

УДК 656.25:004.021

Д. В. Сперанский, д-р техн. наук

А. В. Горелик, д-р техн. наук

А. В. Орлов, канд. техн. наук

*Кафедра «Системы управления транспортной инфраструктурой»,
Российский университет транспорта, Москва*

ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕСУРСОВ В ОБЛАСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

В статье рассмотрена общая задача оптимального распределения ресурсов подразделений, занимающихся эксплуатацией систем железнодорожной автоматики и телемеханики, для минимизации ущерба, вызванного их ненадежной работой. Предложена математическая модель для ее решения, являющаяся аналогом табличной (матричной) модели, используемой для решения классической транспортной задачи. В качестве метода решения описан адаптированный к рассматриваемой задаче оптимизации метод потенциалов, который детально проиллюстрирован на конкретном примере, приведен подробный пошаговый алгоритм поиска наилучшего решения. В статье также приведены формулировки различных разновидностей задач оптимального распределения ресурсов с возможностью применения «транспортного» подхода, которые возникают в процессе организации работ по технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики. Они представляют самостоятельный интерес с точки зрения практических приложений. Кроме того, рассмотрен перечень других методов решения классической транспортной задачи, применимых для задач небольшой размерности.

Поскольку транспортные задачи на практике имеют как раз большие размерности и являются ресурсоемкими, в статье содержится краткий анализ последних публикаций, описывающих возможные подходы к решению. Среди них упомянуты метод снижения размерности и метод последовательной сепарации, которые, по мнению авторов, позволяют сократить сложность вычислений в терминах памяти и времени. Особое внимание уделено перспективности использования эволюционных вычислений, в частности генетических алгоритмов, которые являются итерационными и выдают приближенное решение, стремящееся к оптимальному с ростом числа итераций, что позволяет прерывать расчет при достижении требуемого порядка точности. Также рассматривается возможность применения к генетическим алгоритмам технологии параллельного программирования для прикладных задач оптимального распределения ресурсов по критерию минимизации потерь поездочасов или финансовых потерь, вызванных ненадежной работой при эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры.

Распределение ресурсов, эффективное управление, техническое обслуживание, системы автоматики и телемеханики, классическая транспортная задача, методы оптимизации, задачи большой размерности

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-184-203

Введение

Проблема оптимизации различного рода ресурсов была и остается актуальной во все времена и во всех областях производственной деятельности. Не менее

острой она остается, в частности, при организации технического обслуживания систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ). Важность поиска эффективного решения для этой сферы объясняется значительными масштабами использования ЖАТ на железнодорожном транспорте. На сети российских железных дорог в эксплуатации находится более 136 тысяч стрелочных электроприводов, более 270 тысяч светофоров, более 28 тысяч автошлагбаумов, множество других систем и устройств [1]. В компании ОАО «Российские железные дороги» планированием технического обслуживания систем ЖАТ и их эксплуатацией занимаются структурные подразделения хозяйства автоматики и телемеханики разного уровня иерархии. В условиях ограниченности ресурсов (финансовых, материальных и др.) и высокой в них потребности для обеспечения требуемого уровня качества функционирования систем ЖАТ проблемы оптимизации ресурсов приобретают особую важность. Трудности в решении этой проблемы для систем ЖАТ усугубляются рядом факторов. К ним относятся недостаточное качество их технической эксплуатации из-за нехватки необходимых ресурсов (несвоевременная замена оборудования, несоблюдение сроков капитального ремонта), превышение назначенного срока службы и т. п. В конечном счете все это сказывается на существенном изменении таких важнейших свойств систем ЖАТ, как надежность и безопасность функционирования, а также сопряженных с этим рисков. Проблема повышения надежности систем ЖАТ всегда вызывала интерес; ряд результатов в данной области приведен в работах [2–11].

Из сказанного вытекает необходимость разработки методов решения задачи оптимального распределения ограниченных ресурсов для организации технического обслуживания систем ЖАТ межструктурными подразделениями и внутри них. Очевидно, что большое число структурных подразделений и систем ЖАТ в границах их производственной деятельности приводит к значительному росту размерности задачи. Это «проклятие размерности», как правило, не позволяет получить не только оптимального, но в большинстве случаев и просто «хорошего» решения, ранее получаемого эмпирическими методами или методами экспертных оценок. Отсюда следует вывод о необходимости разработки математических методов решения задачи оптимального распределения ресурсов, в т. ч. для задач большой размерности, гарантирующих получение либо точного, либо близкого к точному решения. Предлагаемая статья посвящена исследованию именно этих вопросов.

Постановка задачи и методы ее решения

Начнем с описания реальной ситуации, постоянно возникающей при обслуживании систем ЖАТ. Для упрощения рассмотрим один из видов устройств ЖАТ, функционирующих на станциях, например вышеупомянутые стрелочные электроприводы (далее — системы ЖАТ). В границах производственной деятельности структурных подразделений находятся системы ЖАТ, функционирующие на

нескольких станциях. Для каждой из систем ЖАТ известен эффект от проведения различных мероприятий на единицу оборудования (систему). Пусть к каждому стрелочному электроприводу может быть применен следующий перечень мероприятий, изменяющих в разной мере эффект функционирования системы в целом: текущий ремонт на месте (М), ремонт в условиях ремонтно-технологического участка (Р), перестановка в более легкие условия эксплуатации (П).

Из-за ограниченности ресурсов в течение заданного планового периода структурное подразделение может реализовать ограниченное количество мероприятий каждого вида. Требуется так распределить мероприятия по системам ЖАТ, чтобы результирующий эффект был максимальным (минимальным).

Сформулированную задачу далее будем называть задачей распределения ресурсов (ЗРР).

В качестве эффекта для исследуемой задачи может рассматриваться изменение значения риска экономических потерь, вызванных возможными отказами систем ЖАТ, показателя надежности, остаточного ресурса, производительности и т. п. [12,13].

Сформулированная задача является оптимизационной. В зависимости от выбранного критерия эффекта функционирования решение оптимизационной задачи может сводиться к поиску либо минимума, либо максимума. Далее рассматривается пример для случая минимизации критерия суммарного эффекта. Если требуется решить задачу максимизации критерия суммарного эффекта, то возможность перехода к ней от предыдущей задачи вполне очевидна.

Для некоторой конкретной задачи может существовать несколько различных подходов, на основе которых разрабатываются разные методы решения. Покажем, что сформулированная нами задача может быть интерпретирована как один из вариантов классической транспортной задачи Монжа-Канторовича.

Исследованию транспортной задачи посвящено большое число публикаций. Хотя обзор литературы находится вне рамок нашей статьи, укажем тем не менее несколько известных монографий [14–18], либо полностью, либо в значительной мере посвященных транспортной задаче.

В действительности под общим названием «транспортная задача» объединяется широкий круг задач с единой математической моделью. Классическая транспортная задача — о наиболее экономном плане перевозок однородного продукта из пунктов хранения в пункты потребления, она встречается в практических приложениях линейного программирования.

Возвращаясь к сформулированной задаче, отметим следующее. Различные мероприятия с системами ЖАТ, функционирующими на заданном множестве станций, можно интерпретировать как поставки грузов (мероприятий) на эти станции, а сами станции (точнее, системы ЖАТ, функционирующие на них) выступают в роли потребителей. Так, если в качестве эффекта от проводимых мероприятий на конкретной станции использовать изменение риска экономических потерь, то задача сводится к получению его минимального значения.

При этом предполагается, что на общее число мероприятий каждого типа, выполняемых в плановый период, накладываются ограничения (возможности подразделений не безграничны). Нас интересует только конечный результат (минимальное значение риска), а не то, каким путем он достигнут. Понятно, что в общем случае искомый минимум риска в плановый период на каждой конкретной станции может быть достигнут несколькими способами. Один способ от другого отличается как перечнем мероприятий, так и числом реализации каждого мероприятия из перечня. Отсюда следует, что различные мероприятия с системами ЖАТ, функционирующими на рассматриваемом множестве станций, можно интерпретировать как поставки грузов (мероприятий) на эти станции, а сами станции (точнее, системы ЖАТ, функционирующие на них) выступают в роли потребителей. В силу сказанного выше все множество мероприятий можно рассматривать как однородный груз, а сформулированная задача при предложенной интерпретации свелась к классической транспортной задаче.

Заметим, что сформулированная выше ЗРР имеет явно выраженную специфику, обусловленную особенностями распределяемого «груза» (ремонтных мероприятий) и потребностями в нем станций, эксплуатирующих системы ЖАТ.

Ниже будет показана перспективность не только идеи предложенного «транспортного» подхода к решению ЗРР, но и возможности разработки методов решения соответствующих задач большой размерности.

Обратимся теперь к классической транспортной задаче (ТЗ), для решения которой применялись различные подходы и на их основе разработаны различные методы. Так, ТЗ может быть решена симплексным методом [15,17,19], но матрица ограничений задачи очень специфична. Используя эту специфику, удалось разработать специальные методы решения ТЗ, оказавшиеся по трудоемкости эффективнее симплекс-метода.

Известно, что условия ТЗ могут быть представлены в разной форме. Так, возможно представление условий в виде сети или графа, а также в матричной (табличной) форме. Очевидно, что в зависимости от выбранной формы представления условий ТЗ возможны и разные методы решения.

Кратко остановимся на различных методах решения ТЗ. Если условия задачи представлены в виде сети или графа, то для этой формы представления разработаны метод критических путей, а также метод сетевого графика. С детальным описанием этих методов можно ознакомиться в [20].

Для той же формы представления условий ТЗ разработан так называемый венгерский алгоритм [15] ее решения. Он базируется на использовании теории потоков в транспортных сетях (создатели Л. Форд и Д. Фалкерсон) [21]. К «сетевому» также относится так называемый метод вычеркивания циклов.

Разработано много методов решения ТЗ, условия которой представлены в матричной (табличной) форме. Эти методы можно разделить на два класса: приближенные и точные. К приближенным относятся, например, метод северо-западного угла, метод минимального элемента (минимальной стоимости), метод

двойного предпочтения, метод аппроксимации Фогеля [14–18]. К классу точных методов относятся метод потенциалов [14–18], метод дифференциальных рент и дельта-метод.

Из перечисленных выше матричных приближенных методов решения ТЗ самым быстрым и простым является метод северо-западного угла. Однако он не учитывает стоимости перевозки грузов и потому полученные с его помощью решения, как правило, далеки от оптимальных. Остальные приближенные методы обеспечивают решения более высокого качества. Что касается точных матричных методов решения ТЗ, то, к сожалению, все они довольно трудоемки. Отметим, что наиболее часто используемым и популярным среди них является метод потенциалов. В следующем разделе опишем применение этого метода к решению рассматриваемой нами ЗРР.

Метод потенциалов для решения задачи распределения ресурсов

Обратимся к формулировке ЗРР, приведенной в начале предыдущего раздела. Метод потенциалов для ее решения будет проиллюстрирован на конкретном примере. Дальнейшее изложение предполагает знакомство читателя с методом потенциалов применительно к ТЗ. В нем «потребителями» будут пять станций А, Б, В, Г, Д, а «поставщиками» предоставляют возможность проведения трех видов мероприятий, описанных выше и обозначенных как М, Р, П. Исходные данные для рассматриваемого примера представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1

Виды мероприятий	Станционные системы					План мероприятий
	А	Б	В	Г	Д	
Ремонт на месте (М)	3	1	3	3	1	2
Ремонт в РТУ (Р)	2	1	0	3	2	3
Перестановка (П)	1	0	0	2	1	2
Потребность	4	2	1	2	3	

Возможности структурного подразделения на плановый период

Количество устройств, для которых по результатам обследования требуется реализация мероприятий

Эффект от мероприятия с единицей оборудования

Прокомментируем данные, приведенные в таблице 1 за рассматриваемый плановый период. За этот период, как указано в последнем столбце таблицы 1, структурные подразделения, выполняющие мероприятия разных типов (М, Р, П), могут провести два ремонта на месте (М), три устройства отправить для ремонта в РТУ (Р) и еще два могут переставить в более легкие условия эксплуатации (П). Эффект от конкретного мероприятия для одного устройства, указанный в правом верхнем углу клетки таблицы, должен быть положительным целым числом. Если эффект выражен дробным числом, то требуется произвести масштабирование данных за счет умножения на коэффициент, равный степени 10, таким образом, чтобы дробь стала целым числом.

Решение ЗРР состоит из трех этапов: первоначальные преобразования таблицы планов-потребностей, первоначальная загрузка клеток, поиск оптимального решения.

1) Первоначальные преобразования таблицы

Выполним проверку соответствия плана мероприятий таблицы 1 потребностям, вычислив следующие величины:

- количество мероприятий по плану $N = 2 + 3 + 2 = 7$;
- потребность в количестве мероприятий $M = 4 + 2 + 1 + 2 + 3 = 12$.

Так как $N \neq M$, то план является открытым и все потребности не удовлетворяются. Поэтому введем дополнительную строку в таблицу 1 (необеспеченность), в которой указывается разность R между количеством запланированных мероприятий и требуемым количеством ($R = 12 - 7 = 5$).

В новой строке эффекты для всех станций (А, Б, В, Г, Д) задаются в виде одинакового числа 0. Тогда на основе таблицы 1 строится таблица 2.

2) Первоначальная загрузка клеток

Первоначальная загрузка клеток таблицы позволяет составить опорный план мероприятий, представляющий собой начальное приближенное решение задачи оптимизации, на основе которого в дальнейшем будут генерироваться более близкие к оптимуму решения.

Таблица 2

Виды мероприятий	Станционные системы					План мероприятий
	А	Б	В	Г	Д	
Ремонт на месте (М)	3	1	2	3	1	2
Ремонт в РТУ (Р)	2	1	0	3	2	3
Перестановка (П)	1	0	0	2	1	2
Необеспеченность (Н)	0	0	0	0	0	5
Потребность	4	2	1	2	3	

Первоначальная загрузка клеток может выполняться различными приближенными методами. Результат оптимизации от выбора метода первоначальной загрузки клеток не зависит, но влияет на число выполняемых итераций для получения оптимального решения.

Вне зависимости от применяемого способа первоначальная загрузка клеток выполняется по следующей схеме: сначала весь запас из плана полностью заносится в некоторую клетку. Если запас превышает потребность объекта ЖАТ (соответствующего столбца), то разность между потребностью и запасом переносится в любую другую клетку строки.

Например, в строке «Р» таблицы 2 указанный в последнем столбце запас равен трем единицам. Допустим, что загрузка клеток выполняется по методу минимального ненулевого эффекта в углах клеток. Тогда минимум эффекта в строке «Р» находится в клетке (Б, Р) столбца «Б», и он равен 1. Потребность в столбце «Б» равна 2, а запас в строке «Р» равен 3. Следовательно, в клетку (Б, Р) следует поместить 2 единицы, а остаток запаса, равный 1, — в любую другую клетку строки с минимальным эффектом, то есть либо в (А, Р), либо в (Д, Р). Если запаса в соответствующей строке недостаточно для покрытия потребности, то недостаток пополняется в следующей строке.

Следует отметить, что в некоторых случаях метод минимального элемента позволяет еще на этапе первоначальной загрузки получить решение, близкое к оптимальному, поэтому далее воспользуемся им. Загрузку клеток выполним последовательно, начиная с верхней строки. Результат первоначальной загрузки представлен в таблице 3.

Первой загрузим клетку (Д, М). Недостаток потребности столбца «Д» компенсируем в клетке (Д, П) строки «П». Остаток запаса строки «П» занесем в клетку (А, П). В строке (Р) минимальный эффект находится в клетке (Б, Р).

Таблица 3

Виды мероприятий	Станционные системы					План мероприятий (запас)			
	А	Б	В	Г	Д				
Ремонт на месте (М)		3	1	2	3	2	1	2-2 → 0	
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1	0	3		2	3-2 → 1 1-1 → 0
Перестановка (П)	1	1	0	0	0	2	1	1	2-1 → 1 1-1 → 0
Необеспеченность (Н)	2	0	0	1	0	2	0	0	5
Потребность	4-1 → 3 3-1 → 2 2-2 → 0	2-2 → 0	1-1 → 0	2-2 → 0	3-2 → 1 1-1 → 0				

Внесем в нее запас в размере потребности столбца «Б», равной 2 единицам. Остаток запаса строки «Р» внесем в клетку (А, Р). По остаточному принципу заполняем строку «Н», которая вводится как дополнение к прежним строкам. Загруженные клетки закрасим оранжевым цветом.

Для того чтобы оптимизационная задача имела решение, в теории на каждом шаге должно быть закрашено $N + M - 1$ клеток, то есть $4 + 5 - 1 = 8$. Как видно из таблицы 3, после первоначальной загрузки закрашено ровно 8 клеток, и, следовательно, дополнительных преобразований не требуется. Если количество загруженных клеток отличается от требуемого, то невозможно правильно расставить потенциалы. Так, при недостатке загруженных клеток для некоторых областей таблицы потенциалы будут не определены, а при избытке они в отдельных областях будут противоречивыми.

Для устранения указанной проблемы необходимо загрузить нулями недостающее количество клеток, не входящих в замкнутые контуры, либо освободить избыточное количество клеток с нулями. При этом загрузка нулями отображается в явном виде в соответствующей клетке.

Данных в таблице 3 достаточно для запуска процесса поиска оптимального решения. Вместе с тем для оценки результативности метода на каждом шаге будем выполнять расчет достигнутого суммарного эффекта. Его будем находить путем умножения загрузки клетки на ее эффект и сложения полученных чисел по всем загруженным клеткам.

Для первоначальной загрузки клеток, показанной в таблице 3, суммарный эффект есть:

$$\begin{aligned} \Theta &= 2 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = \\ &= 2 + 2 + 2 + 1 + 1 + 0 + 0 + 0 = 8 \text{ ед.} \end{aligned}$$

3) Поиск оптимального решения

Поиск оптимального решения выполним методом потенциалов. На основе потенциалов формируется критерий оптимального решения. Кроме того, в результате вычисления потенциалов определяются клетки, загрузку которых следует изменить в первую очередь, если решение не оптимально. Первоначально потенциалы вычисляются по загруженным клеткам, а затем на их основе вычисляются потенциалы незагруженных клеток. Признаком оптимального решения является неотрицательность потенциалов всех незагруженных клеток. В качестве клеток, для которых требуется изменить загрузку при поиске оптимального решения, выступают незагруженные клетки с наибольшим отрицательным потенциалом.

Важно, что при расстановке потенциалов величина загрузки в загруженных клетках не учитывается, а используются только эффекты (тарифы) в углах этих клеток (обозначим их как c_{ij}). Потенциалы строк и столбцов обозначим соответственно как U_i и V_j .

Опишем правило расстановки потенциалов: у всех загруженных клеток результирующий потенциал всегда должен быть равен нулю:

$$z_{ij} = c_{ij} + U_i + V_j = 0. \quad (1)$$

При вычислении потенциалов один из них задается произвольным образом (как правило, его полагают равным 0). Все остальные потенциалы строк и столбцов вычисляются так, чтобы выполнялось равенство (1).

Далее поиск оптимального решения производится по следующему алгоритму.

1. Выполняется первоначальная расстановка потенциалов.
2. Выполняется проверка оптимальности решения.
3. Если полученное решение оптимально, следует перейти к пункту 6, иначе осуществляется поиск нового решения путем формирования контура и перераспределения загрузки клеток, а далее — переход к пункту 4.
4. Выполняется расстановка потенциалов.
5. Осуществляется переход к пункту 2.
6. Окончание поиска оптимального решения.

Для нашего примера зададим потенциал столбца U_1 равным 0 и определим потенциалы остальных строк и столбцов на основе равенства (1). Результат всех этих преобразований представлен в таблице 4.

Для проверки оптимальности плана вычислим потенциалы свободных клеток по формуле (1) с учетом потенциалов строк и столбцов в таблице 3. Полученные результаты представлены в таблице 5.

В таблице 5 имеются свободные клетки с отрицательными потенциалами. Следовательно, план не оптимален и его требуется улучшить. Клеткой, имеющей максимальное значение отрицательного потенциала, является (В, Р). Ее потенциал равен 2. Нужно осуществить изменение загрузки клеток, где клетка (В, Р) будет загружена. Для этого необходимо сформировать цикл перераспределения загрузки клеток. Цикл представляет собой замкнутый контур, получаемый из вертикальных и горизонтальных отрезков прямых. Цикл строят по загруженным клеткам, к которым добавляют одну свободную, участвующую в перераспределении загрузки. На каждой входящей в цикл клетке выполняется его поворот на 90 градусов, при этом цикл может иметь самопересечения. Возможные примеры формы циклов представлены на рисунке 1.

Таблица 4

Виды мероприятий	Станционные системы					V_j					
	А	Б	В	Г	Д						
Ремонт на месте (М)		3		1		2	3	2	1	-1	
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1		0		3		2	-2
Перестановка (П)	1	1		0		0		2	1	1	-1
Необеспеченность (Н)	2	0		0	1	0	2	0		0	0
U_i	0		1		0		0		0		

Таблица 5

Виды мероприятий	Станционные системы										V_j
	А		Б		В		Г		Д		
Ремонт на месте (М)	(2)	3	(1)	1	(1)	2	(2)	3	2	1	-1
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1	(-2)	0	(1)	3	(0)	2	-2
Перестановка (П)	1	1	(0)	0	(-1)	0	(1)	2	1	1	-1
Необеспеченность (Н)	2	0	(1)	0	1	0	2	0	(0)	0	0
U_i	0		1		0		0		0		

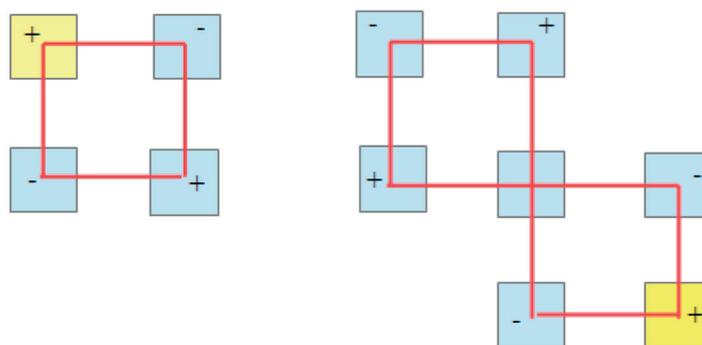


Рис. 1. Пример цикла перераспределения загрузки клеток

Свободная клетка, включенная в цикл, отмечена желтым цветом. В пределах цикла задают знаки, определяющие процесс перезагрузки ячеек. Плюс означает увеличение загрузки клетки, а минус — ее уменьшение (разгрузку). Вновь включенная (желтая) клетка всегда имеет знак (+). Далее в цикле знаки чередуют («+» изменяют на «-» и наоборот) на каждом следующем его повороте. При правильном формировании цикла не должно возникать двух одинаковых знаков у двух соседних изломов, а шаг должен оставаться постоянным.

Сформируем цикл таблицы 5 с учетом новой клетки (В, Р). Результат представлен в таблице 6.

Для выполнения перезагрузки клеток в цикле находят клетки с отрицательным знаком перезагрузки (-). Среди них находят ту, загрузка которой минимальна. Эта загрузка прибавляется к загрузке всех клеток, у которых указан положительный знак перезагрузки (+), и вычитается из клеток с отрицательным знаком перезагрузки (-).

В таблице 6 обе клетки с отрицательным знаком имеют одинаковую загрузку, равную 1. Следовательно, единицу нужно вычесть из загрузки всех клеток, обозначенных как (-), и прибавить к загрузке клеток, обозначенных как (+).

Чтобы сохранилось количество клеток в плане, равное 8, нужно будет освободить одну из ранее загруженных клеток с загрузкой 0. Результат перераспределения загрузки клеток представлен в таблице 7. Таким образом, освобождена клетка (В, Н).

Таблица 6

Виды мероприятий	Станционные системы					V_j				
	А	Б	В	Г	Д					
Ремонт на месте (М)		3		1		2	3	2	1	
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1		0		3		2
Перестановка (П)	1	1		0		0		2	1	1
Необеспеченность (Н)	2	0		0	1	0	2	0		0
U_i										

Таблица 7

Виды мероприятий	Станционные системы					V_j				
	А	Б	В	Г	Д					
Ремонт на месте (М)		3		1		2	3	2	1	
Ремонт в РТУ (Р)	1	2	2	1	1	0		3		2
Перестановка (П)	1	1		0		0		2	1	1
Необеспеченность (Н)	2	0		0		0	2	0		0
U_i										

Вычислим суммарный эффект для полученного плана распределения ресурсов:

$$\begin{aligned} \Theta &= 2 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 2 \cdot 1 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 3 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = \\ &= 2 + 0 + 2 + 0 + 1 + 1 + 0 + 0 = 6 \text{ ед.} \end{aligned}$$

Суммарный эффект уменьшился, значит, план, представленный в таблице 8, лучше, чем в таблице 3. Проверим условие оптимальности плана. Для этого вычислим потенциалы строк и столбцов, а затем оценим потенциалы свободных клеток. Результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8

Виды мероприятий	Станционные системы										V_j
	А		Б		В		Г		Д		
Ремонт на месте (М)	(2)	3	(1)	1	(3)	2	(2)	3	2	1	-1
Ремонт в РТУ (Р)	0	2	2	1	1	0	(1)	3	(0)	2	-2
Перестановка (П)	1	1	(0)	0	(1)	0	(1)	2	1	1	-1
Необеспеченность (Н)	3	0	(1)	0	(2)	0	2	0	(0)	0	0
U_i	0		1		2		0		0		

Как видно из таблицы 8, потенциалы всех свободных клеток больше нуля, т. е. полученный план оптимален. Он требует реализации следующих мероприятий:

- на станции А нужно выполнить одну перестановку стрелочного электропривода в иные условия эксплуатации;
- на станции Б отправить два электропривода на ремонт в РТУ;
- на станции В один стрелочный электропривод отправить на ремонт в РТУ;
- на станции Г мероприятия не выполняются;
- на станции Д два стрелочных электропривода необходимо отремонтировать на месте и один переставить.

Суммарная необеспеченность при таком плане распределения ресурсов составит пять мероприятий.

В этом разделе был описан и проиллюстрирован «транспортный» подход к решению ЗРР, сформулированной как аналог классической ТЗ. Помимо ЗРР, интерес с точки зрения возможных приложений могут иметь и другие (модифицированные) задачи подобного типа. В качестве примера назовем аналог ЗРР с ограничениями по времени выполнения мероприятий обслуживания систем ЖАТ, аналог ТЗ с ограничениями пропускной способности, многопродуктовые ТЗ и т. п. Для решения таких модифицированных задач потребуется разработка соответствующих методов, причем «транспортный» подход также может оказаться полезным.

О решении задач распределения ресурсов большой размерности

Известно, что классические методы и алгоритмы решения многих востребованных задач (разновидности транспортных задач, задач распределения ресурсов и т. п.) не имеют возможности распараллеливания. Вместе с тем время их выполнения характеризуется экспоненциальным ростом с возрастанием размерности задачи. Точные методы решения непригодны для задач большой размерности из-за масштабных временных затрат. Однако именно сегодня есть

острая потребность в эффективных алгоритмах для решения оптимизационных задач, связанных с обработкой больших массивов информации. Таким образом, решение задач вышеупомянутых типов становится актуальным.

Заметим, что интерес к проблеме решения оптимизационных задач большой размерности начал проявляться довольно давно, и для ее решения предлагались разные подходы. Так, в работе [22], опубликованной в 1974 году, предложен метод решения производственно-транспортной задачи многопродуктового типа путем ее декомпозиции на подзадачи транспортного типа для каждого продукта. Понятно, что при таком подходе исходная задача сводится к решению более простых ТЗ для каждого продукта в отдельности, что и приводит к сокращению общего времени решения.

Известны также публикации, например [23,24], в которых сообщается об использовании для решения задач большой размерности готовых пакетов программ *MathCAD* и *Microsoft Excel*. В качестве примеров таких задач приводятся задачи размерности 20×25 (*MathCAD*) и 10×20 (*MsExcel*). Представляется, что ответ на вопрос, считать ли эти размерности большими, весьма неоднозначен.

Остановимся еще на одной публикации [25], также посвященной обсуждаемой проблеме. Ее автор разработал метод последовательной сепарации (ПС-метод), на основе которого, как утверждается, удастся существенно сократить потребность в большой оперативной памяти компьютера. Автор указывает, что для ТЗ размерности 1000×1000 вместо 10^6 значений требуется хранить только 2002, остальные являются нулевыми. Согласно выводам, приведенным в [25], на основе ПС-метода создана программа решения задачи о назначениях большой размерности с использованием СУБД FOX-PRO. Что касается времени вычислений по созданной программе и объема необходимой оперативной памяти, то эти сведения в публикации отсутствуют. Компьютерная программа для решения ТЗ большой размерности, как следует из текста статьи, на момент публикации отсутствовала. Попытки найти сведения о создании такой программы после публикации [25] и о результатах ее апробации не увенчались успехом. К сожалению, отсутствие убедительных реальных статистических данных об эффективности предложенного в [25] подхода к задачам с *big data* делают авторские оценки этого подхода декларативными.

Известно, что многие актуальные оптимизационные задачи, к числу которых относится и ТЗ, в случае их большой размерности требуют для решения традиционными методами очень серьезных временных затрат. В этой ситуации альтернативным подходом к решению упомянутых задач становится применение методов, базирующихся на методологии эволюционных вычислений [26]. Имеющаяся ныне практика применения такого подхода в различных областях подтверждает его высокую эффективность и перспективность.

В качестве примера укажем на публикацию [27], в которой проведена оценка эффективности стандартного генетического алгоритма (ГА). Такая оценка осуществлена на репрезентативном множестве из девяти тестовых задач, отра-

жающих главные проблемы при решении сложных задач оптимизации. В [27] отмечается, что решение таких задач требует тщательного выбора конфигурации ГА (набора операторов, настройки параметров). Из результатов тестирования следует, что для всех рассмотренных тестовых задач удается найти эффективный, т. е. надежный и быстрый вариант ГА.

В развитии современной компьютерной техники имеются две основные тенденции. Одна из них — значительное снижение в последние годы роста частоты процессоров, вторая — появление возможности хранения больших объемов информации. Снижение роста быстродействия процессоров обусловлено достижением технологического предела нанометровых технологий. Вместе с тем появилась возможность размещения на одном кристалле большого количества процессорных ядер. Очевидно, что одновременное использование этих ядер для уменьшения временных затрат на реализацию алгоритмов возможно только в том случае, если исполняемые алгоритмы являются параллельными. Сказанное позволяет сделать вывод, что один из возможных путей решения задач большой размерности связан с разработкой процедур распараллеливания известных эволюционных алгоритмов для их решения. Разработкой методов параллельных вычислений, в частности, при использовании генетических алгоритмов, относящихся к классу эволюционных, занимается раздел науки, называемый распределенными вычислениями. В области генетических алгоритмов такие исследования ведутся уже около 20 лет [28].

В качестве подтверждения успешного продвижения к решению проблемы распараллеливания ГА для решения ТЗ относятся результаты, полученные в [29]. В этой статье приводятся данные о применении разработанного автором параллельного ГА для решения ТЗ размерности 100×100 . Принадлежность такой задачи к классу задач большой размерности сомнений не вызывает. Это дает основания говорить о перспективности направления, связанного с разработкой параллельных ГА, для решения задач распределения ресурсов.

Заключение

Проблема оптимизации ресурсов в процессе эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры сегодня весьма актуальна, можно даже сказать, злободневна. Суть ее заключается в ограниченности ресурсов — финансовых, технических и трудовых, неравномерном и нерациональном их распределении, а также в критическом ухудшении производственных показателей и устаревании оборудования, что непосредственно влияет на надежность и безопасность. Причины же, как правило, носят организационный характер.

В свете быстрого развития информационных технологий использовавшиеся прежде в транспортной отрасли эвристические подходы к управлению ресурсами становятся малоэффективными. Требуются новые инновационные решения. Все больше внимания уделяется разработке строго математических

методологий и формализации процесса технического обслуживания путем оптимизационного и статистического моделирования и разработки соответствующего программного обеспечения. Применение математических методов с прогнозируемым результатом, разработка отраслевых стандартов планирования и создание информационно-управляющих систем может привести к значительным выгодам — повышению экономической эффективности технического управления и снижению затрат.

Методы оптимизации являются мощным инструментом для эффективного управления материальными и финансовыми ресурсами на железнодорожном транспорте. Однако планирование обслуживания железнодорожных транспортных систем — чрезвычайно трудная оптимизационная задача в силу комбинаторной сложности и большой размерности. Кроме того, формулировки отдельных подзадач должны быть обобщенными, универсальными и распространяться на различные транспортные системы, принадлежащие к одному подмножеству (как всевозможные подсистемы железнодорожной автоматики и телемеханики). В связи с этим требуются дополнительные исследования, в т. ч. разработка новых методов снижения размерности поставленных задач оптимизации, применение технологии параллельных вычислений при их решении. Такой подход станет хорошим примером практической реализации алгоритмов анализа больших данных (big data), использования предиктивной и прескриптивной аналитики для эффективного управления инфраструктурным комплексом железнодорожного транспорта.

Библиографический список

1. *Минаков Д. Е.* Методы построения и технической эксплуатации электромеханических устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: дисс. ... канд. техн. наук, специальность: 05.22.08 / Д. Е. Минаков. — М.: МИИТ, 2015. — 188 с.
2. *Горелик А. В.* Модели оценки технологической эффективности систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, П. А. Неваров, И. А. Журавлев, А. С. Веселова // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1, № 2. — С. 143–155.
3. *Горелик А. В.* Анализ показателей надежности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики с учетом экономических критериев / А. В. Горелик, П. А. Неваров // Автоматика на транспорте. — 2015. — Т. 1, № 3. — С. 271–281.
4. *Шаманов В. И.* Обобщенная математическая модель процесса эксплуатации систем автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2, № 2. — С. 163–179.
5. *Шаманов В. И.* Методы оптимизации технического обслуживания систем автоматики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2016. — Т. 2, № 4. — С. 481–496.
6. *Шаманов В. И.* Математические модели надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики / В. И. Шаманов // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 1. — С. 7–19.

7. *Володарский В. А.* Стратегии, критерии и расчет периодичности замен аппаратуры автоматики и телемеханики / В. А. Володарский // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 2. — С. 165–177.
8. *Горелик А. В.* Оценка качества технической эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, Н. А. Тарадин, А. С. Веселова, Д. В. Солдатов // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 3. — С. 319–334.
9. *Володарский В. А.* Исследование надежности постовых устройств микропроцессорной централизации EBI Lock 950 / В. А. Володарский // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 4. — С. 477–490.
10. *Богданов А. Г.* Принципы сбора данных об отказах элементов систем управления транспортными средствами / А. Г. Богданов, Д. А. Скороходов // Автоматика на транспорте. — 2017. — Т. 3, № 4. — С. 491–505.
11. *Володарский В. А.* Надежность аппаратуры автоматики и телемеханики, прошедшей ремонт / В. А. Володарский // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4, № 1. — С. 18–29.
12. *Gorelik A. V.* Assessment of operational risks of electric interlocking systems / A. V. Gorelik, V. Y. Gorelik, D. V. Shalyagin // Russian Electrical Engineering. — 2018. — Vol. 89, N 9. — P. 550–554.
13. *Горелик А. В.* Принципы управления качеством функционирования инфраструктуры в хозяйстве автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, В. В. Аношкин, А. В. Орлов, Н. А. Тарадин, А. С. Веселова // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 9. — С. 55–61.
14. *Frank H.* Communication, transmission and transportation networks / H. Frank, I. Frisch. — Massachusetts: Adison Wesley, Reading, 1971.
15. *Dantzig G. B.* Linear programming and extension / G. B. Dantzig. — Princeton, New Jersey, 1963.
16. *Нестеров Е. П.* Транспортная задача линейного программирования / Е. П. Нестеров. — М.: Транспорт, 1971. — 216 с.
17. *Романовский И. В.* Алгоритмы решения экстремальных задач / И. В. Романовский. — М.: Наука, 1977. — 352 с.
18. *Patts R. B.* Flows in Transportations Networks / R. B. Patts, R. V. Oliver. — New York: Academic Press, 1972.
19. *Vanderbei R. J.* Linear Programming: Foundations and Extensions / R. J. Vanderbei. — New York: Princeton University, 2001. — 450 p.
20. *Minieka E.* Optimization Algorithms for Networks and Graphs / E. Minieka. — New York, Basel: Marcel Dekker Inc., 1978.
21. *Ford L. R.* Flows in networks / L. R. Ford, D. R. Fulkerson. — Princeton: Princeton Press, 1962.
22. *Дубовский С. В.* О решении производственно-транспортной задачи большой размерности / С. В. Дубовский, С. С. Серов // Автоматика и телемеханика. — 1974. — № 7. — С. 121–124.
23. *Фурина К. О.* О решении задач большой размерности в пакете МATHCAD на примере транспортной задачи / К. О. Фурина // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1–1. — С. 179–194.
24. *Шульгина-Тарашук А. С.* Решение транспортной задачи с помощью программного обеспечения / А. С. Шульгина-Тарашук // Молодой ученый. — 2016. — № 12. — С. 67–70.

25. Петрунин С. В. О решении транспортной задачи большой размерности / С. В. Петрунин // Научный вестник МГТУ ГА. — 2008. — № 131. — С. 183–185.
26. Скобцов Ю. А. Эволюционные вычисления: учебное пособие / Ю. А. Скобцов, Д. В. Сперанский. — М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2015. — 326 с.
27. Гордиенко М. В. Об исследовании эффективности стандартного генетического алгоритма / М. В. Гордиенко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2016. — Т. 1, № 12. — С. 492–494.
28. Кныш Д. С. Параллельные генетические алгоритмы: обзор и состояние проблемы / Д. С. Кныш, В. М. Курейчик // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2010. — № 4. — С. 72–82.
29. Емельянова Т. С. Применение генетических алгоритмов для решения транспортной задачи линейного программирования / Т. С. Емельянова // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. — 2006. — № 3. — С. 15–29.

D. V. Speranskiy

A. V. Gorelik

A. V. Orlov

*Chair of "Transport Infrastructure Control Systems",
Russian University of Transport, Moscow*

TASKS OF RESOURCE OPTIMIZATION IN THE SPHERE OF AUTOMATION AND REMOTE CONTROL SYSTEMS MAINTENANCE

A common task of optimal distribution of resources of subdivisions, involved with automation and remote control systems maintenance, was considered in the article in order to minimize losses caused by their unreliable performance. A mathematical model for the solution of the given problem being a prototype of the table (matrix) model, used for the solution of a classical transportation model, was proposed. The method of potentials, adapted to the stated optimization task, was described as the solution technique; the former was illustrated in detail by means of a case study. An extensive step-by-step search algorithm for an optimal solution was given. Various task modifications for optimal resource distribution, occurring in the process of maintenance organization for railway automation systems, were also stated in the article, with possibility of "transportation" approach application. The former are of interest from the point of view of practical applications. Moreover, a list of other methods for the solution of classical transportation problems, applicable for low-dimensionality tasks, was considered in the article.

As transportation tasks are of high dimensionality as well as resource-demanding in actual practice the article contains an analysis of the latest publications, describing possible solution approaches. The methods of dimension reduction and consequent separation were also mentioned in the study and, according to the authors' opinion, make it possible to reduce computational complexity in terms of data store and time. Special attention was given to application availability of evolutionary computations, particularly genetic algorithms; the latter are iterative and give an approximate, tending to optimal, solution with the number of iterations on the rise, making it possible to discontinue computation if the required order of accuracy is reached. The possibility of using the concurrent programming technology for genetic algorithms was also considered for applied tasks of optimal resource distribution according to the minimizing criterion of train-hours or financial losses, caused by unreliable performance during maintenance of transportation facilities.

Resource distribution, effective management, maintenance, automation and remote control systems, classical transportation task, optimization methods, high dimensionality tasks

References

1. Minakov D. E. (2015) *Metody postroeniya i tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki* [Design methods and maintenance of electro-mechanical devices for railway automation and remote control]. Dis. ... Cand. Sci. (Eng.), specialty: 05.22.08. Moscow, MIIT [Russian University of Transport] Publ., 188 p. (In Russian)
2. Gorelik A. V., Nevarov P. A., Zhuravlev I. A. & Veselova A. S. (2015) Modely otsenki tekhnologicheskoy effektivnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Evaluation models for technological efficiency of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 1, no. 2, pp. 143–155. (In Russian)
3. Gorelik A. V. & Nevarov P. A. (2015) Analiz pokazateley nadezhnosti funktsionirovaniya sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki s uchetom ekonomicheskikh kriteriev [Reliability performance analysis of railway automation and remote control systems based on economic criteria]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 1, no. 3, pp. 271–281. (In Russian)
4. Shamanov V. I. (2016) Obobshchennaya matematicheskaya model protsessa ekspluatatsii sistem avtomatiki i telemekhaniki [Generic mathematical model of railway automation and remote control systems operational process]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 2, no. 2, pp. 163–179. (In Russian)
5. Shamanov V. I. (2016) Metody optimizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya sistem avtomatiki [Optimization procedures for maintenance of automation systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 2, no. 4, pp. 481–496. (In Russian)
6. Shamanov V. I. (2017) Matematicheskiye modely nadezhnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Mathematical models of railway automation and remote control systems reliability]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 1, pp. 7–19. (In Russian)
7. Volodarskiy V. A. (2017) Strategii, kriterii i raschet periodichnosti zamen apparatury avtomatiki i telemekhaniki [Strategies, criteria and calculation of change interval for automation and remote control equipment]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 2, pp. 165–177. (In Russian)
8. Gorelik A. V., Taradin N. A., Veselova A. S. & Soldatov D. V. (2017) Otsenka kachestva tekhnicheskoy ekspluatatsii sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Technical maintenance quality assessment of railway automation and remote control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 3, pp. 319–334. (In Russian)
9. Volodarskiy V. A. (2017) Issledovaniye nadezhnosti postovykh ustroystv mikroprotsessornoy tsentralizatsii EBILock 950 [Reliability research of tower equipment of computer-based interlocking EBILock 950]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 4, pp. 477–490. (In Russian)
10. Bogdanov A. G. & Skorokhodov D. A. (2017) Printsipy sbora dannykh ob otkazakh elementov sistem upravleniya transportnymi sredstvami [Data acquisition principles of component failure in transport control systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation], vol. 3, no. 4, pp. 491–505. (In Russian)

11. Volodarskiy V. A. (2018) Nadezhnost apparatury avtomatiki i telemekhaniki, proshedshey remont [Reliability of overhauled railway automation and remote control equipment]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*, vol. 4, no. 1, pp. 18–29. (In Russian)
12. Gorelik A. V., Gorelik V. Y. & Shalyagin D. V. (2018) Assessment of operational risks of electric interlocking systems. *Russian Electrical Engineering*, vol. 89, no. 9, pp. 550–554.
13. Gorelik A. V., Anoshkin V. V., Orlov A. V., Taradin N. A. & Veselova A. S. (2018) Printsipy upravleniya kachestvom funktsionirovaniya infrastruktury v khozyaistve avtomatiki i telemekhaniki [Operation quality control principles of infrastructure in the economy of automation and remote control]. *Zheleznodorozhniy transport [Railroad transport]*, no. 9, pp. 55–61. (In Russian)
14. Frank H. & Frisch I. (1971) Communication, transmission and transportation networks. Massachusetts, Adison Wesley, Reading Publ.
15. Dantzig G. B. (1963) Linear programming and extension. Princeton, New Jersey.
16. Nesterov E. P. (1971) Transportnaya zadacha lineinogo programmirovaniya [Transportation aim of linear programming]. Moscow, Transport Publ., 216 p. (In Russian)
17. Romanovskiy I. V. (1977) Algoritmy resheniya ekstremalnykh zadach [Solution algorithms for extrema problems]. Moscow, Nauka [Science] Publ., 352 p. (In Russian)
18. Patts R. B. & Oliver R. V. (1972) Flows in Transportations Networks. New York, Academic Press.
19. Vanderbei R. J. (2001) Linear Programming: Foundations and Extensions. New York, Princeton University Publ., 450 p.
20. Minioka E. (1978) Optimization Algorithms for Networks and Graphs. New York, Basel, Marcel Dekker Inc.
21. Ford L. R. & Fulkerson D. R. (1962) Flows in networks. Princeton, Princeton Press.
22. Dubovskiy S. V. & Serov S. S. (1974) O reshenii proizvodstvenno-transportnoy zadachy bolshoy razmernosti [On industrial and traffic high dimensionality problem solving]. *Avtomatika i telemekhanika [Automation and remote control]*, no. 7, pp. 121–124. (In Russian)
23. Furina K. O. (2015) O reshenii zadach bolshoy razmernosti v pakete MATHCAD na primere transportnoy zadachy [High dimensionality problem solving in MATHCAD software by the example of transportation task]. *Sovremenniye problem nauky i obrazovaniya [Modern issues of science and education]*, no. 1–1, pp. 179–194. (In Russian)
24. Shulgina-Tarashchuk A. S. (2016) Resheniye transportnoy zadachy s pomoshchyu [Transportation problem solving via software]. *Molodoy ucheniy [Young scientist]*, no. 12, pp. 67–70. (In Russian)
25. Petrunin S. V. (2008) O reshenii transportnoy zadachy bolshoy razmernosti [On high dimensionality transportation problem solving]. *Nauchniy vestnik MGTU GA [Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation]*, no. 131, pp. 183–185. (In Russian)
26. Scobtsov Y. A. & Speranskiy D. V. (2015) Evolyutsionniye vychisleniya [Evolutionary computation]. Uchebnoye posobiye [Teaching aid]. Moscow, National Open University “INTUIT”, 326 p. (In Russian)
27. Gordienko M. V. (2016) Ob issledovanii effektivnosti standartnogo geneticheskogo algoritma [The study of standard genetic algorithm efficiency]. *Aktualniye problem aviatsii i kosmokratiki [Relevant issues of aviation and space exploration]*, vol. 1, no. 12, pp. 492–494. (In Russian)
28. Knysh D. S. & Kureichik V. M. (2010) Parallelniye geneticheskiye algoritmy: obzor i sostoyaniye problem [Parallel genetic algorithms: review and problem state]. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya [Proceedings of Russian Academy of Sciences. Theory control systems]*, no. 4, pp. 72–82. (In Russian)

29. *Emelyanova T. S.* (2006) *Primeneniye geneticheskikh algoritmov dlya resheniya transportnoy zadachy programmirovaniya* [Application of genetic algorithms for the solution of linear programming transportation problem]. *Perspektivniye informatsionniye tekhnologii i intellektualniye sistemy* [Long-term information technologies and intelligent systems], no. 3, pp. 15–29. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В. А. Ходаковским
Поступила в редакцию 24.06.2019, принята к публикации 12.03.2020*

СПЕРАНСКИЙ Дмитрий Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта
e-mail: speranskiy.dv@gmail.com

ГОРЕЛИК Александр Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта
e-mail: agorelik@yandex.ru

ОРЛОВ Александр Валерьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта
e-mail: summerman1978@gmail.com

© Сперанский Д. В., Горелик А. В., Орлов А. В., 2020