Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 656.13:519.85

АЛИ
Марван Абдулкарим Фархан Ахмед

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАПОЛНЯЕМОСТИ АВТОМОБИЛЕЙ И ПРИМЕНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ

Автореферат
диссертации на соискание степени магистра
по специальности 7-06-0611-07 «Бизнес-аналитика и цифровой маркетинг»

Научный руководитель
канд.техн.наук, доцент кафедры ЭИ
ФЕДОСЕНКО Владимир Алексеевич

Минск 2026

ВВЕДЕНИЕ

Совместные поездки (shared mobility) изменили межгородскую мобильность: место в машине попутчика заменяет персональный автомобиль, а тариф всё чаще зависит от текущей загрузки маршрута. Глобальный рынок совместных поездок демонстрирует устойчивый рост: в 2024 году он оценивается в 11,59 млрд долл. США, а прогнозируемый среднегодовой темп прироста до 2034 года составляет 10,13%.

В академическом дискурсе теоретико-методологическую основу подобных исследований формируют два параллельных направления: комбинаторная оптимизация (маршрутизация транспортных средств) и динамическое ценообразование (балансировка спроса и предложения). Однако существующие алгоритмические решения рассматривают эти подсистемы изолированно, что не позволяет использовать механизмы тарифообразования для активного влияния на загрузку транспортных средств внутри цикла оптимизации.

На территории Республики Беларусь сегмент междугородных совместных поездок на фиксированных маршрутах остается алгоритмически и структурно недоразвитым: глобальные агрегаторы официально не функционируют на национальном рынке, а локальные решения представлены преимущественно неформальными группами в мессенджерах. Нормативно-правовую базу исследования формируют Указ Президента Республики Беларусь от 25 января 2024 г. № 32 «Об автомобильных перевозках пассажиров» и Государственная программа «Транспортный комплекс» на 2021–2025 годы, определяющие цифровизацию и обеспечение добросовестной конкуренции как приоритеты.

Автор выражает благодарность Федосенко В.А. — научному руководителю, кандидату технических наук, доценту кафедры экономической информатики, за квалифицированное научное руководство и всестороннюю помощь при подготовке диссертации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработка национального интегрированного программно-алгоритмического комплекса, который объединяет метаэвристическое распределение пассажиров с динамическим ценообразованием и откалиброван под экономические реалии Республики Беларусь, – задача, которая напрямую определяет экономическую эффективность транспортных операторов.

Цель исследования — разработка интегрированной вычислительной модели междугородних совместных пассажирских поездок, обеспечивающей повышение коэффициента занятости провозных мощностей и совокупной выручки оператора на основе сочетания метаэвристического распределения мест и регрессионной модели динамического ценообразования.

Задачи исследования:

1 формализовать задачу распределения пассажирских заявок на фиксированном маршруте как 0-1 многомерную задачу о рюкзаке с ограничениями по сегментной вместимости и бюджету;

2 разработать математическую постановку и программную реализацию детерминированного жадного алгоритма (Best-Fit) и метаэвристического генетического алгоритма с перестановочным кодированием, оператором PMX-кроссовера и эвристическим посевом;

3 разработать архитектуру механизма ценообразования, включающую офлайн-регрессионную модель базового тарифа и онлайн-расчет скидки;

4 выполнить экономическую калибровку параметров модели применительно к макроэкономическим условиям Республики Беларусь (2025 г.) и синтезировать экспериментальные наборы данных;

5 обучить модель множественной линейной регрессии методом наименьших квадратов и оценить её качество по метрикам R^2, MAE, RMSE;

6 реализовать программный конвейер интегрированного декодера с паттерном массового предварительного вычисления тарифов;

7 провести двухфазное сравнительное вычислительное исследование эффективности статической и динамической стратегий тарифообразования;

8 рассчитать экономический эффект и сформировать архитектурные рекомендации;

9 разработать спецификацию промышленной архитектуры данных (Medallion, Azure DevOps, Microsoft Purview) для обеспечения регуляторной прослеживаемости.

Объект исследования — процессы распределения пассажиропотока и тарифообразования в системах междугородних совместных пассажирских поездок (carpooling) на фиксированных маршрутах в условиях Республики Беларусь.

Предмет исследования — математические модели, алгоритмы и программная реализация интегрированной системы оптимизации заполняемости транспортных средств с применением генетического алгоритма и регрессионной модели динамического ценообразования.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1 впервые формализован и количественно описан эффект обратной зависимости между пропускной способностью (System Throughput) и коэффициентом занятости (Fleet Utilization) в задаче 0-1 MKP при использовании жадных алгоритмов;

2 разработана оригинальная схема эвристического посева начальной популяции генетического алгоритма из трех детерминированных перестановок, обеспечивающая значение целевой функции на нулевом поколении на уровне 97,77 % от итогового оптимума;

3 предложена новая архитектура интегрированного декодера с тремя последовательными фильтрами, обеспечивающая активное влияние ценообразования на максимизацию загрузки;

4 реализован паттерн массового предварительного вычисления базовых тарифов, снижающий время выполнения интегрированного алгоритма приблизительно в 40 раз;

5 предложена и специфицирована промышленная архитектура развёртывания разработанной модели (Medallion, Azure DevOps, Microsoft Purview), обеспечивающая верифицируемое соответствие требованиям Указа Президента Республики Беларусь № 32.

Практическая значимость и экономическая эффективность. Разработанная модель пригодна к непосредственному внедрению в IT-комплексы отечественных транспортных операторов по бизнес-модели платформы-агрегатора (P2P). Экспериментально доказано, что применение комплекса обеспечивает статистически значимое повышение совокупной выручки оператора в диапазоне от 12,6 % до 41,1 % при одновременном повышении коэффициента занятости на 18,9–24,6 процентных пункта. Финансовое моделирование доказывает инвестиционную привлекательность разработки: расчетный динамический срок окупаемости (DPP) для платформы составляет 15 месяцев при чистом дисконтированном доходе (NPV) 532 547 BYN за три года эксплуатации.

Личный вклад соискателя. Все научные результаты получены лично автором. Самостоятельно разработаны: математическая постановка задачи; алгоритмы Best-Fit и генетической оптимизации; модель динамического ценообразования; архитектура интегрированного декодера; программные модули ядра вычислительной модели (greedy.py, genetic.py, pricing.py).

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы прошли апробацию в рамках выполнения технологической практики, а программная реализация (базовые модули greedy.py, genetic.py, pricing.py) передана в учебно-методический фонд кафедры экономической информатики БГУИР. Основные положения докладывались на 61-й и 62-й научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы (1 статья с экспериментальными результатами интегрированного бенчмарка алгоритмов и 2 доклада в материалах научных конференций, посвященные теоретико-методологическим аспектам исследования).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников из 46 наименований. Работа содержит три приложения с листингами базовых алгоритмических модулей (greedy.py, genetic.py, pricing.py). Общий объем работы составляет 63 страниц основного текста, включая 8 иллюстраций и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен аналитический обзор предметной области. Обоснован выбор подкласса SDMR-задач (Single-Driver Multiple-Riders) на фиксированном маршруте. Выявлены ключевые алгоритмические ограничения: пространственно-временная совместимость, бюджетная платежеспособность, покрытие эксплуатационных издержек и алгоритмическая комплексность. Показано, что глубокое обучение с подкреплением (DRL) не гарантирует допустимость решений в 0-1 MKP и не обеспечивает аудируемость тарифных решений. Задача распределения мест формализована как 0-1 многомерная задача о рюкзаке.

Во второй главе представлена математическая постановка задачи оптимизации с лексикографически упорядоченной сверткой целевых функций. Разработан детерминированный жадный алгоритм стратегии Best-Fit с асимптотической сложностью $O(N \log N)$. Разработан генетический алгоритм с перестановочным кодированием хромосом, оператором PMX-кроссовера, адаптивной мутацией (Swap/Relocate/Reverse) и уникальным эвристическим посевом начальной популяции из трех детерминированных затравок.

В третьей главе формализована двухэтапная модель ценообразования: офлайн-формирование рыночного базового тарифа на основе линейной регрессии и онлайн-расчет детерминированной скидки (до 30 %) по коэффициенту загруженности. Параметры откалиброваны для макроэкономических условий Республики Беларусь 2025 года (p_{min} = 5,0 BYN). Регрессионная модель обучена на синтетической выборке (1 600 наблюдений – обучающая, 400 – тестовая), продемонстрировав метрики: R^2 = 0,9666, MAE = 0,9983 BYN, RMSE = 1,2361 BYN. Реализован архитектурный паттерн предварительного вычисления тарифов, сокращающий время выполнения генетического алгоритма примерно в 40 раз. Разработана спецификация промышленной MLOps-архитектуры: уровни данных Medallion (Bronze/Silver/Gold) с PySpark, CI/CD-конвейер Azure DevOps и механизм аудита Microsoft Purview.

В четвертой главе представлено экспериментальное исследование разработанной интегрированной вычислительной модели, проведенное на базе единого унифицированного набора данных. Методика включала двухфазный бенчмаркинг на четырех детерминированных сценариях нагрузки (от 45 до 450 пассажирских заявок), что позволило оценить работу алгоритмов в условиях различной интенсивности спроса со статистической проверкой результатов (t-тест, $p < 0,05$).

В рамках Фазы 1 (изолированный алгоритмический бенчмарк) доказано превосходство метаэвристического генетического алгоритма (ГА) над детерминированной жадной эвристикой Best-Fit по показателю пропускной способности системы (прирост составил от +12,7 % до +34,6 % во всех сценариях). Дополнительно доказана вычислительная эффективность

предложенной схемы эвристического посева: начальная популяция обеспечила достижение 97,77 % от итогового оптимума уже на нулевом поколении алгоритма. Впервые формализован и количественно описан эффект обратной зависимости между пропускной способностью и коэффициентом занятости. В условиях высокой нагрузки жадный алгоритм демонстрирует более высокую сегментную занятость (разница до 4,75 процентных пункта), поскольку жестко приоритизирует заявки с максимальной длиной поездки. Однако это приводит к ранней сегментной фрагментации, исчерпанию свободной вместимости и отказам по более коротким маршрутам, снижая общую пропускную способность.

В рамках Фазы 2 (интегрированный 2x2 бенчмарк) исследовано влияние динамической модели ценообразования на распределение мест с учетом жесткого фильтра индивидуальной платёжеспособности пассажиров. Экспериментально установлено, что интеграция динамического онлайн-расчета скидок (до 30 % для заполнения свободных провозных емкостей) обеспечивает статистически значимое повышение коэффициента занятости на 18,9–24,6 процентных пункта по сравнению со статической моделью. При этом выявлен синергетический эффект: именно комбинация ГА и динамического тарифообразования генерирует максимальный прирост совокупной выручки транспортного оператора (на 27,2–41,1 % относительно статической базы). В абсолютном выражении для пикового сценария прирост достигает +994,00 BYN за один цикл планирования.

На основании показателей вычислительной сложности и пропускной способности сформированы дифференцированные архитектурные рекомендации:

- Жадный алгоритм + динамическое ценообразование рекомендованы для систем диспетчеризации реального времени (On-Demand Transit) с жестким требованием латентности менее 15 мс.

- Генетический алгоритм + динамическое ценообразование предложены для систем регулярных перевозок (Scheduled Transit) с допустимой алгоритмической задержкой до 70 секунд.

Оценка экономической эффективности подтверждает высокую инвестиционную привлекательность внедрения разработанного программно-алгоритмического комплекса в ИТ-инфраструктуру платформы-агрегатора совместных поездок. Финансовое моделирование, основанное на бизнес-модели с удержанием сервисного сбора 15 % от валового оборота (GMV), показало, что проект является высокорентабельным исключительно за счет математической оптимизации пустующих мест. При расчетных капитальных (CAPEX) и операционных (OPEX) затратах динамический срок окупаемости (DPP) инвестиций составляет 15 месяцев, а чистое дисконтированное значение (NPV) за три года эксплуатации при ставке 12 % достигает 532 547 BYN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Формализована задача распределения пассажирских заявок на фиксированном маршруте в форме 0-1 многомерной задачи о рюкзаке с системой ограничений по сегментной вместимости, однократности назначения и индивидуальной платёжеспособности пассажиров.

2 Реализованы и сравнительно исследованы два класса решателей: жадный алгоритм Best-Fit и генетический алгоритм с перестановочным кодированием, оператором PMX-кроссовера, адаптивной мутацией и эвристическим посевом.

3 Разработана двухэтапная модель динамического ценообразования, состоящая из офлайн-регрессионного формирования базового тарифа и онлайн-расчёта скидки. Регрессионная модель обучена (1 600 наблюдений) и протестирована (400 наблюдений), обеспечив метрики прогностического качества: $R^2 = 0{,}9666$; MAE = 0,9983 BYN; RMSE = 1,2361 BYN.

4 Разработан унифицированный программный конвейер и архитектура интегрированного декодера с применением паттерна массового предварительного вычисления базовых тарифов, что обеспечило сокращение времени выполнения генетического алгоритма приблизительно в 40 раз.

5 Экспериментально установлен эффект обратной зависимости между числом обслуженных пассажиров и коэффициентом занятости в сценариях с плотным спросом. Доказано, что применение схемы эвристического посева обеспечивает значение функции приспособленности на нулевом поколении на уровне 97,77 % от итогового оптимума (сценарий Extreme Peak Dynamic).

6 Доказано, что интеграция динамической модели ценообразования обеспечивает повышение коэффициента занятости провозных мощностей на 18,9–24,6 п.п. и совокупной выручки оператора в диапазоне от 12,6 % до 41,1 % относительно статической модели.

7 Предложена промышленная архитектура развёртывания разработанной модели: трёхуровневая схема Medallion на платформе Microsoft Fabric/Databricks, CI/CD-конвейер на базе Azure DevOps и механизм Microsoft Purview, формирующий аудит-готовый граф происхождения данных в соответствии с требованиями Указа № 32.

8 Расчётный экономический эффект внедрения для платформы-агрегатора пассажирских перевозок обеспечивает динамический срок окупаемости инвестиций 15 месяцев и NPV 532 547 BYN за три года при ставке дисконтирования 12 %. Сформированы рекомендации: жадный алгоритм рекомендован для On-Demand Transit (< 15 мс), генетический алгоритм – для Scheduled Transit (до 70 с).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1 Али Марван, А. Ф. А. Сравнительный анализ жадного и генетического алгоритмов в задаче оптимизации распределения вместимости для фиксированных маршрутов карпулинга / А. Ф. А. Али Марван // Материалы 62-й науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 13–18 апр. 2026 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2026.

2 Али Марван, А. Ф. А. Гибридная оптимизация карпулинговых систем для устойчивой городской мобильности / А. Ф. А. Али Марван // Информационные технологии и управление : материалы 61-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 21–25 апр. 2025 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2025. — С. 34.

3 Али Марван, А. Ф. А. Алгоритмический подход к нейтрализации нейробиологических триггеров отказа в системах карпулинга / А. Ф. А. Али Марван // Материалы 62-й науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 13–18 апр. 2026 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. — Минск, 2026.

РЭЗЮМЭ

Алі Марван Абдулкарым Фархан Ахмед

Удасканаленне пасажырскіх перавозак шляхам аптымізацыі запаўняльнасці аўтамабіляў і прымянення дынамічнага цэнаўтварэння

Ключавыя словы: сумесныя пасажырскія паездкі, карпулінг, генетычны алгарытм, дынамічнае цэнаўтварэнне, рэгрэсійная мадэль, шматмерная задача аб заплечніку.

Мэта працы: распрацоўка інтэграванай вылічальнай мадэлі міжгародніх сумесных пасажырскіх паездак, якая забяспечвае павышэнне каэфіцыента занятасці правозных магутнасцей і сукупнай выручкі аператара на аснове спалучэння метаэўрыстычнага размеркавання месцаў і рэгрэсійнай мадэлі дынамічнага цэнаўтварэння.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: упершыню фармалізаваны і колькасна апісаны эфект адваротнай залежнасці паміж прапускной здольнасцю і каэфіцыентам занятасці ў задачы 0-1 МКР; распрацавана схема эўрыстычнага пасеву пачатковай папуляцыі ГА (забяспечвае 97,77 % оптымуму на нулявым пакаленні); прапанавана архітэктура інтэграванага дэкодэра з трыма паслядоўнымі фільтрамі; рэалізаваны патэрн папярэдняга вылічэння тарыфаў (паскарэнне ў 40 разоў); спецыфікавана прамысловая архітэктура разгортвання (Medallion, Azure DevOps, Microsoft Purview). Эксперыментальна ўстаноўлена: GA пераўзыходзіць прагны алгарытм на 12,7–34,6 %; дынамічнае цэнаўтварэнне дае прырост выручкі на 12,6–41,1 % і занятасці на 18,9–24,6 п.п..

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс кафедры эканамічнай інфарматыкі БДУІР. Дынамічны тэрмін акупнасці пры ўкараненні па мадэлі платформы-агрэгатара складае 15 месяцаў; NPV за 3 гады пры стаўцы дыскантавання 12 % — 532 547 BYN.

Вобласць прымянення: транспартная эканоміка, інфармацыйныя сістэмы на транспарце, аналітыка дадзеных.

РЕЗЮМЕ

Али Марван Абдулкарим Фархан Ахмед

Совершенствование пассажирских перевозок путём оптимизации заполняемости автомобилей и применения динамического ценообразования

Ключевые слова: совместные пассажирские поездки, карпулинг, генетический алгоритм, динамическое ценообразование, регрессионная модель, многомерная задача о рюкзаке.

Цель работы: разработка интегрированной вычислительной модели междугородних совместных пассажирских поездок, обеспечивающей повышение коэффициента занятости провозных мощностей и совокупной выручки оператора на основе сочетания метаэвристического распределения мест и регрессионной модели динамического ценообразования.

Полученные результаты и их новизна: впервые формализован и количественно описан эффект обратной зависимости между пропускной способностью и коэффициентом занятости в задаче 0-1 MKP; разработана схема эвристического посева начальной популяции ГА (обеспечивает 97,77 % оптимума на нулевом поколении); предложена архитектура интегрированного декодера с тремя последовательными фильтрами; реализован паттерн предварительного вычисления тарифов (ускорение в 40 раз); специфицирована промышленная архитектура развёртывания (Medallion, Azure DevOps, Microsoft Purview). Экспериментально установлено: GA превосходит жадный алгоритм на 12,7–34,6 %; динамическое ценообразование дает прирост выручки на 12,6–41,1 % и занятости на 18,9–24,6 п.п..

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс кафедры экономической информатики БГУИР. Динамический срок окупаемости при внедрении по модели платформы-агрегатора составляет 15 месяцев; NPV за 3 года при ставке дисконтирования 12 % — 532 547 BYN.

Область применения: транспортная экономика, информационные системы на транспорте, аналитика данных.

SUMMARY

Ali Marwan Abdulkareem Farhan Ahmed

Improving Passenger Transportation through Optimization of Vehicle Occupancy and Dynamic Pricing

Keywords: shared passenger trips, carpooling, genetic algorithm, dynamic pricing, regression model, multidimensional knapsack problem.

Objective: to develop an integrated computational model for intercity shared passenger trips that increases vehicle capacity utilization and operator revenue by combining metaheuristic seat allocation with a regression-based dynamic pricing model.

Obtained results and their novelty: the inverse dependence effect between system throughput and fleet utilization in the 0-1 MKP was formally described and quantitatively analyzed for the first time; a heuristic seeding scheme for the initial GA population was developed (yielding 97.77% of the optimum at generation 0); a novel integrated decoder architecture with three sequential filters was proposed; a pre-computation pattern was implemented (reducing algorithm runtime by ~40×); an industrial deployment architecture (Medallion, Azure DevOps, Microsoft Purview) was specified. It was experimentally proven that GA outperforms the greedy algorithm by 12.7–34.6%; dynamic pricing increases total revenue by 12.6–41.1% and fleet occupancy by 18.9–24.6 percentage points compared to the static approach.

Degree of use: results are integrated into the educational process at the Department of Economic Informatics, BSUIR. The dynamic payback period for a P2P aggregator platform is 15 months; 3-year NPV at a 12% discount rate is 532,547 BYN.

Application area: transport economics, transportation information systems, data analytics.