

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА ГОРОДСКОЙ РЕЛЬСОВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

СИДОРЕНКО Валентина Геннадьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры;
e-mail: valenfalk@mail.ru

САФРОНОВ Антон Игоревич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры; e-mail: safronov-ai@mail.ru

Российский университет транспорта (МИИТ), кафедра «Управление и защита информации», Москва

В статье исследована возможность применения генетических алгоритмов при автоматизации составления плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена. Основная цель исследования — усовершенствовать автоматизированную систему составления планового графика движения пассажирских поездов для обеспечения равномерности процессов при использовании разнообразных ресурсов и учете существующих ограничений. Необходимые определения ресурсов и ограничений под условия использования модели генетического алгоритма сведены во взаимосвязанные и унифицированные таблицы. На основе вероятностного подхода исследовано влияние различных сочетаний значений параметров генетического алгоритма на состав популяции в процессе поиска эффективных результатов планирования перевозочного процесса городской рельсовой транспортной системы. Для нужд исследования составлено программное обеспечение на высокоуровневых языках *C#* и *Python*. Выполнена адаптация генетического алгоритма к решению задачи автоматизации составления плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена, и показана его применимость к комплексу взаимосвязанных задач автоматизации планирования перевозочного процесса: составлению графика оборота электроподвижного состава и графика работы локомотивных бригад. Рассчитаны значения вероятности получения благоприятного исхода — наличия в результатах автоматизированного составления плановых графиков движения поездов всех возможных значений аллелей при различных комбинациях значений размера первичной популяции и потребного количества аллелей.

Ключевые слова: генетический алгоритм; фитнес-функция; критерии равномерности; размер первичной популяции; *Python*; городская рельсовая транспортная система; график движения поездов; планирование перевозочного процесса.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-49-62

▼ Введение

Поддержание высокой интенсивности движения, обеспечение безопасности движения транспортных средств городской рельсовой транспортной системы (ГРТС), соблюдение правил комфортного обслуживания пассажиров и эффективное использование производственных ресурсов базируются на комплексном подходе к решению задач планирования перевозочного процесса.

В условиях интенсивного движения транспортных средств с учетом высоких приоритетов в сфере обеспечения безопасных перевозок при бесперебойной работе единой ГРТС важно отвечать всем запросам на сервис и комфорт, поступающим от пассажиров. ГРТС включают в себя метрополитен, моно-рельсовые системы, участки пригородного

железнодорожного движения, скоростной трамвай. На сегодняшний день комплексное решение задач планирования безопасных перевозок на ГРТС немыслимо и неэффективно без применения интеллектуальных информационных технологий [1], направленных на рационализацию использования имеющихся и ограниченных производственных ресурсов при планировании перевозочного процесса.

Результатами планирования перевозочного процесса на сетях ГРТС являются плановые графики движения (ПГД) транспортных средств, в частности пассажирских поездов метрополитена (ППМ). С ПГД тесно взаимосвязаны графики оборота электроподвижного состава (ГО ЭПС), а также графики работы локомотивных бригад [2, 3].

Во многих статьях обсуждалось решение проблемы комплексного планирования перевозочного процесса с составлением на базе различных методов взаимно увязанных ПГД, ГО ЭПС и графиком работы локомотивных бригад [4, 5]. В работе [6] обозначенная проблема определена и поставлена в классической формулировке фундаментальной задачи комбинаторной оптимизации — задачи о назначениях. В работе [7] автоматизацию планирования диагностических и ремонтных мероприятий, закладываемых в ГО ЭПС, предложено выполнять на базе строгой формализации, использующей методы и способы решения задач из теории графов с применением рекурсивного принципа динамического программирования (планирования) Беллмана. Предложенный подход позволяет обнаруживать все интересные наборы возможных назначений диагностических и ремонтных мероприятий, после чего остается только выбрать варианты, отвечающие плановым эксплуатационным показателям и минимально отличающиеся от оптимального значения с точки зрения выбранного критерия. На реализацию такого подхода уходит много времени, и проблема возникает на стадии выбора критерия поддержания равномерности при ограниченных ресурсах. Таким образом, важной задачей является снижение затрат времени на комплексное планирование перевозочного процесса ГРТС и совершенствование системы автоматизированного планирования перевозочного процесса ГРТС. В этом случае генетический алгоритм (ГА) является эффективным инструментом оптимизации [8]. Предлагаемый в статье математический аппарат основан на использовании комбинаторики, теории графов и ГА.

В статье исследована применимость ГА к решению задачи планирования перевозочного процесса на ГРТС на примере автоматизации составления ПГД ППМ. Основная цель исследования — усовершенствовать автоматизированную систему составления ПГД поездов для обеспечения равномерности процессов с использованием разнообразных ресурсов при учете существующих ограничений.

Труды, посвященные автоматизации составления ПГД ППМ и выступающие в качестве

основ решения задач планирования перевозочного процесса ГРТС, подразделяются на:

1. Обобщение опыта автоматизации составления ПГД ППМ:
 - формализация и разработка математических моделей ПГД ППМ [5, 9, 10];
 - рассмотрение фундаментальных политик и принципов реализации вычислительных процессов, связанных с составлением ПГД ППМ [11, 12];
 - обеспечение равномерности (выравнивание) интервалов движения ГРТС [13–15];
 - рассмотрение различных способов визуализации [13, 15–17];
 - составление ГО ЭПС [18–20];
 - планирование работы ЛБ [2, 21];
 - энергооптимальное планирование движения [22–25];
2. Вопросы составления ПГД ППМ различных типов:
 - традиционный ПГД [13, 15, 26–28];
 - график зонного типа на метрополитене [9, 29] и на пригородном железнодорожном сообщении [30];
 - кольцевая линия [12, 31].

1. Этапы решения задач оптимизации с использованием ГА

При решении задач оптимизации с использованием ГА должны быть выполнены следующие основные шаги [32]:

1. Инициализация исходных данных для корректного функционирования ГА, включающая:
 - загрузку информации о хромосоме (особи) в виде, определяемом спецификой решаемой задачи;
 - загрузку информации, необходимой для вычисления значения критерия (фитнес-функции);
 - ввод параметров функционирования ГА:
 - способ кроссинговера;
 - размер исходной популяции;
 - предельное количество поколений, на протяжении которых значения критерия (фитнес-функции) не улучшаются;
 - точность вычисления значения критерия (фитнес-функции);
 - максимальное время функционирования ГА и др.

2. Генерация первичной популяции (первого, иницирующего поколения).

3. Вычисление значения критерия (фитнес-функции) для каждой отдельно взятой хромосомы (особи).

4. Формирование нового поколения (шаг ГА), моделирование процесса эволюции, при котором происходит:

- отбор хромосом (особей) с лучшими значениями критерия (фитнес-функции) внутри рассматриваемой популяции;
- получение новых хромосом (особей) в результате выполнения кроссинговера для пар особей, выбранных в качестве родителей внутри рассматриваемой популяции;
- получение новых хромосом (особей) в результате выполнения мутаций отдельных особей, выбранных внутри рассматриваемой популяции.

5. Проверка условия окончания работы алгоритма. При невыполнении условия окончания осуществляется переход к п. 3.

2. Определение генотипа ПГД

Для решения задач планирования перевозочного процесса с использованием ГА необходимо выполнить адаптацию понятий, связанных с этим алгоритмом, для решаемых задач [33].

Эволюция — генетический процесс трансформации множества исходных/рассматриваемых вариантов автоматизированного составления ПГД.

Популяция/поколение — множество вариантов автоматизированного составления ПГД, рассматриваемое на одной итерации эволюции.

Особь — экземпляр ПГД, описываемый совокупностью хромосом, представленной в табл. 1.

Хромосома — структура, описывающая один из переходных процессов (ПП) ПГД. Варианты составления хромосом представлены в табл. 2–4.

Генотип — набор хромосом особи, задающий способ составления соответствующего экземпляра ПГД, представленный в табл. 1.

Фитнес-функция — величина отклонения от планового времени завершения движения по главным путям линии метрополитена или штрафа, учитывающего количество реализованных этапов автоматизации составления ПГД и количество точек ночной расстановки, для которых назначение маршрута на ночную расстановку не удалось.

Мутация — генетический процесс, связанный с изменением представленного в табл. 1 генотипа ПГД ППМ. Мутация, как правило, происходит под влиянием факторов внешней или внутренней среды.

Кроссинговер — генетический процесс, связанный с изменением представленного в табл. 1 генотипа ПГД ППМ. Кроссинговер происходит в результате обмена генетическим материалом между хромосомами (особями) внутри рассматриваемой популяции.

Адаптация терминов «Ген», «Локус» и «Алель» представлена в табл. 2–4.

Таблица 1. Генотип ПГД

Тип хромосомы	Сокращенное наименование	Количество хромосом одного типа в генотипе
Ввод составов перед утренним часом пик	$a_{tr^{m+}}$	Количество полных оборотов составов, приходящихся на ПП ПГД, умноженное на два (рассматриваются 2 главных пути)
Выход из расстановки	a_m	1
Снятие составов в электродепо по завершении процесса утреннего часа пик	$a_{tr^{m-}}$	Количество итераций выполнения полного оборота составов, приходящееся на ПП ПГД. Умножается на два, поскольку рассматриваются два главных пути линии метрополитена
Ввод составов из электродепо до начала процесса вечернего часа пик	$a_{tr^{e+}}$	
Снятие составов в электродепо по завершении процесса вечернего часа пик	$a_{tr^{e-}}$	
Уход составов на ночную расстановку на линию и в электродепо	a_e	1
Назначение технического осмотра	$a_{непик}$	1

Таблица 2. Структура хромосом для ПП ПГД a_{trm+} , a_{trm-} , a_{tre+} и a_{tre-}

Тип гена	Количество генов заданного типа	Мощность множества аллелей
Вариант ввода (или снятия) составов по I главному пути линии метрополитена	Количество равномерных вводов (или снятий) составов, производимых внутри рассматриваемого ПП по I главному пути линии метрополитена	Мощность множества вариантов реализации каждого равномерного ввода или (снятия) составов по I главному пути линии метрополитена, производимого внутри рассматриваемого ПП, $x_{i,j}$ [34, 35]: $x_{i,j} = \frac{M_{i,j}}{\text{НОД}(M_{i,j}, M_{i+1,j})},$ где $M_{i,j}$ — количество составов, которые должны быть на j -м пути линии к началу рассматриваемого интервала времени (процесса ПГД) с порядковым номером i ; $M_{i+1,j}$ — количество составов, которые должны быть на j -м пути линии к началу следующего к рассматриваемому интервалу времени; НОД — наибольший общий делитель
Вариант ввода (или снятия) составов по II главному пути линии метрополитена	Количество равномерных вводов (или снятий) составов, производимых внутри рассматриваемого ПП по II главному пути	Мощность множества вариантов реализации каждого равномерного ввода (снятия) составов по II главному пути, вычисляемое аналогично тому, как это сделано для I главного пути
Маршрут, поставленный в заданную точку ночной расстановки	Количество вводимых (снимаемых) составов внутри рассматриваемого ПП	Мощность множества маршрутов, которые могут быть назначены на рассматриваемую «нитку»

Таблица 3. Структура хромосомы ПГД a_m и a_e

Тип гена	Количество генов заданного типа	Мощность множества аллелей
Номер пути в дереве последовательности заполнения/освобождения точек ночной расстановки [20]	1	Число путей в дереве
Маршрут, поставленный к заданной точке ночной расстановки	Длина пути дерева	Мощность множества маршрутов, которые могут быть отправлены на «ночевку» в указанную точку ночной расстановки, расположенную на главном или станционном пути линии метрополитена

Таблица 4. Структура хромосомы ПГД $a_{перик}$

Тип гена	Количество генов заданного типа	Мощность множества аллелей
Маршрут, отправленный в осмотр	Количество выполняемых осмотров по всем пунктам технического обслуживания	Мощность множества маршрутов, для которых необходимо провести осмотр в текущем диапазоне времени в указанном пункте технического обслуживания, расположенном на станционных путях линии метрополитена

При решении задачи составления ПГД генотип ПГД задается набором хромосом особи, каждая из которых состоит из гетерогенных генов, для каждого из которых существует собственный набор аллелей. Число локусов в каждой хромосоме равно числу мест, в которых происходит выбор способа составления ПГД (ПП ПГД) [12, 34]. Мощность множества аллелей N_a для каждого из локусов определяется количеством вариантов реализации ПГД

на данном этапе. Описание генотипа ПГД приведено в табл. 1, а табл. 2–4 содержат информацию о строении различных типов хромосом.

3. Выбор фитнес-функции

При составлении ПГД в качестве критериев качества в первую очередь рассматриваются критерии равномерности [12, 36, 37]:

- критерий равномерности интервалов движения по отправлению поездов со станций;

– критерий равномерности расположения вводимых/снимаемых составов.

Сравнение вариантов ПГД проводится согласно дополнительно сформулированным показателям качества [38]:

- количество разменов маршрутов через электродепо;
- параметры регулировочных отстоев на станционных путях линии (количество, общая (суммарная), средняя, максимальная длительности и другие параметры регулировочных отстоев);
- времена завершения движения по каждому из главных путей линии;
- параметры графика зонного типа или ввода/снятия составов на промежуточных станциях;
- параметры времен оборота состава на конечных и промежуточных станциях.

Развитие модели автоматизации составления ПГД ППМ потребовало переосмысления и более полного рассмотрения «вектора-кода» варианта автоматизированного составления ПГД (далее — просто «вектор-код»).

Ранее в качестве «вектора-кода» рассматривалась строка текста (сформулировано в [17]). Предлагается рассмотрение «вектора-кода» в виде объекта, который можно формально записать нижеследующим образом:

$$VarVect = (ID, Seq, Criteria), \quad (1)$$

где ID — уникальный идентификатор исходного набора данных, необходимых для автоматизированного составления ПГД ППМ;

Seq — кортеж целых чисел, каждая позиция в котором определяет номер итерации смещения последовательности ввода/снятия состава относительно первично рассчитанной [34] согласно алгоритму целочисленного деления Евклида для поиска равномерных расположений [37] — эти числа одновременно являются аллелями, входящими в табл. 1;

$Criteria$ — значение фитнес-функции оценки качества варианта автоматизированного составления ПГД, измеряемое в «метросекундах» (на метрополитене расчеты показателей времени ведутся с дискретизацией в 5 се-

кунд, потому метросекунда — это 5 астрономических секунд, 12 метросекунд содержатся в астрономической минуте, 720 метросекунд составляют астрономический час).

Информация о получении первого поколения хранится в файле, ином внешнем источнике информации или генерируется в автоматизированной системе составления ПГД поездов.

Информация о популяции любого поколения может быть представлена в виде двумерных массивов, в которых количество строк равно N — размер популяции, количество столбцов равно Nl или $Nl + 1$ в зависимости от формы представления исходных данных. Элемент матрицы при размерности $[N \times Nl]$:

$$Z_{i,j} \in [1...Na_i], \quad i \in 1...N, \quad j \in 1...Nl, \quad (2)$$

где Na — количество вариантов смещения последовательности ввода/снятия составов относительно первично рассчитанной последовательности согласно алгоритму целочисленного деления Евклида для поиска равномерных расположений — мощность множества аллелей;

Nl — количество итераций равномерных вводов/снятий составов [34] (итераций распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо), реализуемых в ходе расчета варианта автоматизированного составления ПГД — мощность множества локусов.

Полученные ранее результаты показали, что, несмотря на потенциально большое количество вариантов выбора управляющих воздействий при составлении ПГД для заданных исходных данных, количество вариантов управляющих воздействий, приводящих к успешному составлению ПГД, невелико, поэтому еще одним критерием приближения к успешному составлению ПГД может служить количество точек ночной расстановки, для которых назначение маршрута на ночную расстановку не удалось при выбранных вариантах управления. При успешном составлении ПГД таких точек не должно остаться.

При размерности $[N \times Nl + 1]$ в матрицу добавляется столбец, содержащий числовое значение выбранного критерия (фитнес-функции) для каждой строки матрицы:

$$Criteria_i = \begin{cases} t_{\text{пр}}^{\text{max}}, & \text{если } X_1 = 0 \text{ и } X_2 = 0 \\ C_0 - C_1 X_1 - C_2 X_2, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3)$$

где $t_{\text{пр}}^{\text{max}}$ — время завершения движения в соответствии с успешно реализованным вариантом автоматизированного составления ПГД (в [39] учитывается оценка для случая движения по двум условно независимым главным путям линии метрополитена);

$$t_{\text{пр}}^{\text{max}} = \max_{i=1..M} \mathbf{m}_i : \mathbf{p}_{NR}^e : \mathbf{n}_{end} : t_{ste}, \quad (4)$$

где \mathbf{m}_i — i -й маршрут, приписанный к электродепо, на рассматриваемой линии метрополитена;

$\mathbf{m}_i : \mathbf{p}_{NR}^e$ — точка ночной расстановки, в которую уходит маршрут \mathbf{m}_i ;

\mathbf{n}_{end} — «нитка», движение по которой заканчивается в точке ночной расстановки;

t_{ste} — время окончания движения до светфора «Е» или точки ночной расстановки;

M — количество маршрутов на линии;

C_0 — максимальная величина штрафа за отсутствие завершенности рассматриваемого варианта автоматизированного составления ПГД с точки зрения соблюдения условий успешной реализации [40] (в рассматриваемом случае, $C_0 = 32\,700$ [метросекунд]);

C_1 — коэффициент, определяющий зависимость значения фитнес-функции от количества выполненных итераций распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо (в рассматриваемом случае $C_1 = 100$ [метросекунд]);

X_1 — количество выполненных итераций распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо;

C_2 — коэффициент, определяющий зависимость значения фитнес-функции от количества «ниток», оставшихся без связи после неудачной попытки реализации ночной расстановки (в рассматриваемом случае $K_2 = 1$ [метросекунда]);

X_2 — количество «ниток», оставшихся без связи после неудачной попытки реализации ночной расстановки [17];

$$X_2 = \sum_{i=1}^T \begin{cases} 1, & \mathbf{n}_i : fS = 0 \vee \mathbf{n}_i : fE = 0 \\ 0, & \text{в ином случае} \end{cases}, \quad (5)$$

где T — общее количество «ниток» на ПГД;

\mathbf{n}_i — i -я «нитка» на ПГД;

$\mathbf{n}_i : fS$ — признак наличия связи «нитки» в начале движения по главному пути (0 соответствует отсутствию какой-либо связи);

$\mathbf{n}_i : fE$ — признак наличия связи «нитки» в конце движения по одному из главных путей линии метрополитена, согласующемуся с направлением движения по «нитке» (0 соответствует отсутствию какой-либо связи).

При таких значениях коэффициентов два младших разряда несут информацию о заполнении точек ночной расстановки, если все итерации распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо, выполнены, 3-й и 4-й разряды несут информацию о количестве невыполненных итераций распределения маневровых передвижений, связанных с электродепо.

Коэффициенты выбраны таким образом, чтобы в случае успешного завершения составления ПГД значение критерия было заведомо меньше, чем в случае неудачного составления ПГД.

Возможен и дополнительный контроль корректности организации выхода составов из ночной расстановки при необходимости:

$$\sum_{i=1}^T \mathbf{n}_i |_{(\mathbf{n}_i : fS = 0 \wedge \mathbf{n}_i : \mathbf{n}_{pn} = \emptyset)} = 0, \quad (6)$$

где $\mathbf{n}_i : \mathbf{n}_{pn}$ — точка ночной расстановки, связанная с i -й «ниткой».

Более тонкая настройка значений фитнес-функции ГА может быть выполнена путем учета требований, предъявляемых к рациональности проведения ремонтов и осмотров в электродепо и линейных пунктах технического обслуживания.

Обеспечение малых значений критериев равномерности ПГД достигается реализуемыми алгоритмами составления ПГД. В качестве фитнес-функции используются времена окончания движения по I и II главным путям, так как

именно они позволяют осуществить сравнение качества успешно составленных вариантов ПГД. На эти показатели необходимо обращать первоочередное внимание, так как движение по линии метрополитена не должно быть затянато. Это необходимо для предоставления как можно большего времени на проведение ночных работ.

В качестве критерия рационального планирования ГО ЭПС введен критерий равномерности размещения обслуживаний, определяемый одним из двух способов [33]:

- сумма квадратов отклонений времен начала обслуживания для кандидата, используемого для проведения обслуживания, от желаемых времен начала проведения обслуживания;
- сумма квадратов интервалов времени между обслуживаниями.

В случае ограниченных ресурсов в качестве критерия, позволяющего получить решение для любых исходных данных, используется значение суммарного превышения времени между обслуживаниями над допустимым.

При составлении графика работы локомотивных бригад критерий качества определяется балансом между навыками персонала и его численностью, количеством рабочих смен и выполнением требований нормативных документов. В рассматриваемом случае таким критерием служит среднеквадратичное отклонение продолжительности рабочего времени различных локомотивных бригад в течение одного промежутка времени [2].

4. Определение размера первичной популяции

Настройка исходных значений параметров функционирования ГА напрямую связана с вводом размера первичной популяции. То, в каком объеме поступает на вход первичная популяция, определяет для каждого последующего процесса эволюции, какое количество особей должно в обязательном порядке быть рассмотрено в каждом новом поколении. Если задаться чрезмерно большим значением размера первичной популяции, то ГА будет осуществлять более тщательный и более длительный поиск в пространстве решений. При этом

вероятность того, что будет найден локальный, а не глобальный минимум, уменьшится.

Величина размера первичной популяции варьируется в диапазоне от единицы до максимального числа вариантов составления ПГД ППМ, равного произведению числа вариантов реализации всех этапов составления ПГД [34].

При выборе размера первичной популяции, равного максимальному числу вариантов составления ПГД ППМ (это число порядка 10^9), ГА вырождается в алгоритм полного перебора вариантов. При выборе размера первичной популяции, равного единице, также наступает вырожденный случай, при котором происходит случайный выбор любого значения. Это значение волонтаристским образом назначается оптимальным, что ошибочно.

Предположим, что размер первичной популяции равен N . Мощность множества аллелей i -го гена равна Na_i . Обозначим Q_N^k — количество вариантов заполнения N ячеек при помощи ровно k выбранных значений.

Тогда количество вариантов заполнения N ячеек при помощи Na_i возможных значений при условии, что некоторые из них могут и не использоваться, определяется по формуле:

$$N = \sum_{k=1}^{Na_i} Q_N^k. \quad (7)$$

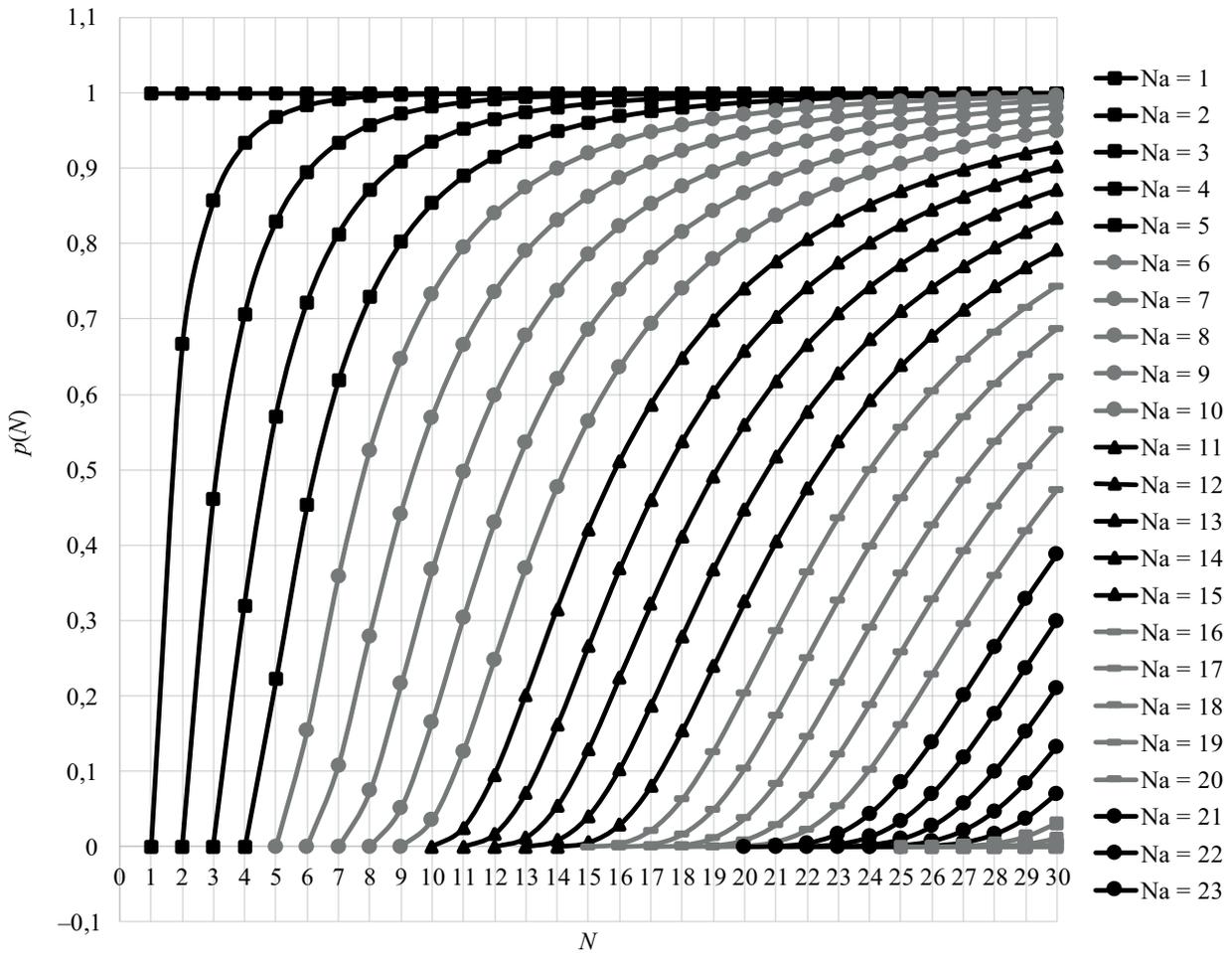
Вероятность того, что при заполнении N ячеек будут использованы все Na_i возможных значений, определяется по формуле:

$$p_i = \frac{\text{Количество благоприятных событий}}{\text{Количество всех событий}} = \frac{Q_N^{Na_i}}{\sum_{k=1}^{Na_i} Q_N^k}. \quad (8)$$

При выборе размера популяции должна быть решена задача обеспечения значения p_i не ниже заданного уровня. Выполним последовательно расчет для мощностей множества аллелей, равных одному, двум, трем и четырем:

$$Q_N^1 = C_{Na_i}^1 = N, \quad (9)$$

$$Q_N^2 = C_{Na_i}^2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} C_N^i, \quad (10)$$



Семейство «сигмоид», демонстрирующих изменение вероятности $p_i(N, Na)$

$$Q_N^3 = C_{Na_i}^3 \cdot \sum_{i=1}^{N-2} \left[C_N^i \cdot \sum_{j=1}^{N-i-1} C_{N-i}^j \right], \quad (11)$$

$$p = \prod_{i=1}^N p_i. \quad (14)$$

$$Q_N^4 = C_{Na_i}^4 \cdot \sum_{i=1}^{N-3} \left[C_N^i \left[\sum_{j=1}^{N-i-1} \left[C_{N-i}^j \sum_{l=1}^{N-j-1} C_{N-j}^l \right] \right] \right]. \quad (12)$$

Общий случай для мощности множества аллелей, равного k , рассмотрен далее:

$$Q_N^k = C_{Na_i}^k \cdot \sum_{i_0=1}^{N-k+1} \left[C_N^{i_0} \left[\sum_{i_1=1}^{N-i_0-1} \left[C_{N-i_0}^{i_1} \sum_{i_2=1}^{N-i_1-1} C_{N-i_1}^{i_2} \right] \right] \right]. \quad (13)$$

Вложенные суммы вычисляются до тех пор, пока верхний предел суммирования остается больше единицы: $N - i_j - 1 > 1, i_j < N - 2$.

Вероятность события, при котором все N локусов включают в себя полный набор аллелей (он при переходе между локусами в рассматриваемой задаче изменяется), равна:

К расчету значений вероятности присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей $p_i(N, Na)$ при различных значениях количества аллелей Na в зависимости от размера популяции N применен высокоуровневый язык программирования *Python*. На сегодня этот язык популярен [27] преимущественно из-за многочисленных подключаемых библиотек, а также из-за удобства настройки нейронных сетей и машинного обучения [1]. Применительно к решаемой задаче поиска вероятностей при известных соотношениях из комбинаторики *Python* имеет возможность обработки сверхбольших целых чисел, столь необходимых для расчета факториалов [41]. *Python* по праву назван языком для анализа данных [42], он показал

свою эффективность в экспериментальной математике [43] и при оценке сложности составляемых алгоритмов [44].

По рисунку удобно оценивать влияние размера популяции и мощности множества аллелей на вероятность получения благоприятного исхода — присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей.

Представлено семейство «сигмоид», скорость изменения значений $p_i(N, Na)$ в котором уменьшается с ростом общего количества рассматриваемых событий. Характеристики идентичны друг другу и могут использоваться для прогнозирования значений $p_i(N, Na)$ при других сочетаниях значений N и Na .

Набор исходных данных для моделируемой ситуации автоматизированного составления ПГД N фиксирован и составляет:

- 6 значений до утреннего часа пик;
- 4 значения после утреннего часа пик;
- 4 значения до вечернего часа пик;
- 8 значений после вечернего часа пик.

Всего 22 элемента «вектора-кода» варианта автоматизированного составления ПГД предоставляют возможность его однозначного восстановления согласно разработанным алгоритмам. В автоматизированную систему составления ПГД через «задатчик» [17] может быть введена последовательность, приведенная в примере, с целью просмотра и (или) редактирования:

$$N = 22 \text{ ячейки}$$

$$\underbrace{3; 2; 1; 1; 1; 1; 1}_{2 \cdot 3=6 \text{ до утр. часа пик}} \quad \underbrace{1; 7; 2; 1; 1}_{2 \cdot 2=4 \text{ после утр. часа пик}} \quad \underbrace{9; 3; 1; 6; 1}_{2 \cdot 2=4 \text{ до веч. часа пик}} \quad \underbrace{2; 5; 7; 1; 1; 1; 5; 1}_{2 \cdot 4=8 \text{ после веч. часа пик}}.$$

На каждой позиции записана реализация из диапазона $[1...Na_i]$. Na_i варьируется в зависимости от количества «ниток», оставшихся на ПГД к рассматриваемому моменту времени автоматизированного составления ПГД.

Заключение

Основная цель проведенного научного исследования достигнута — автоматизированная система составления ПГД ППМ усовершенствована для обеспечения равномерности процессов при использовании разнообразных

ресурсов и при учете существующих ограничений. Вместе с тем в статье показана применимость ГА, учитывающего равномерность процессов, к комплексу задач автоматизации планирования перевозочного процесса на метрополитене. Доказана эффективность применения ГА, в частности для решения задачи автоматизации составления ПГД ППМ, — транспортного объекта, являющегося одним из рассматриваемых звеньев ГРТС.

Статья содержит результаты адаптации ГА к решению задачи автоматизации составления ПГД при планировании перевозочного процесса в рамках ГРТС. Выполнен расчет значений вероятности присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей в зависимости от размера популяции. Изложенные положения пригодны для решения задач планирования перевозочного процесса, в частности планирования движения поездов в условиях ограничения ресурсов при учете требований, предъявляемых к результатам планирования функционирования ГРТС, что подтверждает свойства открытости и модульности автоматизированной системы составления плановых графиков движения ППМ.

К недостаткам примененного подхода относятся:

- сложность адаптации параметров управления технологическими процессами предметных областей под условия функционирования ГА (сфера планирования перевозочного процесса на ГРТС — не исключение);

- использование обобщений и допущений при формализации описания критерия для оценки качества составления ПГД с использованием разработанного и внедренного в автоматизированную систему построения ПГД ППМ алгоритма автоматизации;

- затяжной расчет вероятностей получения благоприятного исхода — присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей при совместно больших значениях размера первичной популяции и потребного количества аллелей.

При всей сложности адаптации ГА к условиям планирования перевозочного процесса

на ГРТС эта работа выполнена, и ее ключевые положения изложены в настоящей статье. Введение более детального и жестко ограниченного критерия должно способствовать сокращению количества успешно реализованных вариантов составления ПГД, что, в свою очередь, способствует снижению трудозатрат оператора при поиске эффективного варианта составления ПГД и принятия решения относительно его выбора в качестве действующего ПГД, с которым может полноценно работать линия метрополитена. Длительность расчета вероятностей получения благоприятного исхода (присутствия в полученных результатах автоматизированного составления ПГД всех возможных значений аллелей при совместно больших значениях размера первичной популяции и потребного количества аллелей) легко парируется возможностью прогнозирования «сигмоид», содержащих близкие к истинным значения вероятностей, для сколь угодно больших значений размера первичной популяции и потребного количества аллелей при использовании в качестве априорных сведений «сигмоид», представленных на рис. 1 в настоящей статье.

Созданное программное обеспечение для определения рационального размера первичной популяции ГА является составной частью автоматизированной системы составления ПГД пассажирских поездов по линиям Московского метрополитена, что является примером реализации микросервисной архитектуры [45] централизованной интеллектуальной системы управления ГРТС.

В числе нерешенных проблем в рамках рассматриваемой задачи остается поиск рациональной схемы для унифицированной генерации «векторов-кодов» в составе первичной популяции заданного размера для различных начальных условий. В настоящее время эта задача решена только для нулевых начальных условий. Известно, что ряд вариантов при такой схеме генерации первичной популяции недостижим. Проверить и численно оценить долю недостижимых ГА вариантов составления ПГД внутри множества всех вариантов, просматриваемых при полном переборе, возможно только по завершении полного перебора вариантов составления ПГД. К настоящему

моменту полный перебор всех возможных вариантов автоматизированного составления ПГД не реализован.

В дальнейшем по тематике исследования планируется уточнение критерия для оценки качества составления ПГД:

- с использованием множества оцениваемых параметров, сформулированных для оценки качества работы внедренного алгоритма автоматизации составления ПГД [39];
- с использованием множества оцениваемых параметров, сформулированных на основе действующих эксплуатационных показателей работы линии метрополитена [17] и изложенных в сборнике Правил технической эксплуатации метрополитенов Российской Федерации.

По итогам проверки адекватности уточненного критерия планируется запуск ГА для быстрого поиска эффективных вариантов составления ПГД в областях, в обозримое время недостижимых имеющимся алгоритмом полного перебора вариантов составления ПГД. ▲

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Комплексное решение задач планирования и управления движением городских рельсовых транспортных средств / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина, и др. // Академик Владимир Николаевич Образцов — основоположник транспортной науки: труды международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета, Москва, 22 октября 2021 года. — М.: Российский университет транспорта, 2021. — С. 56–64.
2. Маркевич А. В. Влияние человеческого фактора на безопасность движения поездов / А. В. Маркевич, В. Г. Сидоренко, М. А. Кулагин // XXVII международная научная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». — М.: РГГУ, 2019. — С. 265–270.
3. Markevich A. V. Automation of scheduling for drivers of the subway rolling stock / A. V. Markevich, V. G. Sidorenko // Proceedings of the 2021 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2021. — Batumi, 2021. — Pp. 1–10.
4. Zhao J. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components / J. Zhao, A. H. Chan, M. P. Burrow // Rail Rapid Transit. — 2009. — Iss. 223. — Pp. 533–541.
5. Ho T. K. Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimization / T. K. Ho, C. W. Tsang, K. H. Ip et al. // Expert System Applications. — 2012. — Vol. 39. — Pp. 861–868.
6. Жербина А. И. Расчет на ЭВМ графика оборота составов метрополитена / А. И. Жербина // Межвузовский сборник. — 1980. — № 612. — С. 105–109.

7. Сидоренко В. Г. Метод эффективного планирования обслуживания с применением теории графов / В. Г. Сидоренко, К. М. Филипченко // Информатизация образования и науки. — 2015. — Т. 4. — № 28. — С. 123–132.
8. Mitchell M. An introduction to genetic algorithms / M. Mitchell. — London: MIT Press, 1999. — 162 p.
9. Феофилов А. Н. Математическая модель составления графиков движения поездов на линиях метрополитена / А. Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. — 1991. — № 7. — С. 10–13.
10. Быков В. П. Теоретические и методологические основы построения систем поддержки принятия решений при управлении движением поездов на участках железных дорог / В. П. Быков. — Хабаровск: ДВГУПС, 1999. — 135 с.
11. Петров А. С. Архитектура многопоточного программного продукта, реализующего планирование логистических процессов / А. С. Петров, В. Г. Сидоренко // Информатизация образования и науки. — 2020. — Т. 1. — № 45. — С. 21–38.
12. Сафронов А. И. Построение планового графика движения для метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Мир транспорта. — 2010. — Т. 9. — № 3(36). — С. 98–105.
13. Дегтярев Д. П. Проблемы визуального анализа графика движения поездов на метрополитене и методы их решения / Д. П. Дегтярев, М. Н. Василенко, О. А. Максименко // Неделя науки — 2002: труды научно-практической конференции. — СПб.: ПГУПС, 2002.
14. Сеславин А. И. Градиентный способ централизованного управления городскими транспортными системами / А. И. Сеславин, Л. Н. Воробьева // Наука и техника транспорта. — 2005. — № 2. — С. 71–73.
15. Сидоренко В. Г. Методы выравнивания интервалов движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, Е. Ю. Рындина // Вестник МИИТа. — 2008. — № 18. — С. 8–10.
16. Сафронов А. И. Оптимизация процедур визуализации графиков движения пассажирских поездов метрополитена / А. И. Сафронов // Trans-Mech-Art-Chem: труды VII Международной научно-практической конференции. — М.: МИИТ, 2010. — С. 315–317.
17. Сафронов А. И. Анализ результатов автоматизированного построения плановых графиков движения поездов по кольцевой линии Московского метрополитена / А. И. Сафронов, А. В. Дудкин // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — М.: РУТ (МИИТ), 2022. — С. 290–297.
18. Баранов Л. А. Построение на ЭВМ графиков движения поездов метрополитена / Л. А. Баранов, А. И. Жербина // Вестник ВНИИЖТа. — 1981. — № 2. — С. 17–20.
19. Сидоренко В. Г. Автоматизация планирования работы ЭПС метрополитена / В. Сидоренко, А. И. Сафронов, К. М. Филипченко // Мир Транспорта. — 2015. — Т. 13. — № 4. — С. 154–165.
20. Чжо М. А. Влияние ночной расстановки составов на режим работы электроподвижного состава метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко, К. М. Филипченко // Электротехника. — 2016. — № 9. — С. 19–25.
21. Пазойский Ю. О. Автоматизация расчета графика работы поездных бригад в пригородном сообщении / Ю. О. Пазойский, С. А. Бывшев; под общ. ред. Ф. П. Кочнева // Межвузовский сборник научных трудов «Оптимизация эксплуатационной работы железных дорог». — 1981. — № 657. — С. 84–90.
22. Баранов Л. А. Внедрение энергосберегающих технологий / Л. А. Баранов, Д. В. Гаев, А. В. Ершов и др. // Мир транспорта. — 2010. — Т. 31. — № 3. — С. 3–8.
23. Моисеев А. А. Энергетически оптимальное управление движением подвижного состава с дискретным регулированием силы тяги / А. А. Моисеев // Межвузовский сборник научных трудов. — 1989. — № 811. — С. 15–19.
24. Сидоренко В. Г. Влияние планового графика движения пассажирских поездов метрополитена на режим работы системы тягового электроснабжения / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Электроснабжение и электрооборудование. — 2014. — Т. 1. — С. 10–13.
25. Чинь Л. М. Влияние модели поезда на выбор энергооптимальных режимов управления современных поездов метрополитена / Л. М. Чинь, Л. А. Баранов, И. С. Мелешин // Вестник МИИТ. — 2010. — № 23. — С. 27–32.
26. Василенко М. Н. Автоматическое построение графиков движения поездов на метрополитене / М. Н. Василенко, Д. П. Дегтярев, О. А. Максименко // Труды международной конференции «Транспорт XXI век». — Варшава, 2001.
27. Логинова Л. Н. Разработка аналитического алгоритма составления расписания движения поездов метрополитена / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — Москва: Российский университет транспорта, 2022. — С. 221–225.
28. Логинова Л. Н. Математические методы и основные принципы организации транспортных перевозок / Л. Н. Логинова, Е. А. Сеславина, А. И. Сеславин // Транспортное дело России. — 2021. — № 4. — С. 84–87.
29. Сидоренко В. Г. Синтез планового графика движения зонного типа / В. Г. Сидоренко, М. В. Новикова // Мир транспорта. — 2010. — № 4. — С. 128–134.
30. Роменский Д. Ю. Постановка задачи выбора мест расположения и емкости путей отстоя составов пригородных и пригородно-городских электропоездов / Д. Ю. Роменский // Наука и техника транспорта. — 2020. — Т. 1. — С. 60–65.
31. Сафронов А. И. Моделирование плана перевозочного процесса в утренний час пик на замкнутой Большой Кольцевой линии Московского метрополитена / А. И. Сафронов, Е. В. Лысенко // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 4. — С. 584–616.
32. Чжо М. А. Планирование обслуживания электроподвижного состава в условиях ограниченных ресурсов / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко, В. М. Алексеев и др. // Электротехника. — 2017. — № 12. — С. 73–76.
33. Чжо М. А. Исследование возможности применения генетических алгоритмов к решению задач планирования работы электроподвижного состава метрополитена / М. А. Чжо, В. Г. Сидоренко // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2017. — № 6. — С. 37–40.
34. Сафронов А. И. Автоматизированное построение планового графика движения пассажирских поездов

- метрополитена / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Вестник РГУПС. — 2012. — № 3(47). — С. 99–104.
35. Сидоренко В. Г. Анализ быстродействия алгоритмов автоматизированного построения планового графика движения пассажирских поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (УКИ'12). — М.: Учреждение Российской академии наук «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН», 2012. — С. 76.
 36. Сеславин А. И. Принципы равномерности в задачах управления потоками пассажирского транспорта / А. И. Сеславин, Е. А. Сеславина // Прикладная информатика. — 2009. — № 2(20). — С. 91–95.
 37. Концевич М. Л. Равномерные расположения / М. Л. Концевич // Квант. — 1985. — № 7. — С. 51–52, 59.
 38. Сафронов А. И. Уровни успешной реализации автоматизированного построения плановых графиков движения пассажирских поездов метрополитена и критерии отбора эффективных результатов / А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко // Проблемы управления безопасностью сложных систем. — М.: РГУ, 2011. — С. 307–311.
 39. Сафронов А. И. Множество оцениваемых параметров результата автоматизированного построения плановых графиков движения поездов и графоаналитические способы их сопоставления / А. И. Сафронов, А. С. Иконников // Интеллектуальные транспортные системы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 26 мая 2022 года. — М.: РУТ (МИИТ). — 2022. — С. 306–315.
 40. Сидоренко В. Г. Сценарное пространство построения планового графика движения поездов метрополитена / В. Г. Сидоренко, А. И. Сафронов // Наука и техника транспорта. — 2012. — № 1. — С. 51–56.
 41. Баландин Д. В. Программный модуль для построения оптимального графика переработки сырья / Д. В. Баландин, О. А. Кузенков, В. К. Вильданов // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2021. — Т. 17. — № 2. — С. 442–452.
 42. Ермаков О. А. Python — как инструмент для анализа данных / О. А. Ермаков, Н. П. Брозгунова // Наука и Образование. — 2020. — Т. 3. — № 4. — С. 26.
 43. Рожков А. В. Экспериментальная математика в КУБГУ — первые результаты / А. В. Рожков // Наука. Информатизация. Технологии. Образование: материалы XIV Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 1–5 марта 2021 года. — Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2021. — С. 163–172.
 44. Буянова И. В. Применение приближения с помощью кривых для определения вычислительной сложности решений задач по программированию / И. В. Буянова, И. С. Замулин // Современные наукоемкие технологии. — 2022. — № 5-2. — С. 232–236.
 45. Новиков В. Г. Микропроцессорные системы управления движением поездов в Московском метрополитене / В. Г. Новиков, А. И. Сафронов, В. А. Кузюков // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 3. — С. 268–293.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 49–62
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-49-62

Application of Genetic Algorithms at Solution of Tasks for Transportation Process Planning of City Rail Transport System

Information about authors

Sidorenko V. G., Doctor in Engineering, Professor, Department Professor.
E-mail: valenfalk@mail.ru

Safronov A. I., PhD in Engineering, Associate Professor, Department Associate Professor.
E-mail: safronov-ai@mail.ru

Russia University of Transport (MIIT), Department “Management and Protection of Information”, Moscow

Abstract: The article investigates the possibility to apply genetic algorithms at automation of planned schedules compilation for subway passenger train traffic. Research main goal – to improve automated system of planned schedule compilation for passenger trains for to provide for processes evenness at the use of various resources and consideration of existing limitations. Necessary definitions of resources and limitations on conditions of genetic algorithm usage are narrowed down to interconnected and unified tables. On probability approach basis, the influence of various combinations of genetic algorithm parameter values on population compositions in the process of search for effective results of transportation process planning for urban rail transport system has been studied. For investigation needs, computer software has been performed on high-level languages *C#* и *Python*. Genetic algorithm adaptation to the solution of the task for compilation automation of planned schedule of subway passenger train traffic has been made and there has been shown the algorithm applicability to automa-

tion of the complex of interconnected tasks for the transportation process planning: electric rolling stock turnout schedule compilation and locomotive team work schedule. There have been calculated probability values to get favorable outcome – the presence of all possible allele values at various combinations of the values of primary population size and allele needed quantity in the results of train traffic planned schedules.

Keywords: genetic algorithm; fitness-function; evenness criteria; primary population size; *python*; urban rail transport system; train traffic schedule; transportation process planning.

References

1. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. *Kompleksnoe reshenie zadach planirovaniya i upravleniya dvizheniem gorodskikh rel'sovykh transportnykh sredstv. Akademik Vladimir Nikolaevich Obratsov osnovopolozhnik transportnoy nauki: trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 125-letiyu universiteta, Moskva, 22 oktyabrya 2021 goda* [Complex solution of problems of planning and traffic control of urban rail vehicles. Academician Vladimir Nikolaevich Obratsov — the founder of transport science: proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of the university, Moscow, October 22, 2021]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2021, pp. 56–64. (In Russian)
2. Markevich A. V., Sidorenko V. G., Kulagin M. A. Vliyaniye chelovecheskogo faktora na bezopasnost' dvizheniya poezdov [Influence of the human factor on the safety of train traffic]. *XXVII mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya "Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem"* [XXVII international scientific conference “Problems of managing the safety of complex systems”]. M.: RGGU Publ., 2019, pp. 265–270. (In Russian)
3. Markevich A. V., Sidorenko V. G. Automation of scheduling for drivers of the subway rolling stock. Proceedings of the 2021 IEEE East-West Design and Test Symposium, EWDTs 2021. Batumi, 2021, pp. 1–10.

4. Zhao J., Chan A. H., Burrow M. P. A genetic-algorithm-based approach for scheduling the renewal of railway track components. *Rail Rapid Transit*. 2009, Iss. 223, pp. 533–541.
5. Ho T. K., Tsang C. W., Ip K. H. et al. Train service timetabling in railway open markets by particle swarm optimization. *Expert System Applications*, 2012, vol. 39, pp. 861–868.
6. Zherbina A. I. Raschet na EVM grafika oborota sostavov metropolitena [Calculation on the computer of the schedule of turnover of subway trains]. *Mezhvuzovskiy sbornik* [Interuniversity collection]. 1980, Iss. 612, pp. 105–109. (In Russian)
7. Sidorenko V. G., Filipchenko K. M. Metod effektivnogo planirovaniya obsluzhivaniya s primeneniem teorii grafov [Efficient service planning method using graph theory]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of education and science]. 2015, vol. 4, Iss. 28, pp. 123–132. (In Russian)
8. Mitchell M. An introduction to genetic algorithms. London: MIT Press Publ., 1999. 162 p.
9. Feofilov A. N. Matematicheskaya model' sostavleniya grafikov dvizheniya poezdov na liniyakh metropolitena [Mathematical model for scheduling trains on metro lines]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 1991, Iss. 7, pp. 10–13. (In Russian)
10. Bykov V. P. *Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy postroeniya sistem podderzki prinyatiya resheniy pri upravlenii dvizheniem poezdov na uchastkakh zheleznykh dorog* [Theoretical and methodological foundations for constructing decision support systems in the management of train traffic on sections of railways]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 1999, 135 p. (In Russian)
11. Petrov A. S., Sidorenko V. G. Arkhitektura mnogopotochnogo programmnoho produkta, realizuyushchego planirovanie logisticheskikh protsessov [The architecture of a multi-threaded software product that implements the planning of logistics processes]. *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* [Informatization of education and science]. 2020, vol. 1, Iss. 45, pp. 21–38. (In Russian)
12. Safronov A. I., Sidorenko V. G. Postroenie planovogo grafika dvizheniya dlya metropolitena [Construction of a planned traffic schedule for the subway]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2010, vol. 9, Iss. 3(36), pp. 98–105. (In Russian)
13. Degtyarev D. P., Vasilenko M. N., Maksimenko O. A. *Problemy vizual'nogo analiza grafika dvizheniya poezdov na metropolitene i metody ikh resheniya. Nedelya nauki 2002: trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of visual analysis of the subway train schedule and methods of their solution. Week of Science — 2002: Proceedings of the Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2002. (In Russian)
14. Soslavin A. I., Vorob'eva L. N. Gradientnyy sposob tsentralizovannogo upravleniya gorodskimi transportnymi sistemami [Gradient method of centralized management of urban transport systems]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2005, Iss. 2, pp. 71–73. (In Russian)
15. Sidorenko V. G., Ryndina E. Yu. Metody vyvazhivaniya intervalov dvizheniya poezdov metropolitena [Methods for leveling the intervals of movement of metro trains]. *Vestnik MIITa* [Vestnik MIIT]. 2008, Iss. 18, pp. 8–10. (In Russian)
16. Safronov A. I. *Optimizatsiya protsedur vizualizatsii grafikov dvizheniya passazhirskikh poezdov metropolitena. TRANS-MECH-ART-CHEM: trudy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Optimization of procedures for visualization of metro passenger train schedules. Trans-Mech-Art-Chem: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference]. M.: MIIT Publ., 2010, pp. 315–317. (In Russian)
17. Safronov A. I., Dudkin A. V. *Analiz rezul'tatov avtomatizirovannogo postroeniya planovykh grafikov dvizheniya poezdov po kol'tsevoy linii Moskovskogo metropolitena. Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Analysis of the results of automated construction of planned schedules for the movement of trains along the Moscow metro ring line. Intelligent transport systems: materials of the International scientific and practical conference, Moscow, May 26, 2022]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2022, pp. 290–297. (In Russian)
18. Baranov L. A., Zherbina A. I. Postroenie na EVM grafikov dvizheniya poezdov metropolitena [Construction of metro train schedules on a computer]. *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT]. 1981, Iss. 2, pp. 17–20. (In Russian)
19. Sidorenko V. G., Safronov A. I., Filipchenko K. M. Avtomatizatsiya planirovaniya raboty EPS metropolitena [Automation of scheduling the operation of the EPS of the metro]. *Mir Transporta* [World of Transport]. 2015, vol. 13, Iss. 4, pp. 154–165. (In Russian)
20. Chzho M. A., Sidorenko V. G., Filipchenko K. M. Vliyaniye nochnoy rasstanovki sostavov na rezhim raboty elektropodvizhnogo sostava metropolitena [Influence of the night arrangement of trains on the operating mode of the electric rolling stock of the subway]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2016, Iss. 9, pp. 19–25. (In Russian)
21. Pazoyskiy Yu. O., Byvshev S. A. Avtomatizatsiya rascheta grafika raboty poezdnykh brigad v prigorodnom soobshchenii; pod obshch. red. F. P. Kochneva [Automation of the calculation of the work schedule of train crews in suburban traffic; ed. F. P. Kochneva]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov "Optimizatsiya ekspluatatsionnoy raboty zheleznykh dorog"* [Interuniversity collection of scientific papers "Optimization of the operational work of railways"]. 1981, Iss. 657, pp. 84–90. (In Russian)
22. Baranov L. A., Gaev D. V., Ershov A. V. et al. Vnedrenie energosberegayushchikh tekhnologiy [Implementation of energy-saving technologies]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2010, vol. 31, Iss. 3, pp. 3–8. (In Russian)
23. Moiseev A. A. Energeticheski optimal'noye upravleniye dvizheniem podvizhnogo sostava s diskretnym regulirovaniem sily tyagi [Energy-optimal control of the movement of rolling stock with discrete control of traction]. *Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Interuniversity collection of scientific papers]. 1989, Iss. 811, pp. 15–19. (In Russian)
24. Sidorenko V. G., Safronov A. I. Vliyaniye planovogo grafika dvizheniya passazhirskikh poezdov metropolitena na rezhim raboty sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya [Influence of the planned schedule of movement of metro passenger trains on the mode of operation of the system]. *Elektrosnabzheniye i elektrooborudovaniye* [Power supply and electrical equipment] 2014, vol. 1, pp. 10–13. (In Russian)
25. Chin' L. M., Baranov L. A., Meleshin I. S. Vliyaniye modeli poezda na vybor energooptimal'nykh rezhimov upravleniya sovremennykh poezdov metropolitena [Influence of a train model on the choice of energy-optimal control modes for modern metro trains]. *Vestnik MIIT* [Vestnik MIIT]. 2010, Iss. 23, pp. 27–32. (In Russian)
26. Vasilenko M. N., Degtyarev D. P., Maksimenko O. A. Avtomaticheskoye postroenie grafikov dvizheniya poezdov na metropolitene [Automatic scheduling of trains on the subway]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii "Transport XXI vek"* [Proceedings of the international conference "Transport XXI century"]. Varshava, 2001. (In Russian)
27. Loginova L. N., Soslavina E. A., Soslavin A. I. *Razrabotka analiticheskogo algoritma sostavleniya raspisaniya dvizheniya poezdov metropolitena. Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Development of an analytical algorithm for scheduling the movement of metro trains. Intelligent transport systems: materials of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, May 26, 2022]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2022, pp. 221–225. (In Russian)
28. Loginova L. N., Soslavina E. A., Soslavin A. I. Matematicheskie metody i osnovnye printsipy organizatsii transportnykh perevozok [Mathematical methods and basic principles of organization of transportation]. *Transportnoye delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2021, Iss. 4, pp. 84–87. (In Russian)
29. Sidorenko V. G., Novikova M. V. Sintez planovogo grafika dvizheniya zonnogo tipa [Synthesis of a zone-type planned traffic schedule]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2010, Iss. 4, pp. 128–134. (In Russian)
30. Romenskiy D. Yu. Postanovka zadachi vybora mest raspolozheniya i emkosti putey otstoya sostavov prigorodnykh i prigorodno-gorodskikh elektropoezdov [Statement of the problem of choosing the location and capacity of the sludge tracks of suburban

- and suburban-urban electric trains]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and technology of transport]. 2020, vol. 1, pp. 60–65. (In Russian)
31. Safronov A. I., Lysenko E. V. Modelirovanie plana perevoznogo protsessa v utrenniy chas pik na zamknoy Bol'shoy Kol'tsevoy linii Moskovskogo metropolitena [Modeling the plan of the transportation process in the morning rush hour on the closed Bolshaya Koltsevaya line of the Moscow metro]. *Avtomatika na transporte* [Automation on Transport]. 2021, vol. 7, Iss. 4, pp. 584–616. (In Russian)
32. Chzho M. A., Sidorenko V. G., Alekseev V. M. et al. Planirovanie obsluzhivaniya elektropodvizhnogo sostava v usloviyakh ogranichennykh resursov [Planning maintenance of electric rolling stock in conditions of limited resources]. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. 2017, Iss. 12, pp. 73–76. (In Russian)
33. Chzho M. A., Sidorenko V. G. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadach planirovaniya raboty elektropodvizhnogo sostava metropolitena [Study of the possibility of using genetic algorithms to solve the problems of planning the work of the electric rolling stock of the subway]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2017, Iss. 6, pp. 37–40. (In Russian)
34. Safronov A. I., Sidorenko V. G. Avtomatizirovannoe postroenie planovogo grafika dvizheniya passazhirskikh poezdov metropolitena [Automated construction of a planned schedule for the movement of metro passenger trains]. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of PGUPS]. 2012, Iss. 3(47), pp. 99–104. (In Russian)
35. Sidorenko V. G. Analiz bystrodeystviya algoritmov avtomatizirovannogo postroeniya planovogo grafika dvizheniya passazhirskikh poezdov metropolitena [Analysis of the speed of algorithms for automated construction of a planned schedule for the movement of metro passenger trains]. *Tekhnicheskie i programnye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya (UKI'12)* [Technical and software tools for control, monitoring and measurement systems (UKI'12)]. Moscow: Uchrezhdenie Rossiyskoy akademii nauk "Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN" Publ., 2012, p. 76. (In Russian)
36. Seslavin A. I., Seslavina E. A. Printsipy ravnomernosti v zadachakh upravleniya potokami passazhirskogo transporta [Principles of uniformity in the problems of passenger transport flow control]. *Prikladnaya informatika* [Applied Informatics]. 2009, Iss. 2(20), pp. 91–95. (In Russian)
37. Kontsevich M. L. Ravnomernye raspolozheniya [Uniform arrangements]. *Kvant* [Kvant]. 1985, 7, pp. 51–52, 59. (In Russian)
38. Safronov A. I., Sidorenko V. G. Urovni uspezhnoy realizatsii avtomatizirovannogo postroeniya planovykh grafikov dvizheniya passazhirskikh poezdov metropolitena i kriterii otbora effektivnykh rezul'tatov [Successful implementation levels of automated construction of planned schedules for the movement of metro passenger trains and criteria for selecting effective results]. *Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem* [Problems of managing the safety of complex systems]. Moscow: RGGU Publ., 2011, pp. 307–311. (In Russian)
39. Safronov A. I., Ikonnikov A. S. Mnozhestvo otsenivaemykh parametrov rezul'tata avtomatizirovannogo postroeniya planovykh grafikov dvizheniya poezdov i grafoanaliticheskie sposoby ikh sopostavleniya [A set of estimated parameters of the result of automated construction of scheduled train schedules and graphic-analytical methods for their comparison]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 26 maya 2022 goda* [Intelligent transport systems: materials of the International scientific and practical conference, Moscow, 26 May, 2022]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2022, pp. 306–315. (In Russian)
40. Sidorenko V. G., Safronov A. I. Stsenarnoe prostranstvo postroeniya planovogo grafika dvizheniya poezdov metropolitena [Scenario space for constructing a planned schedule for the movement of metro trains]. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology of Transport]. 2012, Iss. 1, pp. 51–56. (In Russian)
41. Balandin D. V., Kuzenkov O. A., Vil'danov V. K. Programmnyy modul' dlya postroeniya optimal'nogo grafika pererabotki syr'ya [Software module for constructing an optimal raw material processing schedule]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern information technologies and IT education]. 2021, vol. 17, Iss. 2, pp. 442–452. (In Russian)
42. Ermakov O. A., Brozgunova N. P. Python kak instrument dlya analiza dannykh [Python as a tool for data analysis]. *Nauka i Obrazovanie* [Science and Education]. 2020, vol. 3, Iss. 4, pp. 26. (In Russian)
43. Rozhkov A. V. Eksperimental'naya matematika v KUBGU pervye rezul'taty. *Nauka. Informatizatsiya. Tekhnologii. Obrazovanie: materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Ekaterinburg, 1–5 marta 2021 goda* [Experimental mathematics at KUBGU — first results. Nauka. Informatization. Technologies. Education: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, March 1–5, 2021]. Ekaterinburg: Rossiyskiy gosudarstvennyy professional'no-pedagogicheskiy universitet Publ., 2021, pp. 163–172. (In Russian)
44. Buyanova I. V., Zamulin I. S. Primenenie priblizheniya s pomoshch'yu krivykh dlya opredeleniya vychislitel'noy slozhnosti resheniy zadach po programmirovaniyu [Application of approximation using curves to determine the computational complexity of solutions to programming problems]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies]. 2022, Iss. 5-2, pp. 232–236. (In Russian)
45. Novikov V. G., Safronov A. I., Kuzukov V. A. Mikroprotsessornye sistemy upravleniya dvizheniem poezdov v Moskovskom metropolitene [Microprocessor control systems for train traffic in the Moscow Metro]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2020, vol. 6, Iss. 3, pp. 268–293. (In Russian)