mogą być zapisane w dowolnej kolejności w całej strukturze zajęć w pamięci komputera. W rzeczywistości są zapisane w takiej kolejności, w jakiej były generowane w procesie ustalania, które zajęcia trzeba ułożyć w planie. Generowane są zgodnie ze strukturą drzewa roczników, każdy rocznik ma swoje przedmioty (na danym semestrze), a każdy przedmiot definiuje swoje zajęcia do ułożenia w planie w zależności od liczby grup na roczniku i wybranych specjalizacji w przypadku przedmiotu kierunkowego. Dla dalszych rozważań, wygodnie jest także określić podzbiory zajęć dla każdej grupy, każdego prowadzącego i dla każdej sali. Podzbiory zajęć będą przydatne później do definicji funkcji celu w procesie optymalizacji planu. Zbiory te nie są rozłączne.

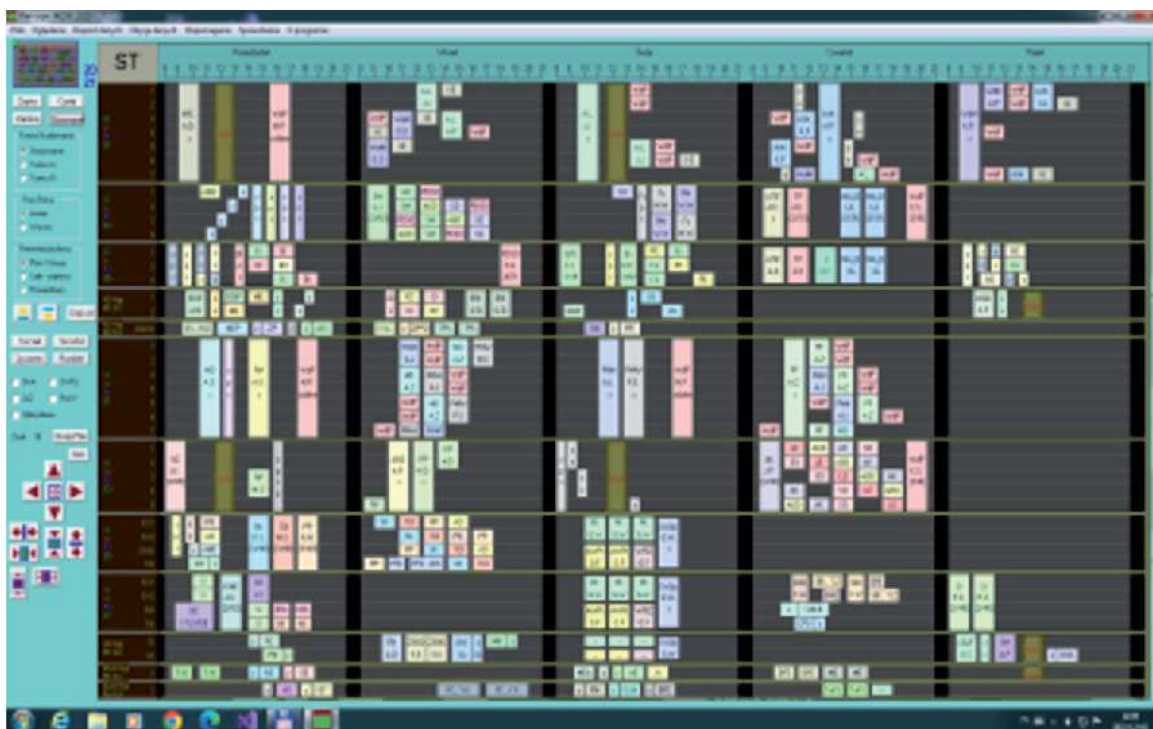
$$\begin{aligned}
 \text{Zajęcia } i\text{-tej grupy : } & G_i &= \{ z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{in} \} \\
 j\text{-tego prowadzącego : } & P_j &= \{ z_{j1}, z_{j2}, \dots, z_{jm} \} \\
 \text{Zajęcia } k\text{-tej sali : } & S_k &= \{ z_{k1}, z_{k2}, \dots, z_{kr} \}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Zakładamy że zajęcia są równomiernie rozłożone w ciągu całego semestru, tak więc w każdym tygodniu mamy taką samą liczbę zajęć dla każdego przedmiotu. Zakładamy, że teoretycznie zajęcia są tak samo ułożone w każdym tygodniu, więc układanie planu dotyczy jednego tygodnia. Optymalizacja więc dotyczy tylko planu tygodniowego, co jest i tak już niezwykle złożonym zadaniem. Optymalizacja zajęć w całym semestrze jest

znacznie bardziej złożona. W przypadku zajęć częściowo blokowanych w ciągu całego semestru, przyjmuje się, że te zajęcia są po prostu trochę dłuższe czasowo, a plan zajęć, przede wszystkim, dotyczy okresu, kiedy wszystkie zajęcia odbywają w ciągu tygodnia.

Komputerowy program do układania planu zajęć

Do układania planu zajęć na naszym wydziale stworzono specjalny program komputerowy. Z tego względu, że planiści są jednocześnie programistami tworzącymi swoje własne narzędzie, udało się stworzyć bardzo wygodne narzędzie do układania i optymalizacji planów zajęć. Program ma specjalny wygodny interfejs do ręcznego układania planu. Układany plan zajęć jest widoczny w oknie użytkownika programu. Układane zajęcia można przedstawiać przy użyciu myszki lub klawiatury. Zdaniem autorów, najistotniejsze jest to, że w oknie widzimy tylko jedną oś czasową zorientowaną poziomo i wszystkie grupy studenckie każdego rocznika są rozłożone wzdłuż osi pionowej. Dzięki temu planista dużo lepiej widzi wszystkie potencjalne kolizje w planie podczas planowania nowych konfiguracji planu. Zamiast grup rozłożonych pionowo, można też widzieć plan w postaci zajętość sal, wtedy to sale są rozłożone wzdłuż osi pionowej. To samo dotyczy osób prowadzących, osoby te też mogą być ustawione wzdłuż osi pionowej i wtedy widać w osobnych wierszach ich zajęcia.



Rysunek 2. Interfejs graficzny programu do układania planu zajęć na Wydziale Zastosowań Informatyki i Matematyki SGGW

Figure 2. Graphical interface of the program for arranging the schedule of classes at the Faculty of Applied Informatics and Mathematics SGGW – WULS

Źródło: opracowanie własne.

Dzięki temu planista doskonale widzi rozkład zajętości sal lub zajęć dla prowadzących. Obraz planu można powiększać i pomniejszać, zarówno względem czasu (poziomo), jak i względem wysokości grup (pionowo) lub sal czy prowadzących w innej opcji widoku. W maksymalnym pomniejszeniu planista może zobaczyć cały plan zajęć na jednym obrazie, nie widząc przy tym wielu szczegółów. Taka możliwość jest bardzo korzystna podczas planowania nowych konfiguracji. W maksymalnym powiększeniu planista widzi tylko mały fragment planu, ale za to widząc dobrze wszystkie szczegóły. Tradycyjny widok planu zajęć, gdzie widać dni tygodnia równoległe obok siebie, jest bardzo niepraktyczny dla planisty, bowiem nie widać wtedy potencjalnych kolizji ani rozłożenia ilości zajęć i zajętości sal. Dodatkowo przy dowolnym powiększeniu użytkownik programu może, używając prawego klawisza myszki, wyświetlić wszystkie dokładne dane na temat każdego zajęcia. Widok interfejsu graficznego programu jest przedstawiony na rysunku 2.

Dzięki wygodnemu narzędziu planista potrafi bardzo wydajnie optymalizować plany zajęć – układając je ręcznie. Nie mniej jednak układanie planu zajęć jest i tak bardzo czasochłonnym zajęciem. Więc oczywiście stworzenie automatycznego wspomaganie procesu planowania może być bardzo pomocne. Postanowiono więc zaimplementować do programu algorytmy wspomagające układanie oparte na metodach heurystycznych. Na razie podjęte próby są jeszcze w fazie eksperymentalnej. Testowany algorytm wspomaganie planowania jest głównie oparty na zastosowaniu systemu wieloagentowego i meta-heurystyki symulowanego wyżarzania.

Systemy wieloagentowe

Systemy wieloagentowe są bardzo obiecującym obszarem badań w dziedzinie sztucznej inteligencji. System wieloagentowy to system złożony, zdecentralizowany, rozproszony, zbudowany z wielu agentów działających zwykle autonomicznie. Każdy agent działa w pewnym obszarze środowiska, pobiera dane i wykonuje pewne akcje oraz komunikuje się z innymi agentami. W dziedzinie informatyki agent może być rozumiany jako pewien program lub podprogram komputerowy [Biernacki 2005]. Teoretycznie, agentem może być też jakieś urządzenie, robot, owad, zwierzę lub nawet człowiek działający w większej populacji. Okazuje się, że systemy komputerowe oparte na modelu wieloagentowym mają ogromne możliwości. Zdaniem autorów [Wooldrige 2002, Piotr 2019], być może jest to nawet najlepszy sposób na stworzenie naprawdę inteligentnych systemów w przyszłości. Warto też zauważyć, że jest to bardzo szerokie i istotne pojęcie. Otóż wiele bardzo znanych i skutecznych narzędzi sztucznej inteligencji, to właśnie szczególne przypadki systemów wieloagentowych. I tak na przykład sieci neuronowe, automaty komórkowe, algorytmy mrówkowe, grawitacyjne, świetlika, inteligencji roju, czy nawet algorytmy ewolucyjne, są szczególnymi przypadkami systemów wieloagentowych. Agentem może być neuron w sieci neuronowej lub grupa neuronów, komórka w automacie komórkowym lub grupa komórek, wirtualna mrówka, wirtualny świetlik, wirtualny obiekt w algorytmie grawitacyjnym, osobnik w algorytmie ewolucyjnym, czy jakiś inny obiekt w systemie złożonym rozproszonym. Systemy wieloagentowe są zwykle stosowane w przypadkach, gdy rozwiązywany problem ma ogromną złożoność i charakter rozproszony. Bardzo korzystną cechą systemów wieloagentowych jest też

fakt, że bardzo łatwo dają się zrównoleglić, co znacząco przyspiesza działanie i uodparnia na błędy. Jak na razie nie istnieje w pełni ścisła i precyzyjna definicja systemu wieloagentowego, w pełni spełniająca wszystkie oczekiwania. Wszystkie próby ścisłego definiowania systemów wieloagentowych jednocześnie ograniczają to pojęcie. Jednak nie powinno to być tak bardzo zaskakujące, jeśli agentem może być dowolny program komputerowy, to jego możliwości działania wydają się niemal nieograniczone, tak więc bardzo trudno to w pełni zdefiniować matematycznie. Można jednak wymienić wiele cech systemów wieloagentowych, jak i samych agentów, co pozwala względnie trafnie określić, czym takie systemy są. W takiej sytuacji, najpierw warto określić typowe cechy pojedynczego agenta.

Zakłada się, że zawsze system wieloagentowy działa w pewnym środowisku, w informatyce działanie to polega na przetwarzaniu danych tego środowiska. Uważa się, że poszczególne agenty jest zwykle mocno autonomiczny, pobiera dane ze środowiska, analizuje je i podejmuje pewne akcje. Dodatkowo agent komunikuje się z innymi agentami, pobierając i wysyłając dane, co także ma wpływ na podejmowane przez niego akcje. Każdy agent ma pewne cele do osiągnięcia i jego działanie jest nastawione w tym kierunku. Cały system wieloagentowy składa się z wielu agentów. W całym systemie cele poszczególnych agentów mogą, ale nie muszą być zgodne ze sobą. I tak jest właśnie dokładnie w przypadku układania planu zajęć, różni agenci grup i prowadzących bardzo często mają niezgodne cele, ponieważ bardzo często zmiana planu jest dobra dla jednych, ale zła dla drugich.

Typowe cechy agenta w systemach wieloagentowych, to:

- autonomiczny – zdolny do podejmowania własnych niezależnych decyzji,
- komunikatywny – posiada umiejętności wymiany danych z innymi agentami,
- posiada percepcję – zdolność do obserwacji i analizy środowiska,
- posiada cele – jego działania są nastawione na osiągnięcie jego celów,
- tolerancyjny – odporny na błędy, przetwarza wiedzę niepełną i niepewną,
- posiada zdolność uczenia się i zdolność adaptacji do zmian środowiska.

Odnosząc się do tych szczególnych przypadków systemów wieloagentowych ich poszczególne jednostki, czyli agenci, posiadają właśnie te cechy. Bowiem to wszystko właśnie dotyczy neuronów, komórek automatów, mrówek, świetlików, obiektów grawitacyjnych, elementów roju, osobników i podobnych obiektów w systemach złożonych. Agenci w systemach wieloagentowych są często dzieleni na różnego rodzaju typy. Istnieje wiele różnych podziałów na typy agentów. Na przykład, ze względu na metody komunikacji, znany jest następujący podział na typy agentów:

- podstawowy – przyjmuje rozkazy i podejmuje ustalone akcje,
- pasywny – przyjmuje rozkazy i zapytania oraz wysyła rozkazy,
- aktywny – przyjmuje rozkazy oraz wysyła rozkazy i zapytania,
- równy – przyjmuje oraz wysyła rozkazy i zapytania.

Zwykle agent komunikuje się tylko z wybraną grupą innych agentów, którzy należą do jego otoczenia, tak więc ważna jest także architektura połączeń. Warto zauważyć, że taki podział jest też nie do końca jasny. Jeśli bowiem wszyscy agenci mają dostęp do wspólnej pamięci współdzielonej, to rozkazy i zapytania mogą być zapisane właśnie w tej pamięci i każdy agent ma do nich dostęp. Ta wspólna pamięć może reprezentować

środowisko systemu. W tej sytuacji, trudno powiedzieć, do której grupy należy konkretny agent. Wówczas każdy agent może być agentem równym, bo podejmuje swoje akcje na podstawie obserwacji i analizy środowiska. Inaczej mówiąc, komunikacja może się odbywać poprzez interakcje agentów ze środowiskiem. Z kolei ze względu na sposoby działania agentów można wyróżnić następujące typy agentów:

- logiczny – funkcje decyzyjne są projektowane na podstawie metod dedukcji,
- reaktywny – podejmuje działania na podstawie analizy stanu środowiska,
- pro-reaktywny – zorientowany na cel, wykonuje działania z własnej inicjatywy,
- agent BDI – przekonania, pragnienia, intencje (Beliefs, Desires, Intension),
- wielowarstwowy – posiada różne warstwy programowe i poziomy abstrakcji.

Ogólnie rzecz biorąc, podejmowanie decyzji przez agenta zależy od danych ze środowiska, stanu wewnętrznego agenta oraz od danych pochodzących od innych agentów. W niektórych opisach reaktywność i pro-reaktywność są cechami agenta, gdy zakłada się, że każdy agent powinien być odpowiednio złożony i powinien te obie cechy posiadać. W przypadku proponowanego systemu układania planu zajęć, agenci grup i agenci osób prowadzących są aktywni i pro-reaktywni oraz mają prawie wszystkie cechy agentów systemów wieloagentowych.

Należy zaznaczyć, że istnieje jeszcze wiele innych podziałów agentów ze względu na różne sposoby funkcjonowania w całym systemie i środowisku. Wyróżnia się też agentów monitorujących, wyszukujących, zarządzających, współpracujących, rywalizujących, skoordynowanych, odpowiedzialnych, intencjonalnych, socjalnych, godnych zaufania, nieprzewidywalnych, itd. W jeszcze innym podejściu, podstawowych agentów dzieli się na tropistycznych i histerycznych, gdzie system jest matematycznie opisany w języku teorii automatów. Często te bardziej zaawansowane metody podziałów dotyczą już systemów wieloagentowych dedykowanych do konkretnych zagadnień. W przypadkach bardziej złożonych zakłada się, że każdy podstawowy agent wykonuje swoje działania i analizy na wybranym obszarze środowiska. Powstają więc problemy podziału środowiska na obszary wpływu danych agentów. Obszary działań różnych agentów mogą się częściowo pokrywać. W takich przypadkach musi być ustalone, w jaki sposób agenci rozwiązują sytuacje konfliktowe. Rozsądnym podejściem jest definiowanie agentów różnych poziomów. Agenci wyższego poziomu działają na większym obszarze środowiska i mają agentów niższego poziomu im podległych. W przypadku konfliktów agenci zwracają się do swoich agentów nadrzędnych. Tak więc w przypadku bardziej złożonych systemów klasyfikacje agentów są również znacznie bardziej rozbudowane.

Cechy całego złożonego systemu wieloagentowego przedstawiają się następująco:

- system działa w pewnym środowisku,
- system składa się z wielu autonomicznych agentów,
- agenci wykonują działania, które mają wpływ na środowisko i ich stany własne,
- agenci komunikują się między sobą i ze środowiskiem,
- w przypadkach konfliktowych agenci podejmują odpowiednie negocjacje,
- żaden agent nie ma pełnej wiedzy o całym systemie,
- kontrola nad systemem jest rozproszona,
- dane w systemie są zdecentralizowane,
- działania agentów są asynchroniczne.

Ogólnie zakłada się, że system wieloagentowy powinien być systemem całkowicie zdecentralizowanym, jednak to podejście często nie jest traktowane aż tak zasadniczo. Stopień decentralizacji systemu bywa różny w różnych przypadkach. Powstało już nawet wiele typów modeli systemów wieloagentowych częściowo zcentralizowanych. Zakłada się że poszczególni agenci powinni być maksymalnie autonomiczni, dzięki temu system może być równoległy i rozproszony. Jednak czasami pojawia się jakaś potrzeba centralnego sterowania, przynajmniej w pewnym stopniu. Czasami tą rolę przyjmują na siebie agenci wyjątkowo uprzywilejowani, którzy mają za zadanie kontrolowanie działań innych agentów, są to agenci wyższego poziomu. Jedni agenci mogą podlegać innym w pewnym stopniu i tak można tworzyć nawet całe struktury zarządzania w tym wirtualnym świecie. Nieco innym podejściem jest kontrolowanie działań wszystkich agentów przez główny wątek programu. Ten główny wątek programu też można nazwać centralnym agentem. Podobnie jest właśnie w proponowanym systemie do układania planu zajęć. Działania agentów są koordynowane przez głównego agenta całego planu. Agent ten synchronizuje działania agentów grup i prowadzących w różnych fazach ich działania oraz kontroluje rozwiązywanie konfliktów w oparciu o podstawę globalnej funkcji celu. Tak więc w przypadku systemu do układania planu zajęć nie wszystkie cechy są spełnione, zwłaszcza te dotyczące wiedzy o całym systemie i decentralizacji danych, ponieważ wszyscy agenci korzystają z jednej pamięci współdzielonej. Cechą bardziej złożonych systemów wieloagentowych jest umiejętność rozwiązywania problemów kolizyjnych metodą negocjacji agentów. W negocjacjach mogą uczestniczyć wybrane grupy agentów. Zastosowanie tego typu rozwiązania w przypadku układania zajęć na uczelni może być odpowiednie, co zostanie przetestowane w projektowanym programie wspomagającym planowanie.

Podsumowanie i Wnioski

Dobrze ułożony plan zajęć ma ogromne znaczenie. Jednak optymalizacja planu wcale nie jest prostym zadaniem, szczególnie na większej uczelni. Tematem pracy jest stworzenie specjalnych narzędzi do wspomagania układania planów. Początkowo przedstawione narzędzia są głównie skierowane do układania planów zajęć na Wydziale Zastosowań Informatyki i Matematyki SGGW. Podstawowym narzędziem jest program komputerowy do ręcznego układania planu zajęć przez planistę. Program został napisany tak, aby układanie planu było możliwie wygodne i żeby planista mógł jak najlepiej widzieć całą konfigurację planu oraz mógł wygodnie projektować inne konfiguracje na wypadek dużych koniecznych zmian. Taką dużą zmianą może być zmiana programów studiów, która pociąga za sobą wprowadzenie innych przedmiotów kierunkowych albo ustalenie innego dnia w tygodniu dla fakultetów. Na wcześniej wspomnianym wydziale ustalono, że każdy kierunek studiów ma wybrany dzień w tygodniu na fakultety i w tym dniu nie mogą się odbywać inne zajęcia dla tego kierunku. Takie sytuacje, rzecz jasna, implikują rewolucyjne zmiany planu zajęć. Istotną zaletą programu jest to, że planista może wiedzieć wszystkie zajęcia w danym czasie na osi pionowej, a zmienna czasowa jest położona poziomo. Jest to bardzo wygodne podejście w przeciwieństwie do prezentacji tradycyjnej. Naturalną kontynuacją są próby automatycznej optymalizacji planu zajęć.

Obecnie trwają próby testowania nowych narzędzi, które opierają się na zastosowaniu wybranych metod heurystycznych. Na podstawie naszych obserwacji stwierdziliśmy, że najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie systemu wieloagentowego do optymalizacji planu. Proponowane podejście jest stale rozwijane i będzie tematem następnej pracy. W pracy przedstawiono także teoretyczny opis systemów wieloagentowych w szerokim zakresie. W przypadku proponowanego algorytmu optymalizacji planu wykorzystuje się system wieloagentowy, którego agenci są względnie prości. Jednak znaną cechą takich systemów złożonych jest to, że równoległe działanie nawet bardzo prostych wielu jednostek może dawać bardzo imponujące efekty. Tak więc prostota poszczególnego agenta wcale nie ogranicza możliwości działania całego systemu. Nie mniej jednak, w przyszłości planuje się dodatkowe zastosowanie innych metod heurystycznych do lokalnych optymalizacji wybranych części planu zajęć.

Bibliografia

- Alghamdi H., Alsubait T., Alhakami H., Baz A., 2020: A review of optimization algorithms for university timetable scheduling, *Engineering, Technology & Applied Science Research* 10(6), 6410–6417.
- Biernacki A., 2005: Systemy wieloagentowe jako narzędzie do symulacji systemów złożonych, *Studia Informatica* 26, 1, 15–28.
- Deris S., Omatu S., Ohta H., Saad P., 1999: Incorporating constraint propagation in genetic algorithm for university timetable planning, *Engineering applications of artificial intelligence* 12(3), 241–253.
- Deris S., Omatu S., Ohta H., 2000: Timetable planning using the constraint-based reasoning. *Computers & Operations Research* 27(9), 819–840.
- Feliks J., Lichota A., Majewska K., 2015: Koncepcja wykorzystania podejścia agentowego do modelowania systemów logistyki serwisowej, *Logistyka* 2, 89–98.
- Fierek S., 2015: Budowa modelu podaży transportu publicznego dla wieloagentowego modelu symulacyjnego, *Logistyka*, 4, 1, 235–242 [CD].
- Ghomi J.E., Rahmani A.M., Qader N.N., 2019: Service load balancing, scheduling, and logistics optimization in cloud manufacturing by using genetic algorithm. *Concurrency and Computation: Practice and Experience* 31, e5329. <https://doi.org/10.1002/cpe.5329>
- Said H., El-Rayes K., 2014: Automated multi-objective construction logistics optimization system, *Automation in Construction* 43, 110–122.
- Kakkar M.K., Singla J., Garg N., Gupta G., Srivastava P., Kumar A., 2021: Class schedule generation using evolutionary algorithms, *Journal of Physics: Conference Series* 1950, 1, 012067.
- Konstantinow G., Coakley C., 2004: Use of genetic algorithms in reactive scheduling for course timetable adjustments, *PATAT*, 521–522.
- Li S., Teo K.L., 2019: Post-disaster multi-period road network repair: work scheduling and relief logistics optimization. *Annals of Operations Research* 283, 1345–1385. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3037-2>
- Lin G., Gen M., Wang X., 2009: Integrated multistage logistics network design by using hybrid evolutionary algorithm, *Computers & Industrial Engineering* 56, 3, 854–873, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.037>
- Mindur L., Wronka J., Fechner I., Krzyżaniak S., Hajdul M., 2011: Kształtowanie sieci intermodalnej w oparciu o koncepcję systemów wieloagentowych, *Logistyka* 4, 666–677.

- Mittal D., Doshi H., Sunasra M., Nagpure R., 2015: Automatic timetable generation using genetic algorithm, *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering* 4(2), 245–248.
- Moszyński M., 2011: Konstruowanie planu zajęć dydaktycznych jako wielokryterialny problem optymalizacyjny, kilka refleksji. *Ekonomia XLII – Nauki Humanistyczno-Społeczne* 402, 229–243.
- Narang B., Gupta A., Bansal R., 2013: Use of active rules and genetic algorithm to generate the automatic time-table, *International Journal of Advances in Engineering Sciences* 3(3), 40–44.
- Netczuk A., Nowicki T., Pierzchała D., 2015: Wieloagentowy model symulacyjny rozprzestrzeniania się epidemii, *Symulacja w Badaniach i Rozwoju* 6, 2, 125–135.
- Pečený L., Meško P., Kampf R., Gašparík J., 2020: Optimisation in Transport and Logistic Processes, *Transportation Research Procedia* 44, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.003>
- Piotr P., 2019: *Wieloagentowe systemy decyzyjne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Reklaitis G.V., 2000: Overview of planning and scheduling technologies. *Latin American Applied Research* 30(4), 285–293.
- Sawicki P., 2013: *Wielokryterialna optymalizacja procesów w transporcie*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – Państwowego Instytutu Badawczego, Radom.
- Soyemi J., Akinode J., Oloruntoba S., 2017: Electronic Lecture Time-table Scheduler using Genetic Algorithm, 2017 IEEE 15th Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 15th Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, 3rd Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/DataCom/CyberSciTech), 6–10 listopada, 710–715.
- Suryadi D., Pilipus R., 2012: Genetic algorithm for university timetable planning in FTI, *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Istanbul, Turkey, 3–6 lipca, 656–664.
- Wooldridge M., 2009: *An introduction to multiagent systems*, John Wiley & Sons, New Jersey.