

Д. Нұрсерік¹, Ф.Р. Гусманова¹, Г.А. Абдулкаримова², Қ.С. Дальбекова³

¹әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

³Халықаралық бизнес университеті, Алматы қ., Қазақстан

ЭВРИСТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ МЕТАЭВРИСТИКАЛЫҚ АЛГОРИТМДЕРГЕ ШОЛУ

Аңдатпа

Мақалада оңтайландыру есептерінде эвристикалық алгоритмдерді қолдану мәселелері қарастырылады. Метаэвристиканың негізгі қасиеттері және осы метаэвристиканың кластарын құрайтын стохастикалық оңтайландырудың қолданыстағы алгоритмдері сипатталған. Эволюциялық алгоритмдерге жалпы сипаттама берілген. Атап айтқанда генетикалық алгоритмдердің негізгі қадамдары мен қасиеттері келтірілген.

Ұсынылып отырған мақаланың негізгі мақсаты метаэвристиканың генетикалық алгоритмін пайдалана отырып, көлік құралдарын бағыттау мәселесін шешу болып табылады. Көлік құралдарын бағыттау мәселесі NP-толық классына жататын күрделі комбинаторлық оңтайландыру есебі болып табылады. Метаэвристикалық әдістерді қолдану шешімнің бүкіл кеңістігін зерттемей-ақ субоптималды шешімдерді алуға мүмкіндік беретіні келтірілді. Генетикалық алгоритм эволюциялық алгоритмдер тобына жатады. Генетикалық алгоритмге тән ген, хромосома, жеке тұлға (ұрпақ), популяция, ұрпақ және оның операторлары, будандастыру мен мутация және кроссовер ұғымдарына қысқаша түсініктеме берілді. Генетикалық алгоритмде ақырлы автоматтар теориясының қолданылуы жайлы сипатталды. Генетикалық алгоритм көмегімен есептерді шешуде қолданылатын терминология, есептің қойылымына генетикалық алгоритмнің схемасы келтірілді.

Түйін сөздер: генетикалық алгоритм, эвристикалық әдіс, метаэвристикалық алгоритм, эволюциялық алгоритм, эволюциялық эврика, эволюция принциптері, ақырлы автоматтар.

Аннотация

Д. Нұрсерік¹, Ф.Р. Гусманова¹, Г.А. Абдулкаримова², Қ.С. Дальбекова³

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

²Казахский национальный педагогический университет имени Абая, г.Алматы, Казахстан

³Университет международного бизнеса, г.Алматы, Казахстан

ОБЗОР ЭВРИСТИЧЕСКИХ И МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

В статье рассматривается использование эвристических алгоритмов для задач оптимизации. Описаны алгоритмы стохастических оптимизаций, которые составляют основные свойства метаэвристики и ее классов. В общем виде описаны эволюционные алгоритмы. В частности, приведены основные шаги и свойства генетических алгоритмов.

Основная цель предлагаемой статьи – это решение проблемы маршрутизации транспортных средств с использованием метаэвристического алгоритма. Проблема маршрутизации транспортных средств является сложной комбинаторной NP-полной задачей оптимизации. Показано, что метаэвристический подход к решению проблемы позволяет получить субоптимальное решение без исследования всего пространства возможных решений. Генетический алгоритм входит в группу эволюционных алгоритмов. Кратко даны определения свойственным для генетического алгоритма терминам: ген, хромосома, особи (потомок), популяция, операторы потомков, скрещивание, мутация, кроссовер. Описывается применение теории конечных автоматов в генетическом алгоритме. Предложены терминология и схема генетического алгоритма при решении различных задач.

Ключевые слова: генетический алгоритм, эвристический метод, метаэвристический алгоритм, эволюционный алгоритм, эволюционная эврика, принципы эволюции, конечные автоматы.

Abstract

OVERVIEW OF HEURISTIC AND METAHEURISTIC ALGORITHMS

Nurserik D. ¹, Gusmanova F.R. ¹, Abdulkarimova G.A. ², Dalbekova K.S. ³

¹Kazakh National University named after Al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

²Kazakh National Pedagogical University after Abai, Almaty, Kazakhstan

³University of international business, Almaty, Kazakhstan

The article discusses the use of heuristic algorithms for optimization problems. The algorithms for stochastic optimization are described, which constitute the main properties of the metaheuristic and its classes. Evolutionary algorithms are described in general terms. In particular, the main steps and properties of genetic algorithms are presented.

The main goal of this article is to solve the vehicle routing problem using a metaheuristic algorithm. The vehicle routing problem is a complex combinatorial NP-complete optimization problem. It is shown that the metaheuristic approach to solving the problem allows one to obtain a suboptimal solution without examining the entire space of possible solutions. The genetic algorithm belongs to the group of evolutionary algorithms. The definitions are briefly given to the terms characteristic of the genetic algorithm: gene, chromosome, personality (descendant), population, descendant operators, crossing, mutation, crossover. Application of the theory of finite automata in a genetic algorithm is described. The terminology and scheme of the genetic algorithm for solving various problems are proposed.

Keywords: genetic algorithm, heuristic method, metaheuristic algorithm, evolutionary algorithm, evolutionary eureka, principles of evolution, finite automata.

Қазіргі уақытта жан-жақты салада жасанды интеллект теориясы мен практикасында, экономикалық ғылым мен заманауи бизнесте, жаңа бағыттар қарқынды дамып келеді, сонымен қатар осы мәселелердің шешімін тиімді, ең оңтайлы шешім шығаруға "метаэвристика" бірге дамып сұранысқа ие болуда. Эвристика-бұл күрделі мәселенің «жеткілікті» шешімін қолайлы уақыт ішінде, олардың дұрыстығын немесе оңтайлылығын теориялық тұрғыдан негіздемей, яғни эмпирикалық жолмен табатын алгоритм. Метаэвристика әртүрлі қосымшалардан көптеген экономикалық мәселелерді (болжау және оңтайландыру) шешуге мүмкіндік беретін қуатты және ғылыми-зерттеу бағытында өте танымал оңтайландыру әдісі болып табылады.

Болжаудың, оңтайландырудың және бейнелерді танудың математикалық әдістері қазіргі заманғы экономикалық ғылым мен заманауи бизнестің ІТ-технологиялары теориясының бөлігі болып табылады.

Нейрондық желілерді, генетикалық алгоритмді, дәстүрлі эвристика мен заманауи метаэвристиканы қолданатын басқа әдістер мен алгоритмдерді қолданудың кең мүмкіндіктері, сондай-ақ оларға негізделген жасанды интеллект бағдарламалық жасақтамасын пайдалану, зерттелетін тақырып аймағының проблемаларын тиімді шешімдерге айналдырады.

Эвристикалық әдістер нұсқалардың санын азайтуға бағытталған әртүрлі процедураларды білдіреді. Эвристикалық әдістер әрдайым жұмыс істейтін, бірақ әрдайым оңтайлы емес, мысалы, белгілі бір теорияның дамымауы, бастапқы деректердің толық болмауы немесе дұрыс еместігі салдарынан туындаған зияткерлік шығармашылық мәселені шешу ықтималдығын арттырады. Эвристикалық әдістер тіпті өте күрделі, күтпеген жағдайларда да шешім таба алады, бірақ сонымен бірге тиімділігі бойынша олар нақты алгоритмдік тәсілдерден төмен.

Өз кезегінде, метаэвристикалық алгоритмдер кеңінен таралды және 90- жылдары қолданбалы есептерді шешу үшін қолданыла бастады және бүгінгі күнге дейін жалғасуда. Осы идеяларға негізделген барлық метаэвристикалар мен алгоритмдер тірі және жансыз табиғатта болып жатқан процестерді бақылау негізінде ұсынылды.

Метаэвристикалық алгоритмдерде шешім қабылдаудың перспективалы салаларында терең зерттеулер жүргізуге баса назар аударылады. Бұл әдістер әдетте күрделі іздеу ережелерін, деректер құрылымын және рекомбинациялық шешімдерді біріктіреді. Осы әдістермен алынған шешімдердің сапасы, әдетте, классикалық эвристикаға қарағанда әлдеқайда жоғары, бірақ есептеу уақыты да артады. Сонымен қатар, кейбір метаэвристикалар белгілі бір мәселенің мәніне, мәтініне байланысты және басқа мәселелерді шешу үшін олардың таралуын қиындата алатын жақсы реттелген басқару параметрлерін қажет етеді. Қандай да бір мағынада, метаэвристика күрделі жетілдірілген алгоритмдерден басқа ештеңе емес және оларды классикалық эвристиканың табиғи жетілдірілуі ретінде қарастыруға болады (Лапорте, Гендрау және басқалар., 2000 [1-3]). Метаэвристика негізгі эвристикалық әдістерді іздеу кеңістігін тиімді және тиімді зерттеуге бағытталған жоғары деңгейлі құрылымдарға біріктіреді. Метаэвристика екі санатқа бөлінеді: жергілікті іздеу метаэвристикасы және эволюциялық алгоритмдер:

- жергілікті іздеу метаэвристикасы (еліктеу [4], ерекшеліктермен іздеу (Tabu Search – Fred Glover, 1977, 1986) [5], ашкөз рандомизацияланған адаптивті іздеу (GRASP) [6], ауыспалы айналаны іздеу әдісі – VNS [7]);

- эволюциялық алгоритмдер (генетикалық алгоритм – Genetic algorithm (Holland 1975 [Holland, 8]; Goldberg 1989; Whitley 1994; Fogel 1994; Michalewicz 1992; michalewicz & Fogel 2000), құмырсқалар колониясын оңтайландыру – ant Systems, нейрондық желілер – neural network).

Метаэвристикалық алгоритмдер әртүрлі қосымшалардан көптеген күрделі мәселелердің шешімін табуға мүмкіндік беретін оңтайландыру әдістерінің өте танымал класы, атап айтқанда экономикалық қосымшалардағы мәселелерді шешуде кең көлемде пайдаланылады. Өзірленген метаэвристиканың қуаты олардың күрделі мәселелерінің шешімін іздеу кеңістігін егжей-тегжейлі сипаттамай шешу

кабілетінен тұрады. Осыған сүйене отырып, бұл әдістер шешуге қиын оңтайландыру NP-мәселелерін шешуге мүмкіндік береді.

Метаэвристиканы белгілі бір шарт орындалғанға немесе көрсетілген қайталанулардың белгілі бір санына жеткенше, мәселені шешудің тікелей стохастикалық іздеуін жүзеге асыратын, оңтайлы алгоритм деп түсінуге болады.

Ғылыми әдебиеттерде метаэвристика негізгі эвристикалық әдістерді (дәстүрлі классикалық эвристика) іздеу кеңістігін тиімді зерттеуге және тиімді шешімдер қабылдауға мүмкіндік беретін жоғары деңгейлі алгоритмдік сұлбалардың құрылымына біріктіреді деп саналады [9-10].

Практикада кездесетін метаэвристиканың келесі негізгі анықтамалары мен қасиеттері эквивалентті.

1. метаэвристика бұл оңтайлы шешім табу үрдісін анықтайтын және басқаратын кейбір стратегиялар;

2. метаэвристика қолданудың негізгі мақсаты - іздеу кеңістігін тиімді зерттеу және оңтайлы шешімдерді табу;

3. метаэвристикалық алгоритмдер шамамен алынады және әдетте анықталмайды;

4. метаэвристикалық алгоритмдер ұсынатын әдістер қарапайым локальды процедуралардан бастап, оқыту үрдістерін қамтитын күрделіге процедураларға дейін қамтиды;

5. метаэвристикалық алгоритмдер әдетте іздеу кеңістігінің шектеулі аймағында жергілікті экстремумнан алшақ болудың тиімді ережелерін қамтиды;

6. метаэвристика нақты есептерді шешуге арналмаған және оны тек абстрактілі математикалық деңгейде сипаттауға болады;

7. метаэвристикалар әрқашан тақырып туралы білімді эвристика ретінде ұсынады, олар жоғары деңгейдегі стратегиямен басқарылады;

8. қазіргі заманғы метаэвристика іздеуді басқарудың оңтайландыру мәселесін шешу үшін сақталған іздеу мазмұнын қолданады.

Метаэвристика қолданылатын шешімдер санына қарай бөлінеді:

- популяциялық емес (бір потенциалды шешім пайдаланылады);

- популяциялық (потенциалды шешімдер жиынтығы пайдаланылады).

Популяциялық емес метаэвристикалар:

- табиғи (биологиялық, элеуметтік және физикалық);

- биологиялық немесе физикалық жүйелердің үрдістері мен механизмдерін модельдеуге негізделмеген табиғи емес метаэвристикалар болып бөлінеді.

Популяция метаэвристикасы

- эволюциялық (детерминистік және ықтималдық);

- үйір (биологиялық және физикалық);

- иммундық;

- натуралды емес болып бөлінеді.

Метаэвристика әртүрлі оңтайландыру мәселелерін шешуде, машиналық оқытуда, үлгіні тануда және т.б. мәселені басқа қарапайым әдістермен шешу мүмкін болмаған кезде, метаэвристика көбінесе оңтайлы немесе жақын шешімдерді таба алады. Сонымен қатар, есептеу көлемі үлкен болуы мүмкін, бірақ тапсырманың өлшемі жоғарылаған сайын оның жылдамдығы әдетте басқа белгілі әдістерге қарағанда аз болады. Компьютерлік жүйелер өте жылдам және арзан болғаннан кейін, метаэвристика бұрын шешілмейтін болып саналған оңтайлы мәселелерді шешудің негізгі құралдарының біріне айналды.

«Эволюциялық алгоритмдер - бұл көптеген нақты және күрделі қосымшаларда (экономикалық, басқарушылық және басқа мәселелерде) сәтті қолданылатын стохастикалық іздеу әдістері».

Эволюциялық стратегияларға генетикалық алгоритмдер, генетикалық бағдарламалау, құмырысқалар колониясын оңтайландыру әдісі, Estimation of Distribution Algorithms, Scatter Search қарастырылады.

Генетикалық алгоритмдерге жатқызуға болатын алғашқы жарияланымдар Н.А.Баричеллиге тиесілі деп саналады. Оның "Symbiogenetic evolution processes realised by artificial methods" (1957), "Numerical testing of evolution theories" (1962) атты еңбектері, ең алғашқы тұқым қуалаушылықтың табиғи феноменін түсінуге бағытталған.

Д.Холланд қазіргі генетикалық алгоритмдер теориясының негізін қалаушы болып саналады. Алайда, алдымен оны табиғи жүйелердің бейімделу қабілеті бірінші кезекте қызықтырды, ал оның арманы кез-келген экологиялық жағдайға бейімделе алатын осындай жүйені құру болды.

1975 жылы Холланд өзінің «Adaptation in Natural and Artificial Systems» атты ең танымал туындысын жариялайды. Онда Холланд алдымен «генетикалық алгоритм» терминін енгізіп, классикалық генетикалық алгоритмнің (Canonical Genetic Algorithms) сұлбасын ұсынды. Болашақта «генетикалық алгоритмдер» ұғымы өте кең болды және көбіне олар классикалық генетикалық алгоритмнен мүлдем өзгеше алгоритмдерді қамтыды. Джон Холланд (John Holland [8]) репродуктивті жүйелер класына қазіргі кезде белгілі генетикалық алгоритмдерді (Canonical Genetic Algorithms) қолдана отырып талдады.

Генетикалық алгоритм – бұл кездейсоқ іздеу алгоритмі, онда жеке тұлғалардың популяциясының даму үрдісі модельденеді. Биологиялық популяция табиғи сұрыптау заңдарына сәйкес бірнеше ұрпақтарда дамиды, олар «ең жақсы бейімделгені өмір сүреді» деген қағидаға бағынады. Әрбір ұрпақ белгілі бір шешімге сәйкес келеді және оның жарамдылығымен сипатталады, бұл белгілі бір ұрпақтың болашағын көрсетеді де, мәселенің мақсат функциясын ескере отырып анықталады. Жаңа ұрпақ ықтималдылық операторларын (кроссовер) және мутацияны қолдану арқылы қол жетімді негізде құрылады. Будандастыру операторының әсерінен екі ата-ана өздерінің белгілерін алмасып, екі ұрпақты дүниеге әкеледі. Мутация операторы адамға кішігірім кездейсоқ өзгерістер енгізу үшін қызмет етеді. Популяциялық генетиканың биологиялық механизмдерін модельдеуге негізделген, онтайландырылған функциялардың түріне бейімдік әдісі болып табылады. Есептерді шешудегі жеке тұлғаның, ұрпақтың қабілетін мақсат функцияның көмегімен анықталады, ал ол келесі тұжырымға негізделеді: мақсат функцияның мәні неғұрлым аз болса, жеке тұлға соғұрлым бейімделеді [11]. Генетикалық алгоритм есептерінде кездесетін терминологияға қысқаша тоқталып өтейік:

Популяцияның жеке адамдарын жасанды хромосомалардың реттелген тізімі деп санауға болады, мұнда әр хромосома жүк көлігі жүріп өткен жолды бейнелейді. Әр хромосомада K бүтін сандары болады, мұндағы K -хромосоманың құрамындағы гендер саны.

Ген – баратын жер (клиент). Ген бүтін сан болып табылады және клиенттердің санын білдіреді.

Популяциядағы генетикалық алгоритмнің операторлары мен процедуралары:

Генетикалық алгоритмдерде кроссовер - бұл хромосоманың немесе хромосомалардың бағдарламалануын бір ұрпақтан екінші ұрпаққа өзгерту үшін қолданылатын генетикалық оператор. Бұл генетикалық алгоритмдер негізделген көбею мен биологиялық қиылыстың ұқсастығы. Екі іске асырылған кроссовер екі ата-ана арасында генетикалық материалдың өзара алмасуын жасамайды. Олар жаңа ұрпақты құру үшін бір адамнан ақпарат алып, екіншісіне енгізеді.

Генетикалық алгоритмдерде мутация - хромосома популяциясының бір ұрпағынан екінші ұрпағына генетикалық әртүрлілікті сақтау үшін қолданылатын генетикалық оператор. Бұл биологиялық мутацияға ұқсас. Мутациялардың пайда болу ықтималдығын және мутацияның мүлде пайда бола ма жоқ па соларды реттеуге болады.

Генетикалық алгоритмнің ресми сұлбасын құру алгоритмі:

1. кездейсоқ бастапқы популяция құрылады;

2. тоқтату критерийі орындалғанға дейін:

2.1. популяциядан кез-келген екі ата-ана таңдалынады;

2.2. будандастыру операторы қолданып, белгілі $c1$ және $c2$ екі ұрпақты құру керек;

2.3. $c1$ және $c2$ мутация операторы қолданылады;

2.4. екі нашар нәтижелі ұрпақты популяциядан шығарып, оның орнына $c1$ және $c2$ ұрпақтары орналастырылады.

Эволюциялық эвристика бір-бірінен ерекшеленеді. Бірақ олардың барлығы эволюцияның келесі принциптеріне негізделеді:

- адамдардың өмір сүру мерзімі шектеулі болуымен байланысты көбею тұқым қуалау үшін қажет;

- белгілі бір дәрежеде ұрпақтар ата-аналарынан ерекшеленеді;

- адамдар өмір сүру үшін күрес болып табылатын ортада өмір сүреді және олардың өзгеруі қоршаған орта жағдайларына жақсы бейімделуге ықпал етеді;

- табиғи таңдау арқылы жақсы бейімделген адамдар ұзақ өмір сүруге және көбірек ұрпақтар шығаруға бейім;

- ұрпақтар ата-аналарының пайдалы сипаттамаларын мұра етеді, бұл уақыт өте келе жеке тұлғалардың бейімделуін арттырады.

Жалпы генетикалық алгоритмнің негізгі қадамдары:

- инициализациялау: бастапқы популяцияның ұрпағы;

- көршілерді таңдау операторлары: crossover және mutation операторларын таңдау;

- ата-ана кандидатын таңдау: қазіргі популяцияға таңдау операторын пайдалану;

- кадамды бағалау / айналаны зерттеу: өндірілмейді;
- кадамды іске асыру операторлары: crossover, mutation, hill climbing операторларын пайдалану, жаңа популяциясын алу үшін ұрпақ пен ата-ананы таңдау;
- егер токтату критерийлері орындалмаса, эволюцияны жалғастыру немесе эволюция өлшемдерін өзгерту.

Осы мақаланы дайындаудың басты мақсаты метаэвристиканың генетикалық алгоритмін пайдалана отырып, көліктердің жоспарланған кешеніне жету мәселесін оңтайлы шешу болып табылады. Эволюциялық стратегиялар мен генетикалық алгоритмдерге негізделіп ақырлы автоматтар құрылады. Үйір әдістері көптеген NP толық есептерін шығаруға өте тиімді болып табылады. Бұл бағыт қазіргі кезде ғылымда кеңінен даму кезеңінде. Аналитикалық шолуды жүргізу барысында, соның ішінде үйір әдісіне негізделген ақырлы автоматтарды құрудың бір де бір әдісі айқындалмады.

Автоматты бағдарламалау-бағдарламалау парадигмасы, оның аясында бағдарламалық жүйелер өзара әрекеттесетін автоматтандырылған басқару объектілерінің жиынтығы түрінде құрылуы ұсынылады [11]. Автоматтандырылған басқару объектісі басқару автоматынан және басқару объектісінен тұрады. Осылайша, әрбір автоматтандырылған басқару объектісінің әрекеті көбінесе детерминирленген күй машинасымен сипатталады. Көптеген тапсырмалар үшін машиналарды эвристикалық түрде қолмен жасауға болады. Алайда, кейбір жағдайларда мұндай құрылыс тым ауыр немесе оңтайлы емес нәтижелерге әкеледі. Мұндай есептерде машиналарды құру үшін генетикалық алгоритмдерді қолдануға болады [12]. Генетикалық алгоритм көмегімен соңғы машиналарды құрудың дәстүрлі әдісі [13] кейбір сыртқы ортада күрделі орта жүйенің жұмысын модельдеу негізінде есептеуді қолданады.

Генетикалық бағдарламалау алгоритміндегі ақырлы автомат объект түрінде ұсынылады, онда әр күй үшін өтулердің сипаттамалары және бастапқы күй нөмірі болады. Әр күй үшін өтулер тізімі сақталады. Әрбір ауысу осы ауысу жүзеге асырылатын оқиғамен және осы ауысуды таңдаған кезде пайда болатын шығыс әсерлерінің санымен сипатталады. Осылайша, жеке тұлғаларға тек басқару машинасының «қаңқасы» кодталады, ал өтулерде пайда болатын нақты шығыс әсерлері жұмыста ұсынылғанға ұқсас белгілерді қою алгоритмінің көмегімен анықталады [14]. Жиектер тізімдерін қолдана отырып, машинаның ауысу графигін ұсынуды таңдау (толық өту кестелері қолданылған [15] жұмысынан айырмашылығы), әдетте, күрделі мінез-құлқы бар жүйелерді басқару автоматтарында әр оқиғаға реакция әр жағдайда анықталмайтындығына негізделген.

Жоғарыда айтылғандай, әр генетикалық алгоритмге көшу үшін оны таңдау кезінде қанша шығыс әсерлері өндірілуі керек екендігі жазылған. Соңғы машинаның кірісіне тесттердің біріне сәйкес келетін оқиғалар тізбегін береміз және машинаның қандай ауысулар жасайтынын байқаймыз. Осы өтулерді және әр ауысуда қанша шығыс әсерін жасау керектігі туралы ақпаратты біле отырып, кіріс тізбегін өңдеуде қолданылатын өтулерде қандай шығыс әсерлерін жасау керектігін анықтауға болады.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі:

- 1 Laporte G., Semet F. *Classical heuristics for the vehicle routing problem / G. Laporte, F. Semet // Les Cahiers du GERAD G-98-52. – GERAD. – Montreal. – Canada. – 1998.*
- 2 Laporte G., Gendreau M., Potvin J.-Y., Semet, F. *Classical and moderns heuristics for the vehicle routing problem / G. Laporte, M. Gendreau, J.-Y. Potvin, F. Semet // Les Cahiers du GERAD G-98-52. – GERAD. – Montreal. – Canada. – 1999.*
- 3 Laporte G., Gendreau M., Potvin J.-Y., Semet, F. *Classical and moderns heuristics for the vehicle routing problem / G. Laporte, M. Gendreau, J.-Y. Potvin, F. Semet // International Transactions in Operational Research. – Volume 7, Issue 4-5. – 2000. – pp. 285–300.*
- 4 Van Laarhoven P.J.M. and Aarts E.H.L. *Simulated Annealing: Theory and Applications. – Dordrecht: Springer, 1987.*
- 5 Glover F. *Tabu Search, part I // ORSA, Journal of Computing. – 1989. – 1. – P. 190-206.*
- 6 Festa P. and Resende M.G.C. *GRASP: An annotated bibliography // Essays and Surveys on Metaheuristics / C.C. Ribeiro and P. Hansen, eds., pp. 325– 367. – Kluwer Academic Publishers, 2002.*
- 7 Mladenovi'c N. and Hansen P. *Variable neighborhood search // Computers and Opereration Research. – 1997. –24. – P. 1097-1100.*
- 8 Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems. – The University of Michigan Press, 1975.*
- 9 Скобцов Ю. А., Федоров Е. Е. *Метаэвристики. — Донецк: Ноулидж, 2013.*
- 10 Glover F., Kochenberger G. A. *Handbook of metaheuristics. — Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2003.*
- 11 Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. *Автоматное программирование. – СПб.: Питер, 2010. – 176 с.*
- 12 Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. *Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2006. – 320 с.*

13 Поликарпова Н. И., Точилин В. Н., Шалыто А. А. Применение генетического программирования для генерации автоматов с большим числом входных переменных // Науч.-техн. вестник СПбГУ ИТМО. 2008. Вып. 53. Автоматное программирование. С. 24–42.

14 Lucas S., Reynolds T. Learning Deterministic Finite Automata with a Smart State Labeling Evolutionary Algorithm // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 2005. Vol. 27. Is. 7. P. 1063 – 1074.

15 Panchenko, T. V. Genetic Algorithms [Text]: teaching aid / ed. Yu. Yu. Tarasevich. - Astrakhan: Publishing House «Astrakhan University», 2007. - 87 [3] p.

References

1 Laporte G., Semet F. (1998) Classical heuristics for the vehicle routing problem. *Les Cahiers du GERAD G-98-52*. GERAD. Montreal. Canada. (In English)

2 Laporte G., Gendreau M., Potvin J.-Y., Semet, F. (1999) Classical and moderns heuristics for the vehicle routing problem. *Les Cahiers du GERAD G-98-52*. GERAD. Montreal. Canada. (In English)

3 Laporte G., Gendreau M., Potvin J.-Y., Semet, F. (2000) Classical and moderns heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*. Volume 7, Issue 4-5. 285–300. (In English)

4 Van Laarhoven P.J.M. and Aarts E.H.L. (1987) *Simulated Annealing: Theory and Applications*. Dordrecht: Springer. (In English)

5 Glover F. (1989) *Tabu Search, part I*. *ORSA, Journal of Computing*. 190-206. (In English)

6 Festa P. and Resende M.G.C. (2002) GRASP: An annotated bibliography. *Essays and Surveys on Metaheuristics*. C.C. Ribeiro and P. Hansen, eds., 325– 367. Kluwer Academic Publishers. (In English)

7 Mladenović N. and Hansen P. (1997) Variable neighborhood search. *Computers and Operation Research*. 24. 1097-1100. (In English)

8 Holland J.H. (1975) *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. The University of Michigan Press. (In English)

9 Skobcov Ju. A., Fedorov E. E. (2013) *Metajevristiki*. Doneck: Noulidzh. (In English)

10 Glover F., Kochenberger G. A. (2003) *Handbook of metaheuristics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ. (In English)

11 Polikarpova N. I., Shalyto A. A. (2010) *Avtomatnoe programmirovaniye [Automatic programming]*. Piter. 176. (In Russian)

12 Gladkov L. A., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. (2006) *Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms]*. Fizmatlit. 320. (In Russian)

13 Polikarpova N. I., Tochilin V. N., Shalyto A. A. (2008) *Primenenie geneticheskogo programmirovaniya dlja generacii avtomatov s bol'shim chislom vhodnyh peremennyh [Application of genetic programming for generating automata with a large number of input variables]*. *Nauch.-tehn. vestnik SPbGU ITMO*. Vyp. 53. *Avtomatnoe programmirovaniye*. 24–42. (In Russian)

14 Lucas S., Reynolds T. (2005) Learning Deterministic Finite Automata with a Smart State Labeling Evolutionary Algorithm. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. Vol. 27. Is. 7. 1063 – 1074. (In English)

15 Panchenko, T. V. (2007) *Genetic Algorithms [Text]: teaching aid*, ed. Yu. Yu. Tarasevich. Astrakhan: Publishing House «Astrakhan University». 87 [3]. (In English)