



О. А. Лебедева¹, В. Е. Гозбенко^{1,2}, С. К. Каргапольцев²

¹ Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

² Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 16 ноября 2018 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УСЛУГ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. Одной из основных задач оптимизации транспортной сети является повышение эффективности работы общественного транспорта и его привлекательности для пассажиров за счет качества предоставляемых услуг. Задачи обычно решаются с помощью практических руководств и специальных процедур, моделей аналитической оптимизации или метаэвристических методов. Модель представляет собой задачу оптимизации с ограничениями, которая учитывает ресурсы сети, распределение населения в зависимости от характеристик расселения. Для решения задачи необходимо получение данных относительно автобусной сети, таких как точное время в пути автобуса, расстояния между автобусными остановками, распределение населения и демографию. В статье подчеркивается необходимость тщательного анализа факторов, которые влияют на планирование автобусного маршрута. В работе описываются основные функции оптимизации моделей, которые можно использовать при проектировании сетей общественного транспорта. Поставленная задача может быть решена путем адаптации модели под требуемые условия. Вариантом решения может быть оптимизация всей сети или ее части. Для исследования выбран алгоритм, основанный на «дереве решений», так как он позволяет уменьшить сложность вычислений при нахождении оптимального маршрута между заданной начальной и конечной точкой. У данного метода есть ограничения – требуется ручной выбор начальных и конечных точек для каждого маршрута, и расчет маршрутов ведется последовательно, но его несомненным достоинством является легкость реализации. На следующем этапе необходимо провести выбор оптимального маршрута с использованием упрощенного подхода. В заключение необходимо отметить, что проектирование транспортной сети является сложным процессом, который сформулирован как задача оптимизации с ограничениями. При использовании методов оптимизации приблизительно трехкратно улучшаются показатели скорости доставки пассажиров.

Ключевые слова: планирование, транспортная сеть, ограничение, оптимизация, модель.

О. А. Lebedeva¹, V. E. Gozbenko^{1,2}, S. K. Kargapol'tsev¹

¹ Angarsk State Technical University, Angarsk, the Russian Federation

² Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: November 16, 2018

OPTIMIZATION OF THE TRANSPORT NETWORK TAKING INTO ACCOUNT ASSESSMENT OF QUALITY OF PUBLIC TRANSPORT SERVICES

One of the main tasks of optimizing the transport network is to increase the efficiency of public transport and its attractiveness to passengers due to the quality of the services provided. Problems are usually solved with the help of practical guides and special procedures, models of analytical optimization or metaheuristic methods. The model is an optimization problem with constraints, which takes into account network resources, the distribution of population depending on the characteristics of settlement. To solve the problem, it is necessary to obtain more data on the bus network, such as the exact time in the bus route, the distance between bus stops, population distribution and demographics. The article emphasizes the need for a thorough analysis of the factors that influence the planning of the bus route. This article describes the basic functions of optimizing models that can be used in designing public transport networks. The task can be solved by adapting the model to the required conditions. A solution may be the optimization of the entire network or its part. An algorithm based on the decision tree was chosen for the study, since it allows reducing the complexity of calculations when finding the optimal route between a given initial and final point. This method has limitations - manual selection of start and end points for each route is required, and the calculation of routes is carried out sequentially, but its undoubted advantage is ease of implementation. At the next stage, it is necessary to carry out the selection of the optimal route using a simplified approach. In conclusion, I would like to note that the design of the transport network is a complex process, which is formulated as an optimization problem with constraints. When using optimization methods, the speed of passenger delivery is improved about three times.

Keywords: transport network planning, limited, optimization, model.

Введение

Современная политика ставит перед собой задачу популяризации городского пассажирского

транспорта общего пользования. В зависимости от условий эксплуатации транспортной сети меняется и подход. Улично-дорожная сеть в центре горо-



да делает эксплуатацию автобусной сети крайне затруднительной. Однако, чем эффективнее организована работа транспортной сети, тем более привлекательными для населения будут перевозки общественным транспортом, что позволит охватить больше населения и сократить время в пути. О проблемах проектирования сети опубликовано множество научных работ в связи с актуальностью проблематики [1–7].

Такие задачи обычно решаются с помощью практических руководств и специальных процедур, моделей аналитической оптимизации или метаэвристических методов. Аналитические модели чаще всего применяются только на искусственной сети, так как оптимизация транспортной сети комбинаторно сложна и может быть нелинейной. При этом метаэвристические подходы способны находить локально-оптимальные решения.

Эвристические подходы, используемые для проектирования маршрутов транспортной сети, различаются в зависимости от специфики, поскольку большинство включают максимизацию или минимизацию функции стоимости и конкретные ограничения. Стандартно общие алгоритмы или методология содержат генетический алгоритм, локальный поиск, имитацию, случайный поиск. Это означает, что большинство подходов в значительной степени зависят от поставленных задач.

Подходы к повышению эффективности работы общественного транспорта

Одной из основных задач пассажирского транспорта является повышение эффективности работы общественного транспорта и его привлекательности для пассажиров. Модель представляет собой задачу оптимизации с ограничениями, которая учитывает ресурсы сети, распределение населения в зависимости от характеристик расселения. Для решения задачи необходимо получение большего количества данных относительно автобусной сети, таких как точное время в пути автобуса, расстояния между автобусными остановками, распределение населения и демографию. Важным моментом является получение приведенной информации относительно городских и пригородных маршрутов. Задача может ставиться и с другой целью, не изменение имеющейся транспортной сети, а открытие новых маршрутов для наиболее полного удовлетворения потребностей пассажиров в перевозках относительно всех районов города.

Рассматриваемый метод имеет цель – максимизировать скорость передвижения пассажиров для удовлетворения потребности большего количества населения, одновременно сократив время в пути. Этот подход к решению проблемы проектирования сети общественного транспорта реализуется посредством применения стоимостной функ-

ции в задачах оптимизации с ограничениями. Целевая функция позволит объединить различных перевозчиков, учесть все категории пассажиров, задействовать имеющиеся ресурсы и даст возможность провести оценку.

Общая стоимость включает в себя две основные части: стоимость подхода и стоимость обслуживания автобусов. Первая связана с временем подхода пассажира к автобусной остановке, вторая соответствует времени в пути. Обе статьи затрат могут быть учтены совместно.

Ниже будем рассматривать минимизацию целевой функции

$$u = \sum_{i \in N} w_{walk}^i t_{walk}^i + \sum_{i \in N} w_{bus}^i t_{bus}^i, \quad (1)$$

где N – количество пассажиров; w_{walk}^i , w_{bus}^i – коэффициенты, отражающие расходы на пассажира, связанные с обслуживанием автобусов и пешеходов; t_{walk}^i , t_{bus}^i – время в пути пешехода и автобуса.

Эта модель может быть расширена путем минимизации целевой функции

$$z = c \sum_{k, j \in M} fp(k, j), \quad (2)$$

где $fp(k, j)$ – функция затрат на пассажиров; c – коэффициент, отражающий стоимость перевозки пассажиров; M – количество пар OD k, j (OD – аббревиатура для матрицы пункта отправления).

Функция затрат пассажиров $fp(k, j)$ в формуле (2) может быть сформирована так, чтобы отражать расходы пассажиров, которые включают время подхода и время работы автобуса, как в формуле (1). Кроме того, она может включать время ожидания и время пересадки. Следовательно, общую форму функции можно представить в виде

$$\sum_{k, j \in M} fp(k, j) = \sum_{\tau \in R_k} \sum_{j \in M} [d_{kj} \times (t_{walk}^{kj} + t_{wait}^{kj} + t_{bus}^{kj} + t_{transfer}^{kj})], \quad (3)$$

где R – совокупность всех маршрутов; d_{kj} – спрос на остановочные пункты от k до j ; $t_{walk}^{kj} + t_{wait}^{kj} + t_{bus}^{kj} + t_{transfer}^{kj}$ – сумма времени подхода, ожидания, поездки в автобусе и пересадки.

Оценка показателей качества обслуживания пассажиров

Для того чтобы было возможно получение объективной картины в функции (1) и (2) необходимо включить меры качества обслуживания. Количественную оценку показателей качества можно получить путем опроса пассажиров.

Меры могут быть классифицированы на три основные группы. К первой группе относят факторы неиспользования общественного транспорта: – долгое ожидание транспорта на остано-



- вочных пунктах;
- переполненные автобусы;
- низкая скорость транспортных средств;
- ненадежность обслуживания;
- потребность в пересадках;
- невозможность перевозки грузов;
- высокая стоимость проезда;
- низкая пешая доступность к остановочным пунктам.

Ко второй группе относят факторы, влияющие на выбор общественного транспорта как средства передвижения:

- недорогой сервис;
- быстрое обслуживание;
- недоступность автомобиля;
- меньший риск дорожно-транспортных происшествий;

– отсутствие необходимости искать автомобильную парковку;

– практичность (менее утомительная поездка);

– отсутствие водительских прав.

К третьей группе относят атрибуты качества обслуживания:

- частота;
- количество автобусных остановок;
- чистота салона;
- комфорт в автобусе;
- безопасность;
- наличие навеса на остановочных пунктах / скамей отдыха;
- наличие сидячих мест в автобусе;
- информация об услугах.

Наиболее важным аспектом при анализе показателей работы общественного транспорта является оценка воспринимаемого пассажирами качества. На рис. 1 показана схема [1], полученная в результате исследования.

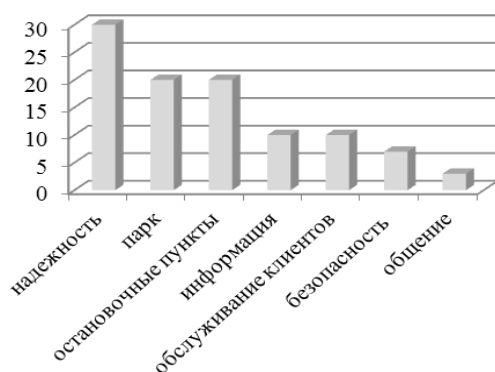


Рис. 1. Оценка качества услуг общественного транспорта, %

Из приведенного анализа можно сделать вывод, что оценка качества услуг общественного

транспорта является результатом сочетания объективных и субъективных факторов в сравнении с индивидуальным транспортом [8–12]. К объективным факторам относят время в пути, стоимость поездки. Надежность, интервалы движения, сеть маршрутов и время в пути оказывают наиболее важное влияние на выбор пассажира. Наименьшее внимание пассажиры уделяют общению в автобусе (см. рис. 1).

Упрощение задачи оптимизации транспортной сети

Для создания современной инфраструктуры региона рассмотрим упрощенную задачу оптимизации сети. Изначально она сформулирована как задача оптимизации с набором узлов, основанных на местоположении автобусных остановок, которым были присвоены веса в соответствии с плотностью населения в определенной зоне. Затем сформулирована упрощенная функция стоимости, основанная на максимизации скорости потока пассажиров по маршруту. Далее необходима реализация алгоритма поиска на основе «дерева», чтобы оптимизировать выбор узлов для одного автобусного маршрута. Цель задачи оптимизации – оптимальное расположение маршрута между остановочными пунктами.

Первым этапом задачи оптимизации является выбор и присвоение определенного веса узлам.

Транспортные отделы или перевозчики предоставляют паспорта маршрутов, в которых где отмечено географическое местоположение имеющихся в сети автобусных остановок, которые возможно использовать в качестве узлов сети. При использовании такой модели требуется распределение населения по городу в зависимости от места проживания. Данную процедуру можно проводить по разбивке населения относительно почтового индекса или альтернативными методами. Узлам должен быть присвоен определенный вес в соответствии с проживающим в этой зоне населением. Сначала сопоставляются остановочные пункты с индексом, а затем распределяется население относительно остановочных пунктов (т. е. узлов) в проектируемой области. Результатом расчета станет набор из узлов, обозначенных N , расположенных на остановочных пунктах, каждый из которых получил весовой коэффициент W_i . Затем можно определить скорость пересадки пассажиров для пары узлов N_i, N_j , как

$$P_{ij} = \frac{W_i}{t_{ij}}, \quad (4)$$

где t_{ij} – обозначает время в пути (на автобусе) между узлами N_i и N_j .

Расстояние между остановочными пунктами примем за евклидово расстояние и учтем, что



средняя скорость движения автобусов постоянна. При моделировании можно использовать как численность населения на узел, так и расстояния и время в пути.

Если основной целью исследования является повышение качества обслуживания населения, то изначально затраты перевозчика не учитываются и, не имея точных данных о спросе на перевозки, в стремлении упростить задачу, предполагается, что потребность в поездках из узла будет прямо пропорциональна количеству населения, проживающего в непосредственной близости от этого узла. Таким образом, целью исследования является поиск маршрутов, которые позволили бы максимизировать обслуживание, проходя через густонаселенные районы, в то же время свели бы к минимуму общее время поездки до места назначения. Поэтому возможно выбрать вариант максимизации суммы «скорости доставки пассажиров», между каждой парой узлов (i, j) на маршруте, основываясь на распределении населения в каждом узле и времени прохождения между узлами, поэтому значение m -го маршрута может быть определено как

$$\max_m R_m = \sum_{i=1}^{N-1} p_{i,j+1}, \quad (5)$$

где N – общее количество автобусных остановок на пути m .

Следующим этапом является поиск оптимальных маршрутов. Рассмотрим вариант реализации подхода, основанный на «дереве решений», так как он позволяет уменьшить сложность вычислений, при нахождении оптимального маршрута между заданной начальной и конечной точкой. У данного метода есть ограничения – требуется ручной выбор начальных и конечных точек для каждого маршрута, и расчет маршрутов ведется последовательно, но его несомненным достоинством является легкость реализации. Алгоритм можно графически представить следующим образом (рис. 2).

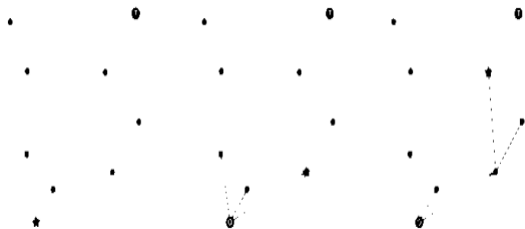


Рис. 2. Последовательность выполнения алгоритма (начальный узел помечен звездочкой)

Алгоритм работы включает 5 пунктов.

1. Начиная с исходного узла, нужно определить 3 ближайших соседних узла.

2. Каждый из ближайших узлов добавляется к новому пути, который хранится в наборе возможных путей P .

3. Для каждого пути в P определяется 3 ближайших точки к конечному узлу, которые еще не содержатся в пути. Создаются 3 новых пути, с добавлением каждого узла к текущему пути.

4. Для каждого из новых путей, если новый путь:

- превышает максимальную длину пути P_{\max} , то этот путь удаляется из P ;

- включает в себя конечный узел, то этот путь добавляется в набор путей решения S ;

- не превышает P_{\max} и не включает в себя терминальный узел, то он добавляется к набору возможных путей P и далее действие продолжается с шага 3, пока все пути в P не будут сокращены или добавлены к S .

5. Функция стоимости оценивается для каждого пути решения в S , лучшие пути выбираются и предлагаются к внедрению [13–18].

Далее необходимо применить метод сокращения. Он в сочетании с ограничением направлением на то, что узел не может повторно войти в маршрут, это уменьшит количество вычислений в алгоритме, но количество путей, которые будут исследованы в сети, будет экспоненциально возрастать по мере добавления новых узлов. Это типично для задач оптимизации сети и делает поиск глобально оптимального решения невозможным в большинстве случаев. Использование метаэвристического алгоритма, такого как поиск по заданным параметрам, может исключить обратное отслеживание и повторное посещение узлов с помощью функции памяти.

Далее приводятся результаты выбора оптимального маршрута с использованием упрощенного подхода (рис. 3).

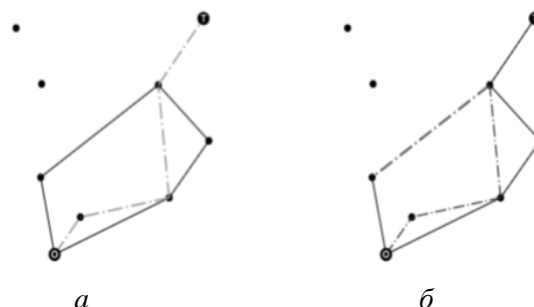


Рис. 3. Пример сокращения в алгоритме:

a – путь с терминальным узлом без превышения максимального расстояния; b – путь, превышающий максимальное расстояние и поэтому исключенный из набора возможных

В рис. 3 путь отмечен штрихпунктирной линией, это позволяет наглядно показать решения.

Далее метод будет повторяться по путям, начиная с заранее заданной остановки до конечного пункта назначения (терминал). Пути, которые отклоняются от пункта назначения, сокращаются. Остальные варианты попадают в набор возможных путей, помечаются как действующие и рассматриваются далее. Допустимые пути сортируются на основе максимальной скорости доставки. Скорость доставки, общее расстояние и расчетное время в пути – показатели по которым может быть выбран оптимальный маршрут.

Наилучший путь – это путь с максимальной скоростью доставки пассажира, который выбирается среди других путей с высокой скоростью доставки. Поэтому из путей, полученных на каждой итерации, выбирается лучший путь. На рис. 4 схематично представлен вариант решения, который дает высокую скорость доставки пассажиров.

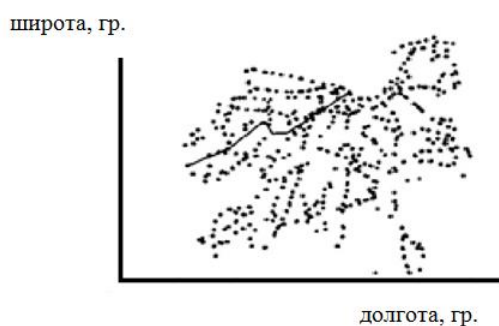


Рис. 4. Оптимальный путь для искусственно заданной сети

При использовании методов оптимизации приблизительно трехкратно улучшаются показатели скорости доставки пассажира.

Заключение

Проектирование транспортной сети является сложным процессом, который сформулирован как задача оптимизации с ограничениями.

В процессе исследования были выделены факторы, которые необходимо учитывать при разработке эффективных автобусных маршрутов: чем больше данных о существующей транспортной сети имеется, тем шире возможности создания алгоритма оптимизации с учетом множества зависимостей.

Для получения точных моделей необходимо чтобы сбор данных стал приоритетным направлением у перевозчиков. Сбор информации проводится на уровне микрорайонов, либо более крупных зон. Информация должна включать информацию относительно возрастной категории, пола, а также места тяготения, характерные для жителей рассматриваемой области. Эти данные могут быть использованы для построения точной матрицы корреспонденций.

Результаты исследований показали, что необходимо использовать геоинформационную среду для получения более полной информации о времени подхода и проезда между любыми парами узлов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедева О.А. Показатели оценки эффективности работы общественного транспорта // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2018. Т. 1. С. 108–109.
2. Лебедева О.А. Транспортная инфраструктура как основополагающий фактор эффективного функционирования экономики страны : сб. науч. тр. Ангарск. гос. техн. ун-та. Ангарск, 2018. С. 125–130.
3. Лебедева О.А., Антонов Д.В. Основные принципы развития транспортных систем городов // Вестн. Ангарск. гос. техн. акад. 2014. № 8. С. 149–155.
4. Лебедева О.А. Математические модели оценки матрицы корреспонденций на основе данных детектора «вход-выход» подвижного состава городского пассажирского транспорта // Вестник ИрГТУ. 2012. № 2. (61). С. 66–68.
5. Лебедева О.А. Совершенствование методов мониторинга пассажиропотоков на маршрутах городского пассажирского транспорта общего пользования : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2014. 171 с.
6. Крипак М.Н., Гозбенко В.Е., Колесник А.И. Оптимизация структуры транспорта как мера повышения эффективности функционирования системы городского пассажирского транспорта // Сб. науч. тр. АнГТУ. Ангарск, 2013. С. 229–232.
7. Шаров М.И., Михайлов А.Ю., Дученкова А.В. Пример оценки транспортной доступности с использованием программного продукта РТВ «VISUM» // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2013. № 1(4). С. 133–138.
8. Михайлов А.Ю., Шаров М.И. К вопросу развития современной системы критериев оценки качества функционирования общественного пассажирского транспорта // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та. 2014. Т. 9. № 19 (146). С. 64–66.
9. Шаров М.И., Михайлов А.Ю., Ковалева Т.С. Оценка надежности работы городского пассажирского транспорта в Иркутске // Вестник ИрГТУ. 2012. Т. 68. № 9. С. 174–178.
10. Fan, Wei, Machemehl Randy B. Optimal transit route network design problem: Algorithms, implementations, and numerical results, Technical Report. 2004.
11. Fang Z., Gan Albert L. ATEX Optimization of transit network to minimize transfers. 2003.
12. Lampkin W. Saalmans PD. The design of routes, service frequencies, and schedules for a municipal bus undertaking: A case study, Journal of the Operational Research Society, Springer 18. 1967. 375–397.
13. Mazzulla G., Eboli Laura, A service quality experimental measure for public transport. European Transport / Trasporti Europei, XII 34. 2006. P. 42–53.



14. Kerkko V., Kurri J. Quality factors in public transport,” Public Transport Research Programme, 2006.
15. Gavranovi H., Stojan T., Kresoja M. Optimizing Bus Routes in Nicosia. 125th European Study Group with Industry, 2017.
16. Иванкова Л.Н., Кузнецова Т.Г., Иванков А.Н. Оптимизация расположения станционных площадок на местности с использованием генетических алгоритмов // Современные подходы к управлению на транспорте и в логистике : сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. 2016. С. 56–62.
17. Гозбенко В.Е. Методы прогнозирования и оптимизации транспортной сети с учетом мощности пассажира и грузопотоков. Деп. в ВИНТИ 17.04.2008, № 330-В2008.
18. Полтавская Ю.О., Драгунов А.Ф., Ляпустин П.К. Повышение пропускной способности по улице Карла Маркса // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2014. Т. 1. № 1. С. 43.

REFERENCES

1. Lebedeva O.A. Pokazateli otsenki effektivnosti raboty obshchestvennogo transporta [Indicators for evaluating the efficiency of public transport]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress [Modern technology and technological advance]*. 2018. Vol. 1, pp. 108-109.
2. Lebedeva O.A. Transportnaya infrastruktura kak osnovopolagayushchii faktor effektivnogo funktsionirovaniya ekonomiki strany [Transport infrastructure as a fundamental factor in the effective functioning of the country's economy]. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of the Angarsk State Technical University]*, 2018, pp. 125-130.
3. Lebedeva O.A., Antonov D.V. Osnovnye printsipy razvitiya transportnykh sistem gorodov [The basic principles for the development of urban transport systems]. *Vestnik Angarskoi gosudarstvennoi tekhnicheskoi akademii [Bulletin of the Angara State Technical Academy]*. Angarsk: AGTA Publ., 2014, pp. 149-155.
4. Lebedeva O.A. Matematicheskie modeli otsenki matritsy korrespondentsii na osnove dannykh detektora «vkhod-vykhod» podvzhnogo sostava gorodskogo passazhirskogo transporta [Mathematical models for evaluating the matrix of correspondences based on the data of the "input-output" detector of the rolling stock of urban passenger transport]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2012. No. 2. (61), pp. 66-68.
5. Lebedeva O.A. Sovershenstvovanie metodov monitoringa passazhiropotokov na marshrutakh gorodskogo passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving methods for monitoring passenger traffic on the routes of urban public transport: Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk, 2014. 171 p.
6. Kripak M.N., Gozbenko V.E., Kolesnik A.I. Optimizatsiya struktury transporta kak mera povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta [Optimization of the transport structure as a measure to improve the efficiency of the urban passenger transport system]. *Sb. nauch. tr. AnGTU [Proceedings of AnSTU]*. Angarsk: AnGTU Publ., 2013, pp. 229-232.
7. Sharov M.I., Mikhailov A.Yu., Duchenkova A.V. Primer otsenki transportnoi dostupnosti s ispol'zovaniem programmnoho produkta PTV «VISUM» [An example of assessing transport accessibility using the PTV software "VISUM"]. *Izv. vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate]*, 2013. No. 1(4), pp. 133-138.
8. Mikhailov A.Yu., Sharov M.I. K voprosu razvitiya sovremennoi sistemy kriteriev otsenki kachestva funktsionirovaniya obshchestvennogo passazhirskogo transporta [On the issue of the development of a modern system of criteria for assessing the quality of public passenger transport]. *Izv. Volgograd. gos. tekhn. un-ta [News of Volgograd state tech. un-ty]*, 2014. Vol. 9. No. 19 (146), pp. 64-66.
9. Sharov M.I., Mikhailov A.Yu., Kovaleva T.S. Otsenka nadezhnosti raboty gorodskogo passazhirskogo transporta v Irkutske [Evaluation of the reliability of urban passenger transport in Irkutsk]. *Vestnik IrGTU [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2012. Vol. 68. No. 9, pp. 174-178.
10. Fan W., Machemehl R., Optimal transit route network design problem: Algorithms, implementations, and numerical results. Technical Report. (2004).
11. Zhao F., Gan, A. L. ATEX. Optimization of transit network to minimize transfers (2003).
12. Lampkin, W and Saalmans, PD, The design of routes, service frequencies, and schedules for a municipal bus undertaking: A case study. *Journal of the Operational Research Society*. Springer 18 (1967) 375–397.
13. Mazzulla G., Eboli L. A service quality experimental measure for public transport. *Trasporti Europei [European Transport]*, XII 34, pp. 42-53, 2006.
14. Kerkko V., Kurri J. Quality factors in public transport. Public Transport Research Programme, 2006.
15. Gavranovi H., Stojan T., Kresoja M. Optimizing Bus Routes in Nicosia. 125th European Study Group with Industry, 2017.
16. Ivankova L.N., Kuznetsova T.G., Ivankov A.N. Optimizatsiya raspolozheniya stantsionnykh ploshchadok na mestnosti s ispol'zovaniem geneticheskikh algoritmov [Optimizing the location of station sites on the ground using genetic algorithms]. *V sbornike: Sovremennye podkhody k upravleniyu na transporte i v logistike Sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [In the collection: Modern approaches to management in transport and logistics. Collection of materials of the All-Russian scientific-practical conference]*, 2016, pp. 56-62.
17. Gozbenko V.E., Ivankov A.N., Kolesnik M.N., Pashkova A.S. Metody prognozirovaniya i optimizatsii transportnoi seti s uchetom moshchnosti passazhiro i gruzopotokov. Deponirovannaya rukopis' No. 330-V2008 17.04.2008 [Methods of forecasting and optimizing the transport network, taking into account the capacity of passenger and freight traffic. The deposited manuscript No. 330-V2008 17.04.2008].
18. Poltavskaya Yu.O., Dragunov A.F., Lyapustin P.K. Povyshenie propusknoi sposobnosti po ulitse Karla Marksa [Increased throughput in the Karl Marx Street]. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress [Modern technology and technological advance]*, 2014. Vol. 1. No. 1, pp. 43.



Информация об авторах

Лебедева Ольга Анатольевна – к. т. н., доцент, Ангарский государственный технический университет, e-mail: kravhome@mail.ru

Гозбенко Валерий Ерофеевич – д. т. н., профессор, профессор кафедры «Математика», Иркутский государственный университет путей сообщения, Ангарский государственный технический университет, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Каргапольцев Сергей Константинович – д. т. н., профессор, ректор Иркутского государственного университета путей сообщения, e-mail: kck@irgups.ru

Authors

Ol'ga Anatol'evna Lebedeva – Doctor of Engineering Science, Asst. Prof., Angarsk State Technical University, Angarsk, e-mail: kravhome@mail.ru

Valerii Erofeevich Gozbenko – Doctor of Engineering Science, Prof., Angarsk State Technical University, Irkutsk State Transport University, e-mail: vgozbenko@yandex.ru

Sergei Konstantinovich Kargapol'tsev – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, e-mail: kck@irgups.ru

Для цитирования

Лебедева О. А. Оптимизация транспортной сети с учетом оценки качества услуг общественного транспорта / О. А. Лебедева, В. Е. Гозбенко, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 61, № 1. – С. 112–118. – DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).112–118

For citation

Lebedeva O. A., Gozbenko V. E., Kargapol'tsev S. K. Optimizatsiya transportnoi seti s uchetom otsenki kachestva uslug obshchestvennogo transporta [Optimization of the transport network taking into account assessment of quality of public transport services]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 112–118. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).112–118

УДК 621.33

DOI: 10.26731/1813-9108.2019.1(61).118–125

И. О. Лобыцин, О. О. Дёмина

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 26 января 2019 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО ИК-ЭНЕРГОПОДВОДА В ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПАЛЬЦЕВ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЛОКОМОТИВОВ

Аннотация. В данной статье рассматривается совершенно новая технология восстановления изоляционных элементов электродвигателей тягового подвижного состава на примере изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей. Представлено моделирование осциллирующего режима теплового воздействия на изоляционный элемент при его равномерном вращении на установке карусельного типа, принцип действия которой также описан в работе. Основным достоинством применения карусельной установки считается выполнение осциллирующего ИК-энергоподвода путем передвижения пальцев по карусели при постоянно включенных источниках излучения, что в свою очередь позволяет исключить пусковые режимы при частых включениях и отключениях, тем самым положительно отражаясь на сроке службы ИК-излучателей и качестве воссоздания тепловой энергии. Использование уравнения энергетического баланса делает возможным определение энергетических потерь в процессе сушки электроизоляционных покрытий при ИК-энергоподводе. В работе приведены формулы нахождения потерь при нагреве пропитанного изоляционного пальца, потерь теплоты в окружающую среду путем конвекции и излучения, а также при удалении растворителя. Показаны геометрические размеры восстанавливаемой поверхности изоляционного пальца, на основании которых находится показатель геометрической характеристики пропитанной изоляции. Наглядно представлены сравнительные графики как непрерывного, так и осциллирующего режимов восстановления изоляции с указанием величин, контролируемых в процессе сушки. Создана математическая модель для определения эффективной скважности импульса работы излучателей и проведен расчет максимальной продолжительности цикла осциллирования. Использование разработанной математической модели позволяет увеличить качество восстанавливаемого изоляционного слоя при депоковом ремонте, что способствует повышению надежности изоляционных элементов электродвигателей локомотивов в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, изоляционные пальцы, осциллирующий режим, ИК-энергоподвод, теплое излучение, локомотив.

И. О. Lobytsin, O. O. Demina

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Received: January 26, 2019

MATHEMATICAL MODELING OF THE OSCILLATING MODE OF THE IR-ENERGY SUPPLY IN THE TECHNOLOGY OF RESTORATION OF INSULATING FINGERS OF ELECTRIC MOTORS OF LOCOMOTIVES