



СИНХРОНИЗАЦИЯ РАСПИСАНИЙ В ПЕРЕСАДОЧНОМ УЗЛЕ В СРЕДЕ PTV VISUM

С. А. Андронов, О. В. Ульвачева

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В настоящей статье рассматривается задача синхронизации расписаний прибывающих электричек и местных автобусов на примере пересадочного узла станции Новый Петергоф в пригороде Санкт-Петербурга посредством программы PTV Visum. Для решения задачи была разработана транспортная модель рассматриваемого пересадочного узла. В статье описана методика синхронизации расписания рассматриваемым программным средством, которая выполнялась посредством процедур перераспределения по расписанию и оптимизации сдвига интервалов. В ходе выполнения процедур перераспределения удалось сократить общее время ожидания общественного транспорта на линии на 14 %, а на станции Новый Петергоф на 9%. Также была рассчитана стоимостная оценка времени и социально-экономический эффект от сокращения времени ожидания транспорта.

Ключевые слова: пересадочный узел, пропускная способность, общественный транспорт, расписание движения, синхронизация расписания, время ожидания пассажира, PTV VISUM.

Для цитирования:

Андронов С. А., Ульвачева О. В. Синхронизация расписаний в пересадочном узле в среде PTV Visum // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №2 (32), ISSN 2077-5687. – СПб.: ГУАП., 2022 – с 73–87. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-2-73-87.

SYNCHRONIZATION OF SCHEDULES AT THE TRANSFER HUB IN THE PTV VISUM ENVIRONMENT

S. A. Andronov, O. V. Ulvacheva

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

This article discusses the problem of synchronizing the schedules of arriving commuter trains and local buses using the example of the transfer hub of the New Peterhof station in the suburbs of St. Petersburg through the PTV Visum program. To solve the problem, a transport model of the transfer node in question was developed. The article describes the method of synchronization of the schedule by the considered software, which was performed through the procedures of redistribution according to the schedule and optimization of the shift of intervals. During the implementation of the redistribution procedures, it was possible to reduce the total waiting time for public transport on the line by 14%, and at the Novy Peterhof station by 9%. The cost estimate of the time and the socio-economic effect of reducing the waiting time for transport were also calculated.

Keywords: transfer hub, capacity, public transport, timetable, timetable synchronization, passenger waiting time, PTV VISUM.

For citation:

Andronov S. A., Ulvacheva O. V. Synchronization of schedules in a transfer hub in the PTV Visum environment // Systems analysis and logistics: №2 (32), ISSN 2077-5687. – Russia, SaintPetersburg.: SUAI., 2022 – p. 73–87. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-2-73-87.

Введение

Транспортная мобильность населения мегаполисов и комфортность поездок определяется пропускной способностью городской транспортной системы. От эффективности транспортной инфраструктуры зависит показатель общего экономического благосостояния города, привлекательности его для жизни, работы и отдыха.

Задача минимизации времени ожидания на остановках является особенно значимой для пригородов. У пассажиров, пребывающих на железнодорожном транспорте нет другой сравнимой по стоимости альтернативы добраться в нужное место, кроме как на социальных автобусах, но из-за отсутствия синхронизации расписаний в пересадочных узлах время ожидания может становиться недопустимо большим. Проблема усугубляется неравномерностью транспортных потоков во времени и пространстве, на которую влияет



множество таких вероятностных факторов, как загруженность, состояние дороги, параметры внешней среды и т. д. Не редкость, что наземный маршрутный транспорт не справляется с образующимся на остановках пассажиропотоком особенно в часы «пик». Не сумевшие совершить пересадку пассажиры вынуждены ждать следующее транспортное средство (ТС), которое прибывает много позднее. Все это приводит к увеличению времени ожидания пассажирами транспортных средств, росту финансовых затрат и снижению комфортности поездки.

В настоящей статье рассматриваются задача минимизации ожидания времени пассажирами на остановочном пункте станции Новый Петергоф, вблизи которой расположен железнодорожный вокзал Новый Петергоф. Решение задачи синхронизации расписаний на основе моделирования позволит увеличить пропускную способность узла, сократив время ожидания пассажирами на остановках наземного транспорта во время выполнения пересадок с одного маршрута на другой.

Обзор подходов построения расписания движения общественного транспорта

Формирование расписания движения транспортного общего пользования дает возможность сокращать время ожидания на остановочном пункте и позволяет уменьшить вероятность пропуска транспортных средств. Согласованный график движения позволяет затрачивать меньше времени на пересадку, а также не допускает скопление подвижного состава на остановочном пункте.

В работе [1] авторы описывают следующие методы работы над расписанием движения транспорта:

- Эвристические методы (задача коммивояжера, метод ветвей и границ);
- Метаэвристические алгоритмы (генетические алгоритмы, метод имитации отжига, метод муравьиных колоний);
- Графический метод составления расписаний.

Категории подходов к формированию расписания движения транспорта общего пользования: методы учитывающие, внешние и внутренние факторы системы и методы, избирательно учитывающие факторы, влияющие на систему.

Методы, относящиеся к первой категории, могут учитывать такие факторы, как параметры эффективности процесса перевозок пассажиров, различные экономические показатели (прибыль, производительность, затраты на перевозку), параметры транспортной сети.

Критериями эффективности процесса перевозки пассажиров можно обозначить такие параметры, как равномерность интервала движения общественного транспорта (ОТ), минимальные времена ожидания и перемещения пассажиров на ТС ОТ;

На сегодняшний день большой популярностью пользуется тактовый метод формирования расписания. Тактовое расписание – расписание, интервал которого является кратным делителем часа (5, 15, 30 и т. д.). Данный тип расписания не обусловлен только спросом транспорта. Движение по линии происходит ежечасно. Такой график движения очень легко запоминается. Зная точное время прибытия транспорта, пассажир планирует заблаговременно свою поездку. Подходит на остановку уже к прибытию автобуса, чем сокращает временные потери на ожидание и дальнейшую пересадку. Некоторые маршрутные линии имеют регулярный график, но их расписания не согласованы с другими маршрутами. Выполнение пересадки может занять в таком случае очень много времени.

Тактовое расписание является административной мерой, не нуждающейся в дополнительных финансовых вложениях. В случае возникновения непредвиденных обстоятельств диспетчеры оперативно вносят корректировки в график движения и выпускают на линию резервный подвижной состав. Этот тип расписания дает возможность синхронизировать расписания нескольких маршрутов, пересекающихся в ТПУ.



Планирование расписаний для нескольких маршрутов позволяет решить следующие задачи:

1. Формирование равномерных интервалов в коридоре общего участка движения нескольких маршрутов;
2. Синхронизация времени прибытия и отправления между подвозящим и основным маршрутами.

В работе [2] посредством муравьиного алгоритма решается задача оптимизации расписания наземного городского транспорта. Описывается составление расписания городского транспорта, обеспечивающее максимальную удовлетворенность пассажиров и компании-перевозчика одновременно. Выделяется главное требование, предъявляемое пассажирами – минимизация времени перемещения от одной остановки до другой. Для компании-перевозчика важна экономическая выгода, в связи с этим предлагается минимизировать количество автобусов на маршрутах при наибольшем объеме перевозок. Выбранный метод составления расписания адаптирован для применения в задаче составления расписания ГПТ и, как утверждают авторы, помогает улучшить эффективность существующего расписания ГПТ.

В работе [3] описаны четыре разных метода составления расписания, используемые для формирования интервалов движения автобусов. В этом процессе разрабатывается список времени отправления с равными и неравными интервалами. альтернативные методы создания расписания движения наземного транспорта с учетом данных о пассажиропотоке. В ней ставятся следующие цели:

- 1) Оценка предполагаемых вариантов расписания с точки зрения необходимых ресурсов;
- 2) Увеличение соответствия времени отправления автобусов потребностям пассажиров;
- 3) Формирование альтернативных графиков движения транспорта, предназначенного для отдельных временных промежутков в расписании;
- 4) Возможность изменений в частоте отправок автобусов в качестве исключений, известных только составителю расписания и не зависящих от пассажиропотока;
- 5) Составление расписания с использованием техники сглаживания интервалов;
- 6) Интеграция различных настроек интервалов и методов составления расписания.

Многие составители расписания сталкивались с проблемой того, как установить время отправления в транзитные сегменты между смежными периодами времени. Если использовать средний интервал, это может привести к переполненности пересадочного пункта и транспортного средства. Например, в [4] предложен сглаживающий алгоритм, целью которого является установка в транзитном времени средней желаемой степени заполнения, а не средний интервал. Для тех случаев, когда интервалы неравномерны, представлена процедура по сбалансированию загрузки транспортного средства, где основной задачей является установка времени отправления для каждого автобуса в определенный временной промежуток таким образом, чтобы максимальная загрузка автобуса соответствовала желаемому уровню.

В работе [5] предложены и проанализированы три различных метода по наилучшему соотношению пассажиропотока с существующим расписанием и сокращению количества отправок. Так метод №1 позволяет спроектировать время отправления так, чтобы интервалы были равными, а переходы от одного времени суток к другому - плавными. В методе №2 определяется время отправления таким образом, чтобы в среднем автобусы заполнялись равномерно (в соответствии с предполагаемой вместимостью) в периоды максимального пассажиропотока. В метод №3 определяется такое время отправления, что загрузка автобуса в среднем не превышает предполагаемой вместимости, а равняется ей в соответствии с максимальными показателями вместимости каждого отдельного ТС.



Вышеописанные методы могут быть использованы в случаях, когда планировщику перевозок необходимо сбалансировать нагрузку на автобусы, во избежание их переполнения. Предыдущие исследования автора были проведены с целью понимания различных технологий создания графиков. Очевидно, что прошлое исследование на тему составления графиков движения автобусов было посвящено сокращению расходов или увеличению прибыли в соответствии с существующим или меняющимся пассажиропотоком.

Помимо увеличения прибыли и уменьшения расходов, составитель расписания сталкивается с проблемой сокращения времени ожидания.

Анализ исследований на тему синхронизации расписаний

Проблематика синхронизации возникает в результате того, что перестановка и комбинация всех возможных сроков отправления для всех линий транзитной сети создает большое пространство поиска, что в реальных изменяющихся условиях вызывает ряд проблем.

Ceder и другие авторы работы [6] считают, что на решение проблем небольшой транзитной сети может длиться около нескольких дней, хотя Cevallos и Zhao [7] утверждают тоже самое и для малых транзитных сетей.

В связи с этим поиск математического решения данной проблемы с полным поисковым пространством приводит к NP-трудной задаче. Данную задачу практически невозможно решить, используя только обычные ресурсы, поэтому нельзя найти точный алгоритм ее решения.

Rojas и Solis [8] считают, что трудность решения призывает к поиску новых алгоритмов и путей решения в комплексе.

В связи с этим выделяют два класса алгоритмов для решения комбинаторной оптимизации проблемы.

В качестве первого класса выступает точный алгоритм. Он является оптимальным и использует различные способы сокращения перебора. Однако, в таких алгоритмах зачастую увеличивается время вычисления, что при больших задачах приводит к практически полной невозможности.

В качестве второго класса выступают приближенные алгоритмы. Они эффективно работают в короткие сроки. Приближенные алгоритмы могут быть эвристическими и метаэвристическими.

Первые базируются на правдоподобных алгоритмах, а вторые на эвристических, имеют общее назначение алгоритмов.

Бывают случаи, когда большие сети общественного транспорта включают в себя точки прибытия и отправления, не объединенные одним маршрутом, и имеют ряд пересадок. В связи с этим чтобы сократить время от точки А до точки Б стараются сократить время ожидания во время пересадок. Это создает большое количество маршрутов, что повышает производственную гибкость и продуктивность транзитной цепи.

Иногда в больших маршрутных сетях существует необходимость пересадки в другие транспортные средства или виды транспорта. Эту проблему решают за счет синхронизации расписаний движения.

Bookbinder and Désilets [9] в своих работах рассматривали оптимизацию трансферов транзитной сети, таким образом, что время отправления автобусов из точки А спланировано с позиции средней функции неудобств $g(w)$ - некоторая функция времени ожидания, в которой приемлемость времени ожидания w соответствует восприятию пассажира. Для поиска лучшего решения измеряют время отправления на каждом маршруте путем отбора возможных вариантов.

В работе Ceder [10] рассмотрен метод синхронизации с позиции составителя расписания. В его случае пассажиры имеют возможность перемещаться с одного маршрута на другой, затрачивая минимум времени на ожидание. Для проектирования расписания был применен



эвристический алгоритм. Этот алгоритм был разработан и применен с использованием средств Турбо-Паскаля, чтобы достичь оптимальных решений в полиномиальное время. В его работе одновременное прибытие – это прибытие двух автобусов на один пересадочный узел. Это определение применяется только к часам «пик». При работе транзитной сети в остальное время частота отправлений автобусов, как правило, ниже, а системе свойственно наличие некоторого времени ожидания.

Математическая модель составления тактового расписания

В исследовании [11] автор проводит апробацию математической модели, предложенной Ceder, и предлагает модель являющейся близкой к квадратичной задаче о назначениях. Данная модель может быть применена для составления тактовых расписаний движения автобусов.

С позиций качественной организации пассажирских перевозок рекомендован принцип непрерывности потоков ТС или транспортных возможностей. Он имеет вид равномерной последовательности движения ТС на отдельных участках и соединение различных транспортных линий в единую систему. В результате автором водится принцип тактовых расписаний и интегральных тактовых расписаний.

В одном узле встречаются n ТС, работающих на n линиях. Прибытие и отправление осуществляются по веерной схеме, т. е. автобусы сначала последовательно прибывают, а затем последовательно убывают, рис. 1. Одновременное прибытие и отправление не допускается.

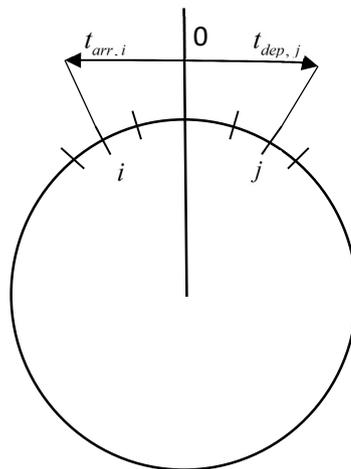


Рис.1. Веерная схема прибытий и отправлений транспорта

Пусть $t_{arr,i}$ – значение предполагаемого времени прибытия, $i = 1, \dots, n$, а $t_{dep,j}$ – значение предполагаемого времени отправления $j = 1, \dots, n$; $f(k, l)$ – матрица потока пересадок, $k = 1, \dots, n$, $l = 1, \dots, n$, $f(k, l) = 0$ при $k = l$.

Тогда математическая постановка задачи согласования расписаний движения ТС в пересадочном узле представляет собой:

Необходимо решить оптимизационную задачу:

$$\min \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f(k, l) * \tau(k, l) \quad (1)$$

где $\tau(k, l)$ – время на пересадку пассажиров с линии k на линию l .

Данная модель подходит для составления расписания автобусного парка на крупных пересадочных узлах без привязки к железнодорожному транспорту пригородного сообщения. Это позволит повысить привлекательность наземного общественного транспорта, снизить нагрузку на улицах, а также сократить время ожидания транспорта на остановочных пунктах.



Однако для согласования движения на региональных пересадочных узлах, где пассажиропоток формируется на пригородных железнодорожных станциях, требуется отталкиваться от расписания движения прибытия электричек.

Синхронизировать графики движения пригородного железнодорожного и городского общественного транспорта можно посредством программы PTV Visum. Процедура перераспределения транспортного спроса по расписанию устанавливает пути следования для каждой корреспонденции источник-цель и при поиске исходит из того, что пассажиры имеют информацию о расписании и рассчитывают свое время таким образом, чтобы подойти к остановке к прибытию первого подходящего маршрута общественного транспорта, минимизируя при этом время ожидания транспорта.

Данную процедуру следует применять в тех случаях, когда транспортное предложение общественного транспорта представлено ТС ОТ, следующими друг за другом с большими временными промежутками, где особенно важна координация расписания для согласования пересадок. При проведении данной процедуры учитывается точное расписание, и поэтому она особенно хорошо подходит для планирования местного транспортного сообщения в пригородных районах или для железнодорожных сетей.

В настоящем исследовании для решения задачи синхронизации расписаний привлекается программная система PTV Visum [12], функционал которой позволяет решать подобные задачи. Следует отметить, что описания методики синхронизации расписаний с использованием данного программного обеспечения в доступных источниках авторам встретить не удалось.

Моделирование перемещений на общественном транспорте на макроуровне в PTV Visum

Процедуру перераспределения по расписанию следует применять в тех случаях, когда транспортное предложение представлено транспортными средствами общественного транспорта, следующими друг за другом с большими временными промежутками, где особенно важна координация расписания для согласования пересадок. При проведении процедуры перераспределения по расписанию учитывается точное расписание, и поэтому она особенно хорошо подходит для планирования местного транспортного сообщения в пригородных районах или для железнодорожных сетей. Существуют два варианта, которые отличаются друг от друга только методом поиска пути следования: Branch and Bound (метод ветвей и границ) и поиск кратчайшего пути, которые являются разными компромиссами между объемом альтернатив с одной стороны и запросом памяти и времени расчета с другой стороны.

Перераспределение по расписанию характеризуется следующими свойствами:

- Процедура поиска Branch and Bound устанавливает все подходящие пути следования для всего периода анализа, при этом может быть установлено даже несколько путей следования с различным сопротивлением (например, самые короткие по времени пути следования и пути следования с минимальным количеством пересадок), начинающихся в один и тот же момент времени. В случае поиска кратчайшего пути, который производится исходя из одного критерия для каждого времени отправления всегда устанавливается только один путь следования, при этом, соответственно, уменьшается занимаемый объем памяти и время расчета. Поиск можно модифицировать, указав сопротивление поиска;
- Поиск Branch and Bound подходит для рассмотрения интервалов времени, например, целый день или несколько. Для поиска путей следования для определенного момента времени, например, при графическом поиске путей, предпочтительнее использовать поиск кратчайшего пути;
- Учитывается действительное время ожидания при пересадке и тем самым согласование пересадок при составлении расписания;



- Все параметры в периоде исследования можно рассчитать;
- Модель решения для выбора пути следования реалистично отображает действительное поведение при принятии решений пассажиром, так как пассажир, как правило, располагает информацией о предложении ОТ и делает выбор из предложенных путей следования.

Описание объекта исследования

Решается задача разработки модели транспортной сети для согласования расписания движения ТПУ станции Новый Петергоф в г. Петергоф, рис. 3.

Город Петергоф располагается в западной части города Санкт-Петербург в Петродворцовом районе, и только 30 км отделяют Петергоф и центр города.

Площадь района составляет района 106,9 кв. км, а численность населения начало 2022 года составляет более 142 тыс. человек. Состоит район из трех муниципальных образований таких, как города Петергоф, Ломоносов и поселок Стрельна [13].

Петергоф обладает высокой туристической привлекательностью, поскольку в нем расположено большое количество достопримечательностей и парков, например, Готическая капелла Петергофа, Колонистский парк, Большой Петергофский дворец, Дворец Монплеизир, Александрийский парк, Дворец Марли, Собор Петра и Павла и т. д.

Добраться до города можно воспользовавшись электричкой. Более 30 электричек отправляются с Балтийского вокзала ежедневно. Время в пути составит около 40 минут. Также добраться можно при помощи наземного городского транспорта общего пользования от станции метро Кировский завод, Автово и Проспект Ветеранов на автобусах №162, 201, 210 и множестве других маршрутных такси. Не исключен также вариант с личным транспортом.

На привокзальной площади железнодорожной станции располагаются остановочные пункты «Станция Новый Петергоф» для следующих маршрутов наземного транспорта общего пользования: № 162, 201, 278, 350, 351А, 351Б, 352, 353, 354, 355, 356, 360, 463, 463А, 489. ОТ позволит добраться в любую точку, однако из-за несогласованного расписания движения время ожидания пассажиров в пересадочном пункте иногда превышает более 20 минут. Рассматриваться далее будут маршруты № 354 и 356. На рис.2 приведены маршруты социальных автобусов.

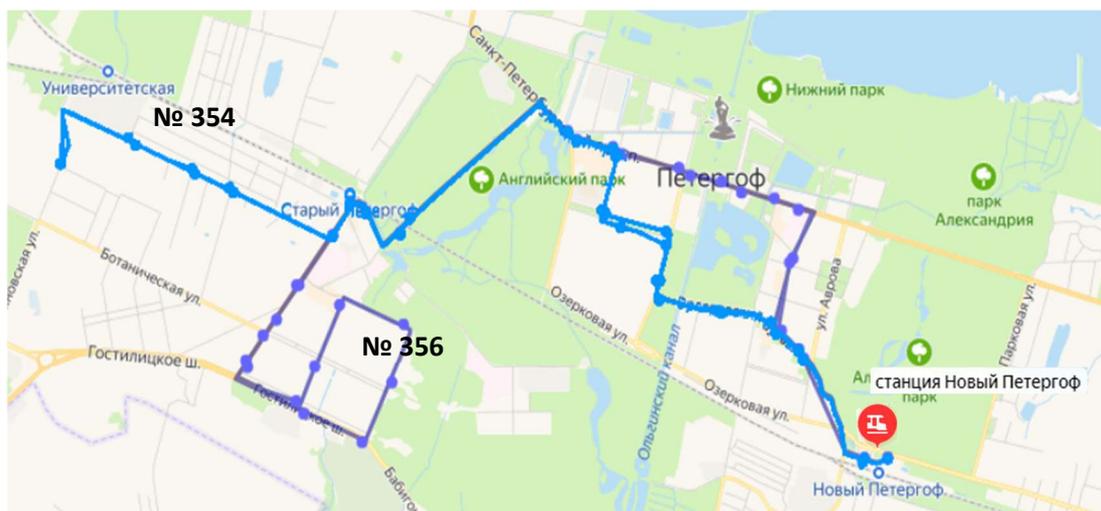


Рис. 2. Маршруты № 354 и 356 г. Петергоф

Исходными данными для построения транспортной модели являются расписание движения ОТ, данные, характеризующие состояние УДС такие как: правила приоритета проезда, ширина и количество полос движения, пропускная способность некоторых отрезков, а также расписание движения наземного ОТ, пассажиропоток и т. д. Некоторые из этих данных



можно получить не только опытным путем, но и посредством картографических систем Яндекс.Карты или Google Maps. Использование таких картографических сервисов позволяет получать необходимую информацию довольно высокой степени точности и детализации.

Разработка транспортной модели в PTV Visum

Разработка транспортной модели в PTV Visum требует прохождения нескольких этапов.

Этап 1. Выбор растровой основы для разработки модели пересадочного узла. В данной работе в качестве такой основы была выбрана схема на основе встроенной спутниковой растровой карты максимальной детализации OpenStreetMap, которую используют ПО компании PTV Group.

Этап 2. Построение УДС города начинается с нанесения на растровую основу узлов и отрезков. Это позволяет отстраивать транспортные магистрали, перекрестки с регулируемым и нерегулируемым движением на выбранном участке.

Этап 3. Корректировка отрезков сети, исходя из средней скорости передвижения по ним. Для транспортной сети Петергофа требуются следующие типы дорог:

- Скоростная дорога, имеющая две полосы движения на одной проезжей части;
- Широкие городские улицы, которые расположены в северной части города, имеющие две полосы движения в обоих направлениях;
- Односторонние и двусторонние городские улицы, имеющие по одной 1 полосе движения в направлении;
- Дороги и улицы местного значения, которые составляют большую часть от общей массы: дороги в жилых зонах и проезды с однополосным двусторонним движением наименьшей скорости;
- Железная дорога.

Этап 4. Создание остановочных пунктов.

Данные для имитационной модели маршрутной сети ОТ включает в себя данные о маршрутах следования транспорта, остановочных пунктах, типах подвижного состава и его количестве, а также расписания движения маршрутного транспорта.

Поскольку ТС в моделях могут перемещаться только в пределах смоделированной сети, остановочные пункты необходимо соединить с сетью при помощи создания пункта на отрезке или узле сети. Остановка является самым крупный элемент иерархии, которая имеет в своем составе зоны и пункты остановки. При нанесении остановочных пунктов на сеть им необходимо присвоить им имя и задать маршруты следования ОТ, которые через нее пролегают.

Этап 5. Нанесение маршрутов движения ОТ как в прямом, так и обратном направлении. Для добавления в модель ОП и маршрутов движения автобусов 210, 351Б, 352, 354, 356 и 359 используются данные, полученные с помощью системы Яндекс.Карты.

Этап 6. Добавление расписания движения ОТ в транспортную модель.

На рис. 3 изображена отстроенная транспортная сеть г. Петергоф.

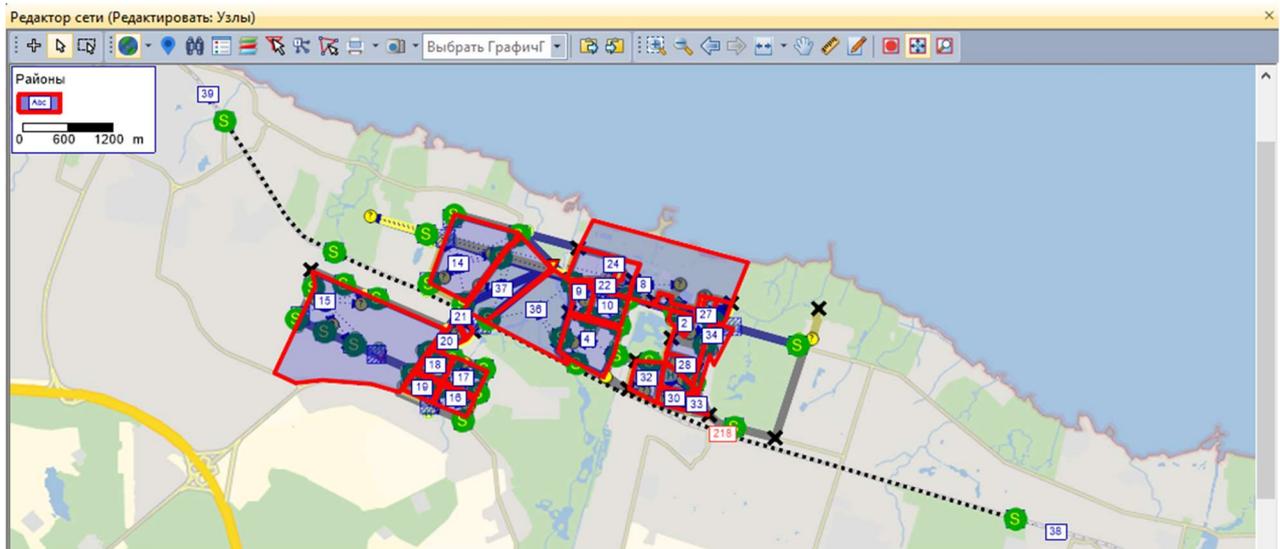


Рис. 3. Транспортная сеть г. Петергоф

Разработка согласованного расписания движения автобусов и пригородного железнодорожного транспорта в PTV Visum возможна благодаря перераспределению транспорта по расписанию и оптимизации сдвига интервалов.

Существующее расписание движения социальных маршрутов № 354 и 356, а также электропоездов в данном узле представлено на рис. 4.

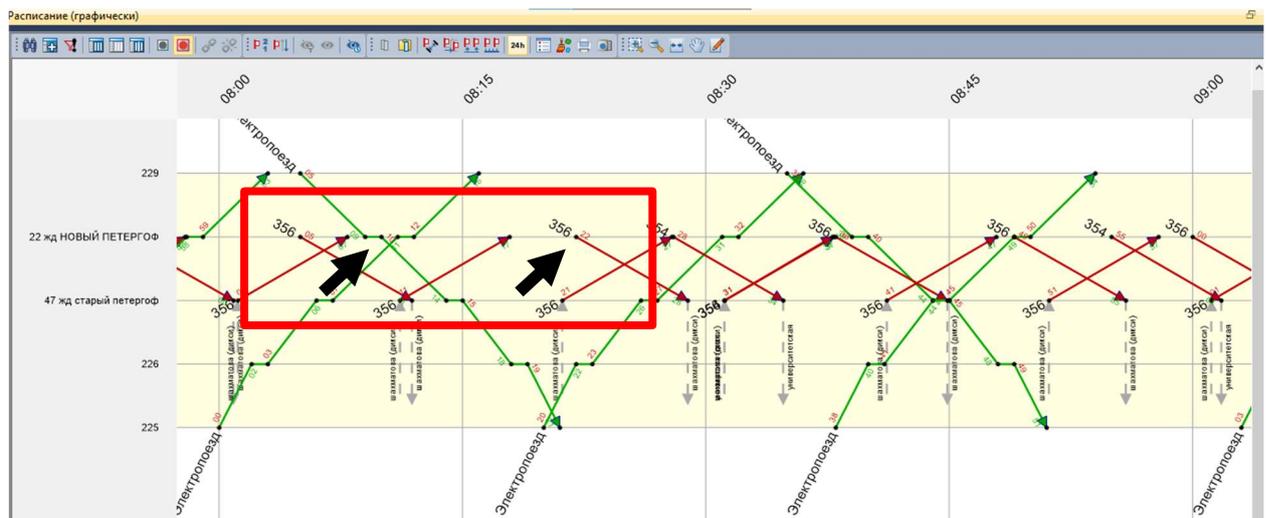


Рис. 4. Существующее расписания движения в графическом виде

На рисунке 5 видно, что по прибытии электропоезда, пассажирам необходимо ожидать более 10 минут, прежде чем приедет автобус. За эти 10 минут успевают приехать еще один электропоезд и пассажиры могут попросту не совершить посадку в ТС, поскольку его пассажировместимость ограничена. Они будут вынуждены ожидать прибытия следующего ТС. Отсюда возникает необходимость синхронизации расписания движения ОТ.

Время ожидания всеми пассажирами в сети с существующим расписанием составляет 528 часов 20 минут и 23 секунды и отдельно в ТПУ 268 часов 39 минут и 46 секунд, рис. 5.



Количество: 58	№	Код	Имя	Входящие(ПА)	Выходящие(ПА)	Пересаж.Всего-СерСпр(Х,ПА)	ВрОж.Перес(ПА)
Сумма	5971			117796	117796	14008	528h 20min 23s
11	22		жд НОВЫЙ ПЕТЕРГОФ	7407	9282	5637	268h 39min 46s

Рис.5. Время ожидания в ТПУ

Оптимизируемым параметром является время ожидания пересадки в ТПУ. Под этим временем понимается время, которое пассажир, дойдя до остановочного пункта, где он садится в следующий маршрут, ждет его прибытия.

Важные допущения, принятые в работе:

- В пересадочных узлах время, необходимое на пеший путь от остановочного пункта прибытия до остановочного пункта отправления принимается равным 0;
- Интервал расчета перераспределения ОТ принят 05:00 – 24:00. Этот интервал совпадает с интервалом, используемым в настройках процедуры оптимизации сдвига интервалов;
- Рассчитанный в модели транспортный спрос равномерно распределен по часам в течение суток;

Параметры оптимизации сдвига интервалов для согласования расписания в ТПУ, рис.6.

1) Допустимые изменения расписания – 5 минут. Это время, на которое мы позволяем смещать процедуру время отправления;

2) Маршруты являющиеся релевантными. Эта настройка предназначена для отбора маршрутов, пересадки которых учитываются процедурой сдвига интервалов при расчете оптимизируемого параметра времени ожидания. Отбираются при помощи выбора в настройках процедуры атрибута МАРШ_РЕЛЕВ. Это атрибут объекта сети "Маршруты" и может принимать значения 1 или 0. Если установлено значение 1 – то пересадки этого маршрута применяются в расчет, если 0 – не принимаются, рис. 7;

Рис. 6. Настройки оптимизации сдвига интервалов



Количество: 7	Имя	КодСисТр	МАРШР_ПЕРЕМ	МАРШР_РЕЛЕВ
1	210	В	0	1
2	3516	В	0	1
3	352	В	0	1
4	354	В	1	1
5	356	В	1	1
6	359	В	0	1
7	Электропоезд	Е	0	1

Рис. 7. Настройка списка маршрутов

3) Маршрут является переменным. Эта настройка предназначена для отбора маршрутов, для которых процедура сдвига интервалов будет стремиться расписание изменить. Отбираются при помощи выбора в настройках процедуры атрибута МАРШ_ПЕРЕМ. Это атрибут объекта сети «Маршруты» и может принимать значения 1 – пересадки этого маршрута применяются в расчет или 0 – пересадки не принимаются;

4) Оптимальное время ожидания при пересадке. Значение времени ожидания пересадки, к которому будет стремиться расчетная процедура. Установлено 3 минуты;

5) Вес остановки. При помощи этой настройки в модели отбираются остановки (пересадочные узлы), для которых происходит определение времени ожидания до и после корректировки расписания, – по сути того узла, для которого проводится оптимизация параметра времени ожидания при пересадке. Это делается при помощи изменения параметра «ВЕС» для объекта сети «Остановки» и выбора параметра «ВЕС» в настройках процедуры и корректировки его значения. В примере для рассматриваемой остановки 22 – станция Новый Петергоф установлено значение 100, для остальных узлов 0 - это означает, что в расчет принимается только один пересадочный узел. Чтобы это посмотреть нужно открыть вкладку Список (остановки), выбрать оформление вес и изменить значение параметра для остановки.

6) Выполнить генетический алгоритм. Оставляется активной со стандартными параметрами.

После настройки параметров процедур запускаем их выполнение и получаем следующие результаты, представленные на рис. 8.

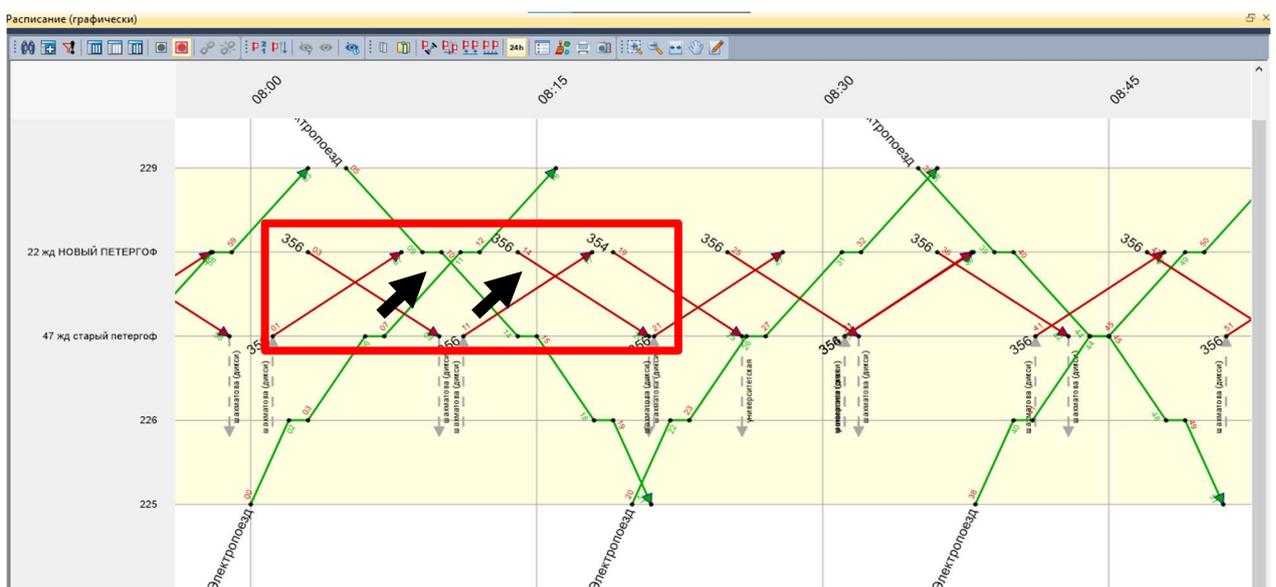


Рис. 8. Синхронизированное расписание графический вид



Экономическая оценка потерь времени от ожидания в пересадочном узле

Суммарное время пассажира $T_{полн}$, затраченное за всю поездку можно описать следующей схемой, представленной на рис. 11.

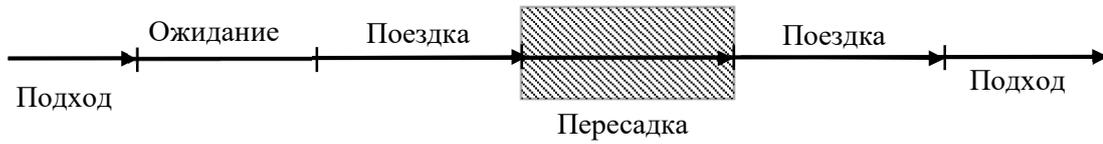


Рис. 11. Время, затрачиваемое пассажиром на поездку

Транспортные затраты $T_{трансп}$ – это время, затрачиваемое на перемещение в ТС, а именно «Поездка» + «Поездка» без учета времени на пересадку.

Накладные временные затраты $T_{накл}$ определяются разницей между суммарными затратами на всю поездку и транспортными затратами на перемещение.

Потери времени на пересадку определяются суммой временных потерь на перемещение от места высадки к месту посадки и времени ожидания транспорта, на который выполняется пересадка.

Сокращение периода ожидания пассажирами ТС способствует росту качества их обслуживания. Это возможно благодаря уменьшению временных затрат на ожидание пассажирами ТС на остановочном пункте как в начале поездки, так и при совершении пересадок.

Временные потери на ожидание ТС можно оценить с финансовой стороны. Так, например, Карасёва в работе [14] дает стоимостную оценку времени, затрачиваемого пассажирами на поездку куда-либо. Этот показатель основывается на ВВП страны или её субъекта [15]. Отсюда стоимостная оценка 1 чел.-часа может быть определена по формуле:

$$S_{ч-ч}^{BO} = \frac{ВВП}{365 * 24 * N} = \frac{5124,6 \text{ млрд. руб}}{365 * 24 * 3080,3 \text{ тыс. чел}} = 189,92 \text{ чел.-ч, руб.} \quad (2)$$

где $S_{ч-ч}^{BO}$ – валовая оценка 1 чел.-ч, руб.; $ВВП$ – показатель ВВП страны или её субъекта, руб.; 365 – число дней в году; 24 – количество часов в сутках; N – численность экономически активного населения в стране или её субъекте, чел.

Из личных наблюдений в среднем человек тратит около 12 минут на ожидание прибытия ТС для пересадки в одном направлении, то за пятидневную рабочую неделю суммарные временные затраты составят более 2-х часов.

Отсюда социально-экономический эффект от уменьшения потерь времени на пересадку за одну пятидневную рабочую составит:

$$\mathcal{E}_t = \sum_{i=1}^n I * S_{ч-ч}^{BO} = 2 \text{ ч} * 189,92 \text{ чел.-ч, руб} = 379,84 \text{ чел / руб.} \quad (3)$$

где $\sum_{i=1}^n I$ – суммарные временные затраты на ожидание в пересадочном узле маршрутного транспорта в исследуемом районе за пятидневную рабочую неделю.

Таким образом, общий экономический эффект от синхронизации расписания для нашего примера ежедневно по формуле составит:

$$\mathcal{E}_t = 25 \text{ ч} * 189,92 \text{ ч, руб} = 4748 \text{ руб.}$$



Заключение

Программная среда PTV Visum является удобным средством для разработки транспортных моделей для проектирования расписаний движения ОТ. Продукт позволяет получать расписание как в табличном виде, так и в графическом виде. Синхронизация расписания движения ОТ ТПУ в г. Петергоф выполнялась посредством процедур перераспределения по расписанию и оптимизации сдвига интервалов. Также возможна ручная процедура его корректировки.

В ходе выполнения процедур перераспределения удалось сократить общее время ожидания ОТ на линии на 14 % до 452 часов и 34 минут, а на станции Новый Петергоф на 9% до 243 часов и 21 минуты.

Суммарный экономический эффект от синхронизации расписания в пересадочном узле ежедневно будет составлять около 4 748 руб.

Таким образом, посредством процедуры перераспределения в PTV Visum была успешно реализована методика составления синхронизованного расписания движения общественного транспорта для минимизации времени ожидания пассажирами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарев А. А. Теория расписаний задачи и алгоритмы / А. А. Лазарев, Е. Р. Гафаров; под ред. С. Н. Васильева. Москва: Изд-во Московского гос. ун-та, 2011. С. 52 – 81.
2. Горохова Е. С. Формирование расписания пассажирского транспорта с помощью муравьиного алгоритма / Е. С. Горохова; науч. рук. Е. А. Кочегурова // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 9–13 ноября 2015 г.: в 2 т. — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 1. — С. 168–169.
3. Ceder A. Methods for creating bus timetables / A. Ceder // Transportation Research Part A. – 1986. – Vol. 21A, № 1. – P. 59-83.
4. Ceder, A. Public Transport Timetabling and Vehicle Scheduling. Advanced Methods for Transit Operations and Service Planning / A. Ceder: Honk- Kong, 2002.
5. Ceder, A. Creating bus timetables with maximum Synchronization / A. Ceder, B. Golany, O. Tal // Transportation Research Part A. – 2001. – Vol. 35. – P. 913-928.
6. Cevallos, F. Minimizing Transfer Times in a Public Transit Network with a Genetic Algorithm / F. Cevallos, F. Zhao // 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board: Washington, D.C., January 22-26, 2006.
7. Cevallos, F. Minimizing Transfer Times in a Public Transit Network with a Genetic Algorithm / F. Cevallos, F. Zhao // 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board: Washington, D.C., January 22-26, 2006.
8. Ibarra-Rojas, O. J. Synchronization of bus timetabling / O. J. Ibarra – Rojas, Y. A. Rios – Solis // Transportation Research Part B: Methodological. – 2012. – Vol. 46, № 5. – P. 599-614.
9. Bookbinder, J. H. Transfer optimization in a transit Network / J. H. Bookbinder, A. Desilets // Transportation Science. – 1992. – Vol. 26, № 2. – P. 106-118.
10. Ceder, A. Creating bus timetables with maximum Synchronization / A. Ceder, B. Golany, O. Tal // Transportation Research Part A. – 2001. – Vol. 35. – P. 913-928.
11. Капитонов Ю. А. Математическое моделирование расписаний в региональной пассажирской системе с одним пересадочным узлом / Ю. А. Капитонов // Транспорт: Наука, техника, управление. – 2015. – № 12. – С. 12–16.
12. PTV Visum 2020: [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «PTV - VISION». URL: https://ptv-vision.ru/produkty/visum_18 (дата обращения 02.05.2022).
13. Петродворцовый район - Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга



- [Электронный ресурс]. URL: https://www.gov.spb.ru/gov/terr/reg_petrodv/ (дата обращения 06.05.2022).
14. Карасёва М.Г. Основные подходы к стоимостной оценке затрат времени на передвижение населения с использованием городского транспорта / М. Г. Карасёва // Информационные технологии в образовании, науке и производстве – Минск: БНТУ, 2022. – С. 293-300.
 15. Итоги социально-экономического развития Санкт-Петербурга 2021 года [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/h2xp5> (дата обращения 25.04.2022).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андронов Сергей Александрович –

Кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: andronov_00@mail.ru

Ульвачева Ольга Викторовна –

Студент кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: olga.ulvacheva@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andronov Sergey Aleksandrovich –

DtS, associate professor of the department of system analysis and logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaja str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: andronov_00@mail.ru

Ulvacheva Olga Viktorovna –

Student of the department of system analysis and logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaja str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: olga.ulvacheva@mail.ru