



УДК 656.021

DOI: 10.31799/2077-5687-2021-1-49-58

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРУЖЕННОСТИ ПЕРЕКРЕСТКОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРУГОВЫХ ДИАГРАММ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ

Н. В. Мовчан

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Развитие мегаполисов приводит к изменениям в существующей улично-дорожной сети и к повышению автомобилизации. В работе приведен анализ транспортной системы г. Санкт-Петербург и динамика основных показателей. Рассмотрено влияние автомобилизации на перекрестки и на светофоры как на объекты цепи поставок. Приведён обзор основных инструментов исследования загруженности перекрестков, а также предложены способы вычисления “узких” мест при помощи круговых диаграмм интенсивностей. В качестве исходных данных для исследования были собраны показатели интенсивности движения в утренние, дневные и вечерние часы пик.

Ключевые слова: дорожное движение, перекресток, светофор, круговые диаграммы интенсивностей, цепь поставок.

Для цитирования:

Мовчан Н. В. Исследование загруженности перекрестков на основе использования круговых диаграмм интенсивностей // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №1(27), ISSN 2077-5687. – СПб.: ГУАП., 2021 – с. 49-58. РИНЦ, DOI: 10.31799/2077-5687-2021-1-49-58.

INTERSECTION CONGESTION STUDY USING CIRCULAR INTENSITY DIAGRAMS

N. V. Movchan

National Research University Higher School of Economics

The development of megacities leads to changes in the existing street and road network and an increase in motorization. This paper provides an analysis of the transport system of St. Petersburg and the dynamics of the main indicators. The effect of motorization on intersections and on traffic lights as objects of the supply chain is considered. An overview of the main tools for studying intersection congestion is given, and ways to calculate bottlenecks using circular intensity diagrams are proposed. Traffic volumes during morning, afternoon, and evening rush hours were collected as input data for the study.

Keywords: traffic, intersection, traffic lights, circular diagrams of intensities, supply chain.

For citation:

Movchan N. V. Intersection congestion study using circular intensity diagrams // System analysis and logistics.: №1(27), ISSN 2077-5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2021 – p. 49-58. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-1-49-58.

Введение

Развитие транспортных систем является одной из основных задач современных мегаполисов. Личные автомобили остаются самым популярным видом транспорта для перемещений по городу, что ведёт к увеличению интенсивности движения и повышению загруженности дорог и транспортных узлов. Определение и исследование наиболее загруженных участков является ключевым шагом на пути к улучшению транспортной обстановки.

1. Анализ улично-дорожной сети г. Санкт-Петербурга

Население современных мегаполисов ежегодно растёт, люди переезжают в крупные города в поисках работы и возможностей улучшения текущих условий жизни. Так, согласно данным «Петростат», численность постоянного населения Санкт-Петербурга на 1 января 2020 года составила 5398 тыс. человек, что на 14 тыс. больше по сравнению с показателем предыдущего года (5383 тыс. чел.) [5].

Развитие мегаполисов ведёт к изменениям УДС (улично-дорожной сети): увеличивается площадь и протяженность текущих дорог, создаются новые маршрутные линии. Для обеспечения планомерного развития УДС Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга подготовил Концепцию развития транспортной системы Санкт-Петербурга 2017-2038 гг с



перспективой до 2048 г. Среди материалов концепции приведена динамика изменения количественных характеристик УДС (рис. 1) [6].

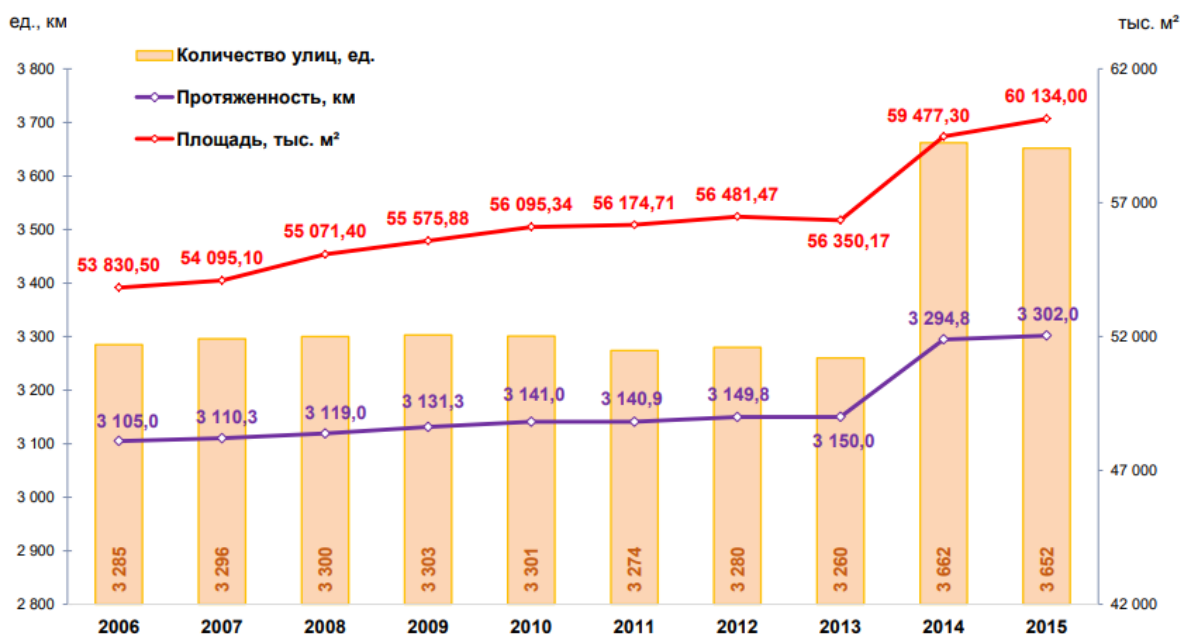


Рис. 1. Динамика основных количественных характеристик УДС в целом по Санкт-Петербургу за 2006 – 2015 гг

Из рисунка 1 следует, что за период с 2006 по 2015 годы количество улиц увеличилось на 11,17% (367 ед.), при этом протяженность улиц возросла на 6,34% (197 км.), а площадь – на 11,71% (6303,5 м²) [6]. В материалах также представлена статистика по УДС Санкт-Петербурга: например, среднее время поездки или средняя скорость движения с прогнозами значений на 2028 и 2038 гг. Она приведена в таблице 1 [6].

Таблица 1 – Основные показатели УДС Санкт-Петербурга с прогнозом на 2028 и 2038 гг

Показатель	2015 г.	2028 г.	2038 г.
Средняя длина корреспонденции, км	15,7	17,6	21,2
Среднее время поездки в агломерации (границы С-Петербурга), мин	75 (64)	78 (61)	89 (58)
Средняя скорость поездки, км/ч	12,6	14,9	16,40
Общее количество корреспонденций на индивидуальном транспорте, млн/сутки (из них мультимодальных)	1,95 (0,21)	2,68 (0,48)	3,77 (1,45)

Из данных, представленных в таблице 1, можно сделать вывод о том, что в прогнозные периоды планируется увеличение средней длины корреспонденции на 35%, в связи с чем и среднее время поездки возрастет на 18,6%. При этом перемещения в границах Санкт-Петербурга будут занимать меньше времени, средний показатель снизится на 9,4%. Также комитет прогнозирует увеличение количества корреспонденций на индивидуальном транспорте на 93%. Это связано, в первую очередь, с возрастающим уровнем автомобилизации в мегаполисах.



2. Влияние автомобилизации на транспортные узлы

Аналитическое агентство «Автостат» провело исследование парка транспортных средств (по состоянию на 1 июля 2020 года). Из данных следует, что в Российской Федерации на 1 тысячу жителей приходится в среднем 309 легковых автомобилей. Для сравнения, в 2018 году эта цифра была меньше на 1,4%, а в 2010 году на 35,4%. В Санкт-Петербурге легковым автомобилем обладает почти каждый третий житель, на 1 тысячу жителей в среднем приходится 317 машин [1].

Повышению уровня автомобилизации также способствует появление новой коронавирусной инфекции COVID-19. Аналитики Bank of America (BoFA) отмечают, что по итогам 2020 года количество поездок на такси упало на 8% (по сравнению с 2019), а в 2021 ожидается увеличение числа поездок на 37% [2]. Это объясняется тем, что многие жители обеспокоены безопасностью проезда на общественном транспорте и предпочитают пересаживаться на личный транспорт или такси, тем самым значительно увеличивая нагрузку на транспортную сеть.

Повышенная нагрузка особенно отражается на транспортных узлах, в системе УДС такими объектами являются перекрёстки. Перекрёстки регулируются светофорами, которые позволяют распределять потоки транспортных потоки. Однако важно помнить, что светофор – это, в первую очередь, оптическое устройство, которое необходимо собирать и доставлять до необходимого перекрёстка. В случае повышенной загрузки транспортного узла повышается риск сбоев и повреждений светофора, поэтому важно рассматривать их как объект цепи поставок.

John T. Mentzer с группой авторов в своей статье «Defining supply chain management» выделяет три типа цепей поставок: прямая, расширенная и конечная [7]. Сергеев В.И. в своей статье также описывают классификацию, состоящую из трёх видов цепей поставок: прямая, расширенная и максимальная цепь поставок [8]. При этом прямая и расширенная в обоих источниках идентичны (рис. 2 и 3) [8].

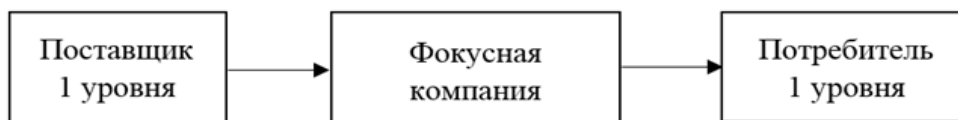


Рис. 2. Прямая цепь поставок

Прямая цепь поставок состоит из трёх участников: поставщика, фокусной компании и потребителя. При этом, как правило, фокусная компания определяет структуру цепи поставок и определяет взаимоотношения с контрагентами.

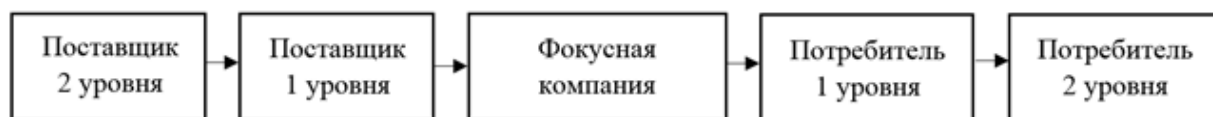


Рис. 3. Расширенная цепь поставок

Расширенная цепь помимо элементов, представленных в прямой, включает в себя потребителей и поставщиков второго уровня. Конечная и максимальная цепи поставок также схожи между собой, но различаются уровнем связей между фокусной компанией и посредниками. Максимальная цепь поставок, предложенная Сергеевым В.И. представлена на рисунке 4 [8].

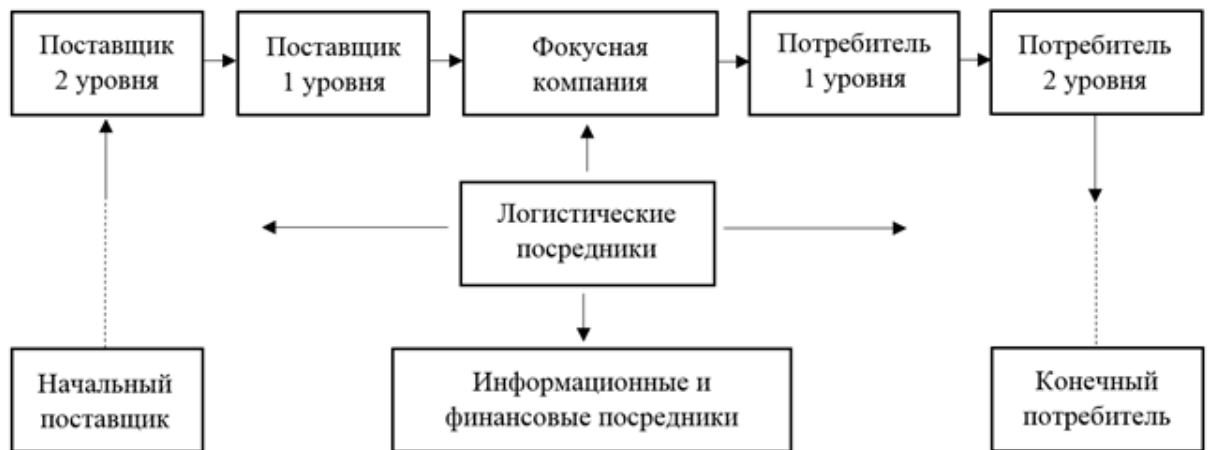


Рис. 4. Максимальная цепь поставок

Максимальная цепь состоит из фокусной компании и всех её контрагентов слева (вплоть до поставщиков исходного сырья и природных ресурсов), определяющих ресурсы фокусной компании – на «входе», и сети распределения справа – включая конечных (индивидуальных) потребителей, а также логистических, институциональных и прочих посредников.

Конечная цепь поставок, предложенная John T. Mentzer и группой авторов, представлена на рисунке 5 [7].

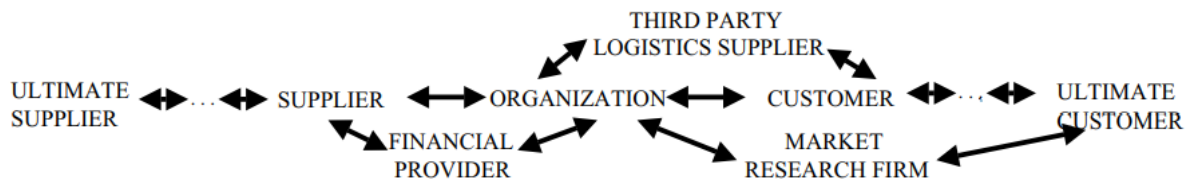


Рис. 5. Конечная цепь поставок

Отличие конечной цепи поставок от максимальной заключается, в первую очередь, в том, что в цепи присутствуют 3PL-провайдеры, связанные с фокусной компанией и потребителями, но не поставщиками. А вот финансовые и информационные (предоставляющие информацию об исследованиях рынка) провайдеры связаны не только с организацией, но и также с поставщиками и конечным потребителем. Таким образом, участники цепи поставок в обоих вариантах остаются одинаковыми, меняется только организация связей между ними.

3. Объект исследования и исходные данные

В качестве объекта исследования в данной работе была выбрана система перекрёстков, расположенная в Красногвардейском районе г. Санкт-Петербург и объединяющая между собой следующие улицы: шоссе Революции, проспект Энергетиков, Индустриальный проспект, Ириновский проспект и проспект Косыгина (рис. 6). Для удобства перекрёстки на рисунке размечены английскими буквами А-Е.

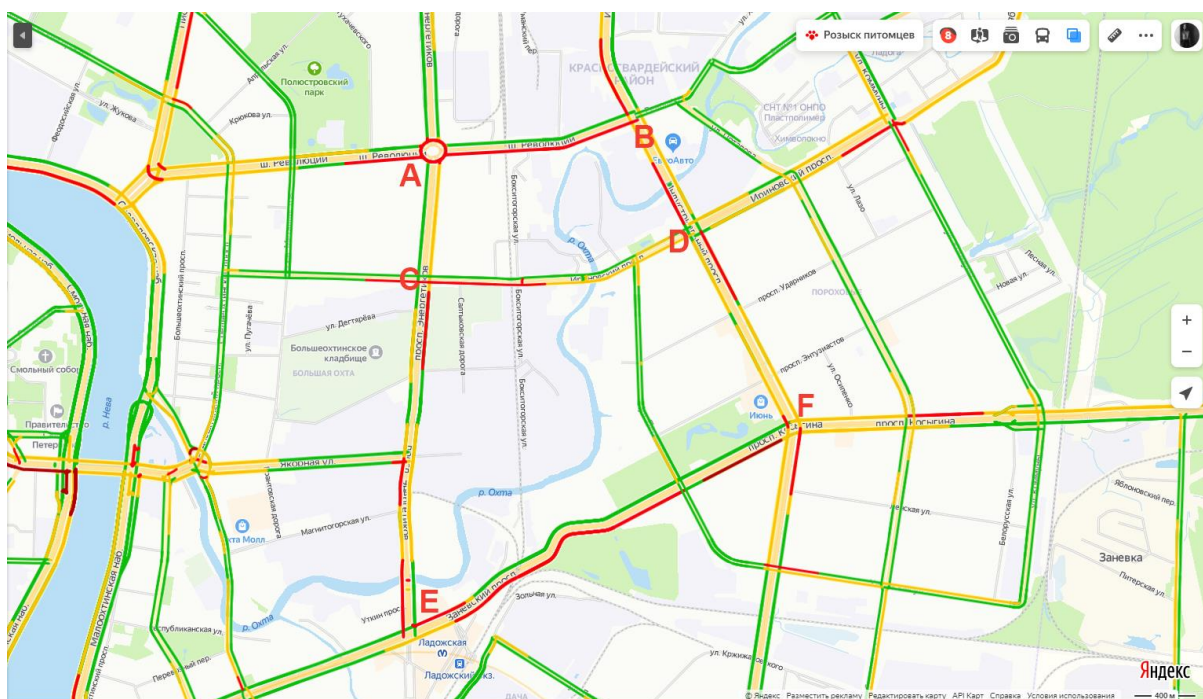


Рис. 6. Сеть исследуемых перекрестков Красногвардейского района

Сеть перекрестков объединена системой из 46 стандартных светофоров, регулирующих движение транспортных и пешеходных потоков. Данная сеть была выбрана для исследования из-за повышенной загрузки дорог, особенно в пиковые часы, что повышает шансы повреждения или выхода из строя наиболее нагруженных светофоров.

Для предотвращения повреждений объектов регулирования транспортного потока необходимо обратить внимание на наиболее нагруженные участки транспортной сети. Одним из популярных ресурсов для анализа загруженности сети является веб-сервис «Яндекс.Пробки». В исследованиях данного сервиса степень загрузки транспортного участка определяется на основе скорости, с которой его проходят машины. Так, текущая скорость сравнивается с «эталонной», то есть с которой машина бы прошла тот отрезок, если бы дорога была совершенно свободна. Соответственно, чем больше разница между этими двумя показателями, тем плотнее движение на транспортном участке.

Для оценки загруженности улиц используется балльная система от 0 до 10, в которой значение 0 присваивается абсолютно свободным дорогам, а 10 баллов означают, что передвигаться пешком будет быстрее [3]. В таблице 2 представлено соответствие дорожной обстановки и баллов [3].

Таблица 2 – Система баллов веб-сервиса «Яндекс.Пробки»

Количество баллов:	Интерпретация дорожной ситуации:
1 балл	Дороги свободны
2 балла	Дороги почти свободны
3 балла	Местами затруднения
4 балла	Местами затруднения (сильнее)
5 баллов	Движение плотное
6 баллов	Движение затрудненное
7 баллов	Серьезные пробки
8 баллов	Многокилометровые пробки
9 баллов	Город стоит
10 баллов	Пешком быстрее



Предложенная веб-сервисом «Яндекс.Пробки» балльная система позволяет оценить уровень загруженности участков транспортной сети или всей системы в целом. Например, благодаря системе цветов можно визуальнo оценить степень загрузки дорог, изображённых на рисунке 2. Однако такая поверхностная оценка не позволяет понять, какая нагрузка приходится на каждый из исследуемых перекрёстков.

Для анализа загруженности объекта исследования были собраны исходные данные. Сбор проводился в утренние, дневные и вечерние часы пик. Как и ожидалось, наибольшая нагрузка на транспортную сеть была замечена в вечерние часы пик, в особенности в 18:00. Примеры исходных данных интенсивности движения в утренние, дневные и вечерние часы пик приведены в таблицах 3-5.

Таблица 3 – Интенсивность движения в утренний час пик (10:00)

	Пер. А	Пер. В	Пер. С	Пер. D	Пер. Е	Пер. F
Пер. А	-	28	21	-	-	-
Пер. В	28	-	-	30	-	-
Пер. С	21	-	-	56	75	-
Пер. D	-	30	55	-	-	51
Пер. Е	-	-	75	-	-	87
Пер. F	-	-	-	61	105	-

Таблица 4 – Интенсивность движения в дневной час пик (13:00)

	Пер. А	Пер. В	Пер. С	Пер. D	Пер. Е	Пер. F
Пер. А	-	29	21	-	-	-
Пер. В	25	-	-	30	-	-
Пер. С	21	-	-	61	75	-
Пер. D	-	30	54	-	-	51
Пер. Е	-	-	75	-	-	96
Пер. F	-	-	-	45	96	-

Таблица 5 – Интенсивность движения в вечерний час пик (18:00)

	Пер. А	Пер. В	Пер. С	Пер. D	Пер. Е	Пер. F
Пер. А	-	44	25	-	-	-
Пер. В	24	-	-	39	-	-
Пер. С	27	-	-	83	99	-
Пер. D	-	30	55	-	-	51



Пер. Е	-	-	84	-	-	144
Пер. F	-	-	-	61	86	-

В таблицах 3-5 представлены данные о количестве транспортных средств, которые находятся исследуемом на транспортном участке на момент сбора данных. Данные, приведённые в табличном виде, позволяют оценить динамику изменений интенсивностей в утренние, дневные и вечерние часы. Для того, чтобы визуализировать данные, представим их в виде графика функции (рис. 7).

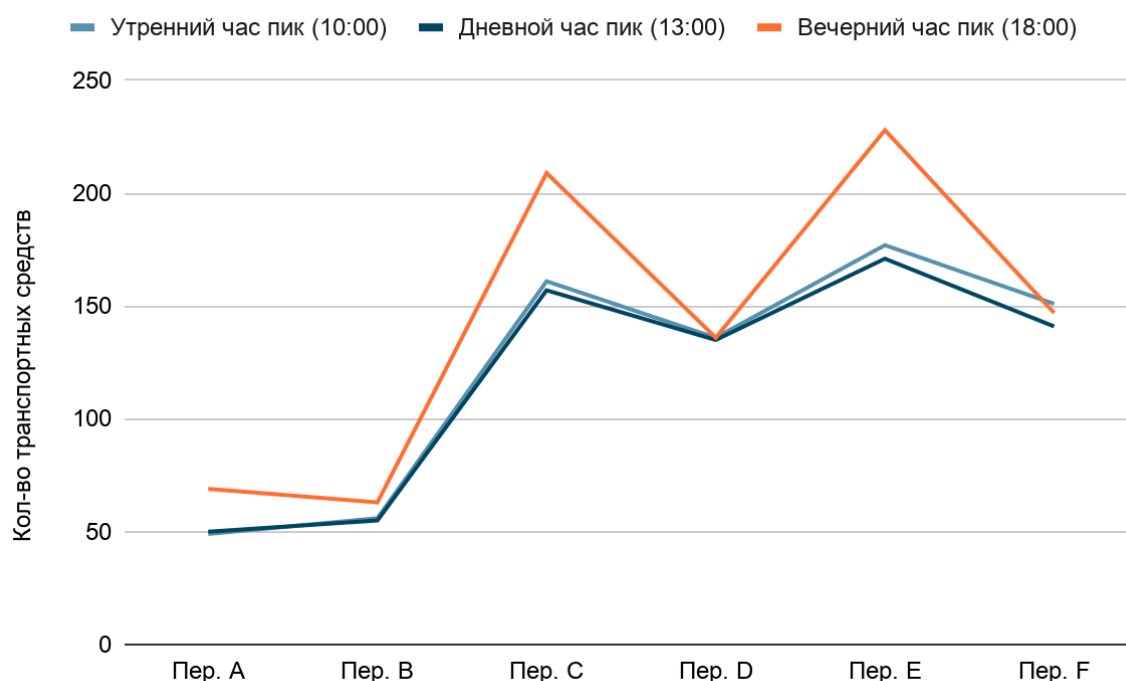


Рис. 7. Интенсивность движения транспортных средств в утренние, дневные и вечерние часы пик

При помощи данного графика можно визуально отследить, как меняется интенсивность движения в течение дня; определить, в какой час пик передвигается больше машин, а также выделить перекрёсток с наибольшей проходимостью машин. Однако график функции не позволяет рассмотреть всю систему на микроуровне. Для этого необходимо использовать инструменты более детального анализа, например, круговые диаграммы интенсивностей.

4. Круговые диаграммы интенсивностей

Данные диаграммы обеспечивает структурированный подход к анализу комплексных взаимодействий объектов на макроуровне. Основным элементом диаграммы является круг, который циклически объединяет другие элементы. Внутри круга расположены дуги, которые используются для отображения направлений и шириной показывают интенсивность движения между объектами исследования. Также возможно размещение на диаграмме дополнительной аналитической информации: процентов, шкал и т.д. [4].

Для проектирования круговых диаграмм интенсивностей используется программа «Circos» — это открытый программный пакет для визуализации данных и информации. Важно отметить, что программа не проводит анализ вносимых данных, а только визуализирует их. Также программа не позволяет создать интерактивную визуализацию. Например, не позволяет динамически добавлять



или изменять данные – «Circos» можно использовать только для создания графиков.

Глядя на данные, представленные в таблицах 2-4 или в виде графика функции на рисунке 7, трудно определить, какой из перекрёстков является наиболее загруженным, поэтому обратимся к возможностям программы «Circos» (рис. 8-10).

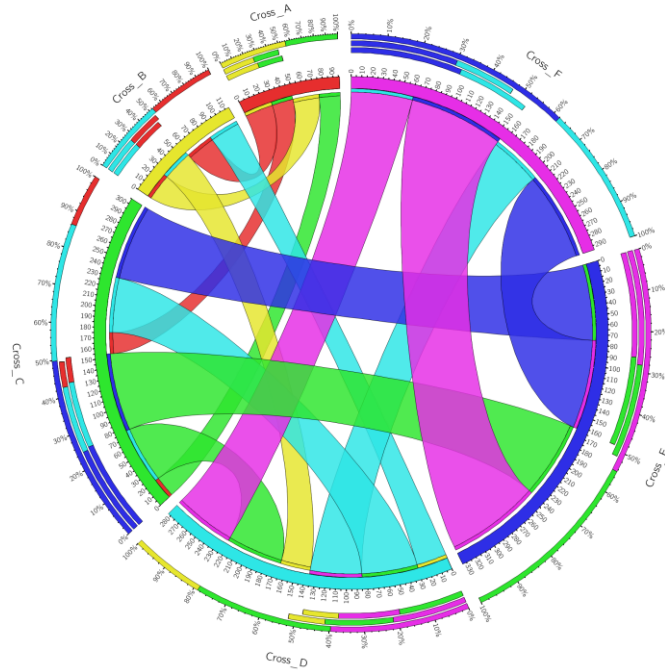


Рис. 8. Результат визуализации данных интенсивности движения в утренние часы пик (10:00) в сетевой версии программы «Circos»

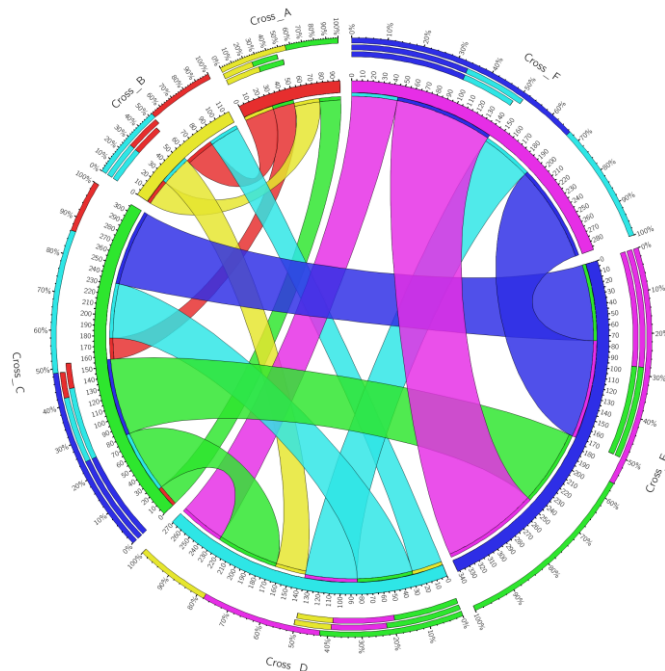


Рис. 9. Результат визуализации данных интенсивности движения в дневные часы пик (13:00) в сетевой версии программы «Circos»

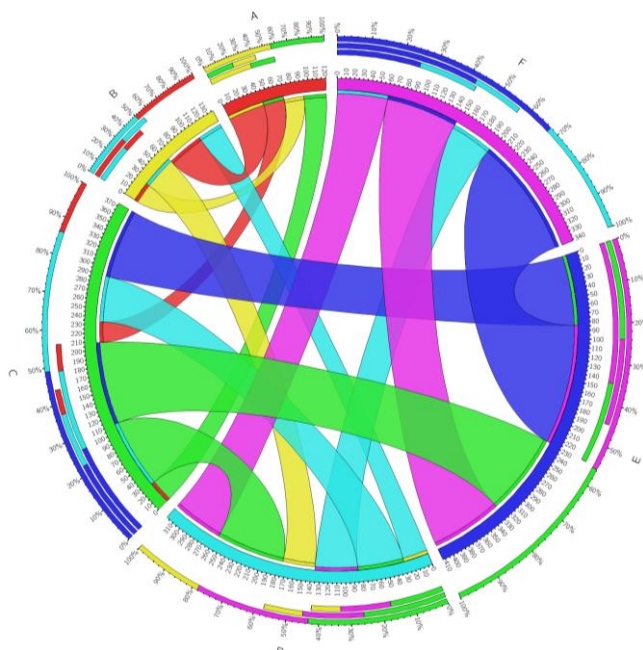


Рис. 10. Результат визуализации данных интенсивности движения в вечерние часы пик (18:00) в сетевой версии программы «Circos»

Диаграммы, представленные на рисунках 8-10, позволяют не только определить интенсивность транспортных потоков и отследить динамику ее изменений в течение дня, но и выявить, на каких перекрестках наблюдается наибольшая загруженность. Исходя из полученных данных, наибольший транспортный поток проходит через перекресток Е, который объединяет Заневский проспект и проспект Энергетиков. Следующими по уровню загруженности являются перекрестки С и F, проходящие через Ириновский проспект и пр-т Энергетиков, Индустриальный пр-т и пр-т Косыгина соответственно.

Заключение

Подводя итог, следует ещё раз обратить внимание на то, что Санкт-Петербург с постоянно развивающейся и увеличивающейся УДС является одним из крупнейших городов России. Повышение автомобилизации ведёт к увеличению нагрузки на транспортную сеть и, как следствие, к учащению поломок регулирующего оборудования.

По результатам вышеприведенного исследования можно сделать вывод о том, что наиболее плотный транспортный поток наблюдается в вечерние часы пик, в особенности в 18:00 по пятницам. Использование круговых диаграмм интенсивностей позволяет визуализировать интенсивности движения между объектами исследования, а также сделать выводы о загруженности отдельных узлов. Из приведенных диаграмм следует, что наибольшая нагрузка приходится на перекресток, обозначенный буквой Е, объединяющий пр-т Энергетиков и Заневский пр-т. Следовательно, вероятность поломки светофорного оборудования на данном перекрестке значительно выше.

Поскольку светофоры являются объектами определённой цепи поставок, при внезапной поломке оборудования потребуется некоторое время на его замену. Требуемое время может меняться в зависимости от вида цепи поставок, её протяженности и количества участников. Однако наличие информации об интенсивности движения и вероятности поломки конкретного светофора позволяет внести корректировки в цепь поставок с целью предотвращения поломки или ускорения ее устранения.

Таким образом, при помощи собранных табличных данных, графиков функции и круговых диаграмм интенсивностей можно отследить «узкие» места на транспортном участке, которые



вероятнее выйдут из строя. Использование предложенных в статье инструментов может помочь предотвратить возможные поломки оборудования и устранить заторы, вызванные этими повреждениями.

В качестве дальнейших направлений исследований необходимо рассмотреть понятие надёжности для светофорных объектов. После определения наиболее загруженного объекта необходимо проанализировать его светофорное оборудование с точки зрения надёжности: определить среднюю наработку на отказ, оценить вероятность возникновения ошибок. Так, помимо определения слабых элементов сетей, необходимо также предложить варианты их усиления, инструменты и методы реализации этих мер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обеспеченность автомобилями в крупнейших городах России. ТОП-20 [Электронный ресурс] // Аналитическое агентство «Автостат». URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/46332/> (дата обращения: 25.01.2021).
2. Такси раскрутили счетчик [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4642208> (дата обращения: 27.01.2021).
3. Как мы оцениваем загруженность улиц [Электронный ресурс] // Яндекс. URL: https://yandex.ru/company/researches/2017/jams_count (дата обращения: 23.01.2021).
4. Майоров Н. Н. Исследование работы морских пассажирских терминалов на основе диаграмм связей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2019. – №. 1.
5. Население. Оперативная информация [Электронный ресурс] // Петростат. URL: <https://petrostat.gks.ru/folder/27595> (дата обращения: 23.01.2021).
6. Концепция развития транспортной системы Санкт-Петербурга [Электронный ресурс] // Комитет по развитию транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга. URL: <https://krti.gov.spb.ru/dorozhnyj-kompleks/konceptsiya-razvitiya-transportnoj-sistemy-sankt-peterburga/> (дата обращения: 23.01.2021).
7. *Mentzer J. T.* et al. Defining supply chain management // Journal of Business logistics. – 2001. – Т. 22. – №. 2. – С. 1-25.
8. *Сергеев В.И.* Управление цепями поставок в России — миф или реальность? // Логистика и управление цепями поставок. 2004. – № 1. – С. 14–33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Мовчан Надежда Владимировна –
магистр
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
194100, Россия, Санкт-Петербург, Кантемировская ул., д. 3, корп. 1, лит. А.
E-mail: nmovchan@hse.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Movchan Nadezhda Vladimirovna –
master
National Research University Higher School of Economics
NRU HSE, 3A, Kantemirovskaya str., Saint-Petersburg, 194100, Russia
E-mail: nmovchan@hse.ru