

ISSN 2222-9396 (Print)  
УДК 656.223(438)  
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-4-24>



## АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ПОЛЬШИ

Войцех КАМИНЬСКИ

Силезский технологический университет, г. Катовице, Польша  
E-mail: [Wojciech.Kaminski@polsl.pl](mailto:Wojciech.Kaminski@polsl.pl)

**Аннотация.** Представлены результаты оценки влияния социально-экономических факторов и объёма выполненной транспортной работы на вместимость подвижного состава, используемого на региональных железнодорожных пассажирских перевозках Польши. Исследование проводилось для железнодорожных линий, расположенных в различных регионах страны. Цель статьи – проверка наличия и оценка связей между вместимостью подвижного состава, используемого на региональных железнодорожных линиях, и показателями социально-экономической среды регионов, обслуживаемых этими линиями. Анализ проводился для 32 железнодорожных линий, расположенных в разных регионах (воеводствах) Польши. Для исследования в каждом воеводстве были выбраны по одной главной и местной линии. Средняя вместимость региональных поездов рассчитывалась для каждой из анализируемых линий. Выполнен расчёт значений частных коэффициентов корреляции между исследуемыми величинами. В расчётах среднее число мест в поездах использовалось как зависимая переменная, а социально-экономические показатели, влияющие на величину пассажиропотоков и объём выполненной транспортной работы, – как независимые. Расчёты выполнены с использованием статистических данных об объёмах перевозок и показателях социально-экономической среды за 2018 год. Результаты расчётов показали наличие сильной связи между вместимостью используемого подвижного состава и объёмом выполненной транспортной работы. На линиях с большим объёмом пассажирских перевозок используется более вместительный подвижной состав. С другой стороны, связь вместимости подвижного состава и социально-экономических факторов, определяющих размер пассажиропотоков, невелика.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, пассажирский транспорт, подвижной состав, коэффициент корреляции, вместимость, социально-экономические факторы, регион

© Каминьски В., 2020

Поступила: 01 апреля 2020; Принята к публикации: 17 июня 2020; Опубликована: 24 декабря 2020

### Для цитирования:

Каминьски В. Анализ обеспеченности подвижным составом региональных железнодорожных пассажирских перевозок Польши // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2020. Т.10. №1. С.4-24.  
<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2020-10-1-4-24>



Это произведение доступно по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 Всемирная  
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Введение

Объём пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте зависит от различных социально-экономических факторов, например, численности жителей, количества предприятий, а также числа автобусных и трамвайных маршрутов, обеспечивающих доступ из центра города к железнодорожному вокзалу. В свою очередь, величина пассажиропотока напрямую связана с объёмом выполненной транспортной работы [1].

Поскольку для удовлетворения возрастающего спроса на железнодорожные пассажирские перевозки требуется большее число поездов, то это является сигналом для увеличения как численности парка подвижного состава на определённой железнодорожной линии, так и использования более вместительных транспортных средств. Изменение числа пассажирских поездов на линии может осуществляться постепенно, в результате разработки нового годового графика движения поездов или его ежеквартальной корректировки. Это может быть реализовано путём изменения времени оборота поездов, в частности, времени простоя на конечных железнодорожных станциях (головных станциях или пунктах оборота составов).

Увеличение числа поездов на линии требует дополнительного финансирования, что может быть осуществлено достаточно быстро. Однако практически сложно быстро адаптировать провозную способность пассажирского железнодорожного транспорта к текущему спросу на перевозки. Поскольку собственником подвижного состава в Польше являются операторы пассажирских перевозок, то их задача заключается в предоставлении достаточного числа мест для пассажиров путём использования подвижного состава соответствующей вместимости при минимальных эксплуатационных затратах [2].

Состояние железнодорожной инфраструктуры в Польше систематически ухудшалось с конца 1980-х до начала XXI века. В течение последних десяти лет ситуация на многих железнодорожных линиях улучшается в результате ремонтов и модернизации [3]. Аналогичное улучшение наблюдается и в отношении подвижного состава, когда после длительного периода отсутствия закупок новых вагонов и локомотивов операторы пассажирских перевозок произвели их обновление.

Региональные железнодорожные пассажирские перевозки в Польше в настоящее время осуществляются различными операторами. Крупнейшим оператором является компания «Polregio», которая обслуживает региональные маршруты в десяти воеводствах (административная единица Польши). В оставшихся шести воеводствах работают следующие операторы: «Koleje Małopolskie», «Koleje Dolnośląskie», «Koleje Śląskie», «Koleje Wielkopolskie», «Koleje Mazowieckie» и «Łódzka Kolej Aglomeracyjna». Кроме того, в крупных мегаполисах, таких как Трójmieście (городская агломерация на севере Польши, включающая в себя Гданьск, Сопот и Гдыню) и Варшава, пассажирские перевозки обеспечивают следующие операторы: PKP

(Polskie Koleje Państwowe – Польские государственные железные дороги), SKM (Szybka Kolej Miejska – пригородный поезд), «Trójmieście» (принадлежит центральному правительству, региональным и местным властям), SKM «Warszawa» (собственность муниципалитета Варшавы), «Warszawska Kolej Dojazdowa» (принадлежит конгломерату самоуправлений), а также частный оператор «Arriva RP».

В связи с наличием множества операторов пассажирских перевозок в Польше, имеет место проблема согласования их работы на границах воеводств. Часто маршрут поездов одного оператора заканчивается на последней железнодорожной станции данного воеводства, что не обеспечивает надлежащие связи с соседними воеводствами.

Некоторые операторы имеют также проблемы с подвижным составом. Большая часть подвижного состава, включая все недавно приобретённые электропоезда и рельсовые автобусы, принадлежит воеводствам, которые предоставляют его операторам региональных пассажирских перевозок. Только региональные перевозчики имеют собственный подвижной состав. Однако это, в основном, старые вагоны. Кроме того, на региональном уровне работает множество операторов, парк подвижного состава которых состоит из небольшого количества вагонов. Недостаточное число вагонов объясняется тем, что новый подвижной состав приобретается в меньшем количестве, чем списывается изношенных вагонов и локомотивов.

Тем не менее, в настоящее время имеющийся в наличии подвижной состав обеспечивает средний объём пассажирских перевозок. Однако в случае поломки или ремонта транспортных средств наблюдается их нехватка. Это приводит к переполнению пассажирских вагонов или к необходимости перевода части пассажиропотока на автобусное сообщение.

До настоящего времени недостаточно изученным остаётся влияние различных социально-экономических факторов регионов с железнодорожным сообщением на использование вместимости железнодорожного пассажирского подвижного состава. Эти факторы, вероятно, оказывают существенное влияние на размер пассажиропотока, что, в свою очередь, определяет использование вместимости вагонов и потребность в подвижном составе.

В настоящем исследовании оценивается влияние социально-экономических факторов и объёма выполненной транспортной работы на загруженность пассажирского железнодорожного подвижного состава на отдельных железнодорожных линиях, расположенных в различных регионах Польши. Также была исследована взаимосвязь между выполненной транспортной работой и вместимостью подвижного состава. Расчёты проводились с использованием частных коэффициентов корреляции. В ходе данных расчётов среднее число мест в транспортных средствах использовалось в качестве зависимой переменной, а социально-экономические факторы, влияющие на размер пассажиропотока и объём выполненной транспортной работы, – в качестве независимых величин.

## 2. Характеристика исследуемых железнодорожных линий

Анализ проводился для 32 железнодорожных линий, по которым осуществляются региональные пассажирские перевозки. Выбраны линии, расположенные в разных воеводствах. От каждого воеводства были выбраны одна репрезентативная основная линия и одна местная линия (рис. 1). Основные железнодорожные пути отмечены красным цветом и числами 1-16, а зелёным цветом и числами 17-32 – местные линии. Неко-

торые из проанализированных железнодорожных линий исследовались полностью, другие – только на ограниченных участках, расположенных в пределах одного воеводства.

В табл. 1 представлен список проанализированных железнодорожных линий с группировкой по воеводствам, в которых они расположены. Кроме того, в табл. 1 указаны: длины линий; число путей; наличие электрификации; максимально допустимая скорость; среднее число поездов, курсирующих на линии в будние дни.



Рис. 1. Схема расположения на территории Польши анализируемых железнодорожных линий [4]

Таблица 1. Исследуемые главные и местные железнодорожные линии Польши

№	Воеводство	Наименование линии	Длина, км	Тип перегона	Электрификация	Максимальная скорость, км/час	Среднее число поездов в будние дни, ед.
Главные линии							
1	Нижнесилезское	Вроцлав-Главный – Легница	65	двухпутный	да	160	34
2	Куявско-Поморское	Быдгощ-Главный – Торунь-Главный	51	двухпутный	да	120	24
3	Люблинское	Люблин – Реёвец	55	двухпутный	да	120	26
4	Любушское	Збоншинек – Жепин	75	двухпутный	да	160	14
5	Лодзинское	Лодзь-Калиская – Серадз	59	двухпутный	да	80	28
6	Малопольское	Краков-Главный – Тарнув	77	двухпутный	да	160	36
7	Мазовецкое	Варшава-Западная – Гродзиск-Мазовецкий	27	двухпутный	да	120	136
8	Опольское	Ополе-Главный – Бжег	40	двухпутный	да	160	28
9	Подкарпатское	Жёшув-Главный – Пшеворск	36	двухпутный	да	120	30
10	Подляское	Белосток – Сокулка	42	однопутный	да	80	16
11	Поморское	Гданьск-Главный – Тчев	32	двухпутный	да	160	24
12	Силезское	Катовице – Гливице	27	двухпутный	да	160	66
13	Свентокшиское	Кельце – Скаржиско-Каменна	45	двухпутный	да	120	16
14	Варминьско-Мазурское	Ольштын-Главный – Илава-Главный	69	двухпутный	да	100	20
15	Великопольское	Познань-Главный – Збоншинь	74	двухпутный	да	160	30
16	Западно-Поморское	Щецин-Главный – Голенюв	38	двухпутный	да	120	36
Местные линии							
17	Нижнесилезское	Клодско-Главный – Валбжих-Главный	51	однопутный / двухпутный	нет	80	10
18	Куявско-Поморское	Грудзёндз – Хелмжа	38	однопутный	нет	90	16
19	Люблинское	Замосць-Восточный – Звежинец	32	однопутный	нет	80	10
20	Любушское	Жары – Зелёна-Гура	53	однопутный	нет	80	8
21	Лодзинское	Лодзь-Калиская – Кутно	68	двухпутный	нет	70	20
22	Малопольское	Новы-Сонч – Мушина	51	однопутный	нет	80	10
23	Мазовецкое	Насельск – Серпц	88	однопутный	нет	80	10
24	Опольское	Ныса – Кендзежин-Козле	75	двухпутный	нет	50	14
25	Подкарпатское	Ясло – Загуж	69	однопутный	нет	80	4
26	Подляское	Белосток – Черемха	77	однопутный	нет	80	8
27	Поморское	Хойнице – Косцежина	69	однопутный	нет	80	8
28	Силезское	Живец – Звардонь	37	однопутный	да	70	20
29	Свентокшиское	Скаржиско-Каменна – Островец-Свентокшиский	46	двухпутный	да	80	10
30	Варминьско-Мазурское	Ольштын-Главный – Бранево	96	однопутный	нет	80	8
31	Великопольское	Лешно – Вольштын	46	однопутный	нет	80	12
32	Западно-Поморское	Колобжег – Голенюв	100	однопутный	нет	80	14



### 3. Подвижной состав, используемый на анализируемых железнодорожных линиях

В настоящее время парк пассажирского железнодорожного подвижного состава, обслуживающий региональные перевозки в отдельных воеводствах, имеет сложную структуру. Это связано с тем, что производители подвижного состава предлагают его адаптацию под нужды заказчика. Чаще всего это электропоезда одного семейства (например, Pesa Elf, Newag Impuls), но в разных модификациях, различающихся длиной поезда (числом секций), дизайном интерьера, числом мест для сидения, наличием специализированного оборудования для удовлетворения потребностей людей с ограниченными возможностями или с крупногабаритным багажом, включая велосипеды. Результатом таких изменений стало наличие в инвентарном парке перевозчиков электропоездов различных серий и разновидностей.

В последние годы, в связи с растущим спросом региональных пассажирских перевозчиков на подвижной состав, увеличилось предложение различных моделей электрических и дизельных поездов, при одновременном значительном сокращении численности традиционных пассажирских вагонов [5]. Это связано с заменой классических поездов электропоездами на электрифицированных линиях и рельсовыми автобусами на не электрифицированных. Кроме того, в настоящее время модернизировано большое число бывших в употреблении электропоездов путём изменения интерьера и его адаптации к современным потребностям.

С одной стороны, имеется возможность адаптации подвижного состава к потребностям перевозчика или даже конкретной железнодорожной линии. С другой – в случае нехватки подвижного состава необходимо приобретать новый, что связано с привлечением значительных финансовых ресурсов, подготовкой и проведением тендера, длительным ожиданием изготовления и поставки техники. Случаи, когда подвижной состав, отвечающий всем требованиям оператора, имеется в наличии у производителя в необходимом количестве, чрезвычайно редки. Таким образом, если перевозчик обеспечивает нужный объём пассажирских перевозок имеющимся подвижным составом, то, из-за указанных причин, а также из-за высокой закупочной стоимости, новый подвижной состав не приобретается. Однако устаревший подвижной состав может не удовлетворять современным требованиям, соблюдение которых особенно актуально для железнодорожных станций, на которых осуществляется пересадка пассажиров в поезда других перевозчиков.

На железнодорожных линиях, где наблюдается уменьшение пассажиропотока, решение о сохранении провозной способности на прежнем уровне приводит к высоким эксплуатационным расходам. С другой стороны, на линиях, где количество перевезённых пассажиров увеличилось, использование недостаточно вместительного подвижного состава создаёт трудности для пассажиров и может ограничить дальнейший рост пассажиропотока.

Другая проблема связана с разработкой схем и графиков движения пассажирских поездов и необходимостью сокращения порожнего пробега пассажирских вагонов [6]. Для решения соответствующих задач чаще всего используются методы линейного программирования [7].

Кроме того, необходимо учитывать изменения интенсивности пассажиропотоков в течение суток. Использование подвижного состава постоянной вместимости может приводит либо к его переполнению в часы пик, либо к недостаточной загруженности в межпиковые периоды. Таким образом, необходимо рассчитывать численность транспортных средств различной вместимости для обеспечения пассажирских перевозок на различных направлениях. В утренние и дневные часы пик несколько секций электропоездов могут быть соединены вместе, чтобы обеспечить большую вместимость, тогда как в межпиковые периоды транспортные средства могут быть выведены из эксплуатации для снижения операционных расходов [8]. Реализация таких решений требует выполнения дополнительных маневровых операций с подвижным составом, а также наличия свободных путей на железнодорожных станциях для отстоя составов поездов в межпиковые периоды [9]. Результатом подобной адаптации провозной способности конкретной железнодорожной линии к текущему спросу на пассажирские перевозки является минимизация эксплуатационных расходов перевозчиков [10].

Для выработки оптимальных решений по использованию подвижного состава применяют разнообразные математические методы, в частности, основанные на использовании эвристического распределения Бендера [11]. Такие методы позволяют рассчитать минимальную требуемую численность парка подвижного состава [12]. Однако ключевым условием, позволяющим организовать надлежащее транспортное обслуживание населения, является наличие у перевозчика достаточного количества подвижного состава соответствующей вместимости.

Важной задачей, которую ежедневно приходится решать диспетчерам, является оптимальное распределение транспортных средств по маршрутам. Такое распределение осуществляется как вручную, так и с использованием специального программного обеспечения, позволяющего сократить затраты времени на решение таких задач [13]. Программные инструменты также помогают оперативно принимать решения по согласованию провозной способности линий с текущими потребностями в пассажирских перевозках [14]. При планировании маршрутов большой протяжённости могут использоваться интегрированные алгоритмы, основанные на теории графов [15], применение которых позволяет также учитывать плановые технические осмотры и ремонты, вероятность вывода подвижного состава из эксплуатации в результате отказов или аварий.

Характеристики подвижного состава, который эксплуатировался на исследуемых железнодорожных линиях в 2018 году, представлен в табл. 2, 3.

Таблица 2. Подвижной состав региональных пассажирских железнодорожных перевозок Польши

Наименование линии	Марка подвижного состава
Главные линии	
Вроцлав-Главный – Легница	31WE, 45WE, SA134 · 2, 36WEa, SA139
Быдгощ-Главный – Торунь-Главный	EN76, EN57, ED72, EN71, EN96
Люблин – Реёвец	EN57, SA134
Збоншинек – Жепин	EN57, ED78
Лодзь-Калиская – Серадз	E 4268 (FLIRT), EN57, EN57 · 2
Краков-Главный – Тарнув	EN64, EN79, EN57, EN78, EN78 · 2, EN64, EN77, EN63A
Варшава-Западная – Гродзиск-Мазовецкий	EN57 · 2, 45WE, 19WE, 35WE
Ополе-Главный – Бжег	EN57, EN63A, ED72Ac
Жёшув-Главный – Пшеворск	EN64, EN76, EN71, EN57, EN62
Белосток – Сокулка	SA133, EN57, SA108
Ганьск-Главный – Тчев	EN57, EN76, EN56 · 2, EN90, EN71, SA137 · 2
Катовице – Гливице	27WEb, 35WE, EN57, EN75, EN76, 34WEa, 22WE, 22WEd
Кельце – Скаржиско-Камённа	EN63A, EN96, EN57 · 2, EN57, EN81, ED78
Ольштын-Главный – Илава-Главный	EN57, ED72
Познань-Главный – Збоншинь	EN76 · 2, EN76, EN57, ED78
Щецин-Главный – Голенюв	SA103, ED78, EN63A, SA136, EN57
Местные линии	
Клодско-Главный – Валбжих-Главный	SA134, SA135
Грудзёндз – Хелмжа	MR/MRD, SA133, SA106, SA106+SA123, 628.4
Замосць-Восточный – Звезинец	SA134
Жары – Зелёна-Гура	SA105, SA133, SA108
Лодзь-Калиская – Кутно	E 4268 (FLIRT)
Новы-Сонч – Мушина	EN99, EN79, EN57
Насельск – Серпц	SA135, VT627
Ныса – Кендзежин-Козле	SA134, SA103, SA137
Ясло – Загуж	SA103, SA135, SA109
Белосток – Черемха	SA133, SA108
Хойнице – Косцежина	SA109
Живец – Звардонь	EN76, EN71, EN75, 36WE, 27WEb
Скаржиско-Камённа – Островец-Свентокшиский	EN63A, EN96, EN57, EN81, ED78
Ольштын-Главный – Бранево	SA106
Лешно – Вольштын	SA108, OI49 + 2 · 120A, SA134
Колобжег – Голенюв	SA103, SA136

Таблица 3. Марки подвижного состава, используемого на региональных пассажирских железнодорожных перевозках Польши

Тип подвижного состава	Марка подвижного состава
Новые электропоезда	22WE, 22Wed, 27Web, 31WE, 34Wea, 35WE, 36WE, 36Wea, 45WE, E 4268 (FLIRT), EN56, EN62, EN63A, EN64, EN75, EN76, EN77, EN78, ED78, EN79, EN90, EN96, EN99
Устаревшие электропоезда	EN57, EN71, ED72, ED72Ac
Новые дизельные поезда	SA105, SA106, SA108, SA133, SA134, SA135, SA137, SA139
Устаревшие дизельные поезда	MR/MRD, 628.4, VT627
Паровоз	OI49

На основании данных, представленных в табл. 2, а также с учётом вместимости отдельных марок подвижного состава и числа пересадок на каждой из анализируемых железнодорожных линий, рассчитана средняя вместимость подвижного состава. Результаты расчёта представлены в табл. 4. Кроме того, в эту таблицу включены значения объёма транспортной работы, выполненного региональным пассажирским транспортом на анализируемых линиях в 2018 году.

#### 4. Социально-экономические факторы, влияющие на величину пассажиропотока

Объём пассажирских перевозок конкретной железнодорожной линии зависит от пространственной структуры и социально-экономических показателей региона, по которому проходит эта линия. В настоящем исследовании учитывались следующие социально-экономические факторы регионов:

- численность населения в городах и сёлах;
- число малых (до 9 чел.), средних (10-49 чел.) и крупных (более 50 чел.) предприятий;
- доступность железнодорожных линий (транспортная доступность);
- число мест в объектах размещения (гостиницах, отелях и т. д.);
- число пассажиров;
- среднесуточное число ездов автобусов и трамваев, обеспечивающих перевозку пассажиров до железнодорожного вокзала [16].

Данные по выбранным социально-экономическим факторам за 2018 года для анализируемых линий и регионов представлены в табл. 5 [17].

Доступность железнодорожных линий рассчитывалась как отношение численности населения к длине железнодорожных линий в регионе. Для исключения влияния эффекта масштаба остальные показатели в дальнейших расчётах также рассчитывались как относительные величины к длине соответствующих железнодорожных линий. Среднесуточное число ездов автобусов и трамваев в дальнейших расчётах использовалось как абсолютная величина.

Таблица 4. Средняя вместимость подвижного состава и годовые объёмы транспортной работы на региональных пассажирских железнодорожных перевозках Польши

Наименование линии	Транспортная работа, поездо-километры	Средняя вместимость поездов, мест
Главные линии		
Вроцлав-Главный – Легница	811200	221.2
Быдгощ-Главный – Торунь-Главный	441558	192.6
Люблин – Реёвец	518210	157.0
Збоншинек – Жепин	352050	185.5
Лодзь-Калиская – Серадз	631534	150.0
Краков-Главный – Гарнув	1009008	194.6
Варшава-Западная – Гродзиск-Мазовецкий	1349136	381.1
Ополе-Главный – Бжег	404800	181.7
Жешув-Главный – Пшеворск	398016	169.9
Белосток – Сокулка	236544	137.3
Ганьск-Главный – Тчев	277056	229.0
Катовице – Гливице	647892	216.1
Кельце – Скаржиско-Камённа	244080	172.8
Ольштын-Главный – Илава-Главный	489348	206.0
Познань-Главный – Збоншинь	808240	248.7
Щецин-Главный – Голенюв	499472	164.7
Местные линии		
Клодско-Главный – Валбжих-Главный	179826	73.5
Грудзёндз – Хелмжа	218044	112.5
Замосць-Восточный – Звезинец	105920	134.0
Жары – Зелёна-Гура	143736	95.2
Лодзь-Калиская – Кутно	480307	120.0
Новы-Сонч – Мушина	186150	166.8
Насельск – Серпц	321200	60.7
Ныса – Кендзежин-Козле	352050	88.5
Ясло – Загуж	102120	64.9
Белосток – Черемха	224840	116.0
Хойнице – Косцежина	237102	73.0
Живец – Звардонь	282312	235.3
Скаржиско-Камённа – Островец-Свентокшиский	167900	148.6
Ольштын-Главный – Бранево	290496	60.0
Лешно – Вольштын	211140	130.7
Колобжег – Голенюв	542400	105.5

## 5. Оценка провозной способности региональных железнодорожных линий Польши

В разделе представлены результаты расчёта зависимостей вместимости подвижного состава от социально-экономических факторов, определяющих объёмы региональных пассажирских железнодорожных перевозок. Оценка производилась на основании расчёта коэффициента корреляции.

### 5.1 Метод расчёта и принятые допущения

В расчётах не учитывались перевозки в поездах дальнего следования, международные перевозки, поскольку такие перевозки имеют свою специфику. Поезда дальнего следования осуществляют перевозки между крупными населёнными пунктами и обеспечивают, в основном, перевозку туристов и путешественников, совершающих нерегулярные поездки. Поэтому социально-экономические факторы региона не оказывают существенного влияния на перевозки в поездах дальнего следования.

Коэффициенты корреляции часто используются для анализа функционирования систем железнодорожного транспорта. Например, с использованием этого метода выполнен анализ влияния различных факторов, в частности, погодных условий, на величину задержек поездов на четырёх железнодорожных линиях Венгрии [18]. Коэффициенты корреляции также используются для оценки взаимосвязи между пропускной способностью линий, длиной участков линии и расписанием движения поездов [19].

В простейшем случае для оценки наличия взаимосвязи между двумя случайными величинами используется коэффициент корреляции Пирсона. Полученное значение коэффициента корреляции Пирсона может быть неточным из-за влияния на исследуемые случайные величины других факторов. Для устранения такого влияния в настоящем исследовании использовался частный коэффициент корреляции. Этот коэффициент позволяет определить силу взаимосвязи двух случайных величин, исключая влияние других анализируемых факторов [20].

Для расчёта частного коэффициента корреляции используется матрица корреляции, которая содержит все отношения между анализируемыми переменными. Элементами корреляционной матрицы являются значения коэффициентов корреляции Пирсона для переменных  $i$  и  $j$ . Значение частного коэффициента корреляции рассчитывается в соответствии со следующей формулой

$$r_{ij \cdot 1 \dots (i-1)(i+1) \dots (j-1)(j+1) \dots k} = - \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii} - C_{ij}}},$$

где  $C_{ij}$ ,  $C_{ii}$ ,  $C_{jj}$  – алгебраические дополнения элементов  $r_{ij}$ ,  $r_{ii}$ ,  $r_{jj}$  матрицы коэффициентов корреляции;  $k$  – число случайных величин.

Таблица 5. Социально-экономические показатели регионов размещения анализируемых железнодорожных линий

№	Наименование линии	Население, чел.	Число предприятий, ед.			Доступность, чел./км	Число мест в гостиницах, чел.	Число пассажиров, чел.	Среднесуточное число автобусных и трамвайных ездов, ед.
			Малых	Средних	Крупных				
Главные линии									
1	Вроцлав-Главный – Легница	758013	135152	3641	985	3591.72	13296	73076	285.62
2	Быдгощ-Главный – Торунь-Главный	572163	68354	2330	698	3516.38	8115	43327	210.00
3	Люблин – Реёвец	388645	48982	1514	418	2735.39	4526	41053	34.86
4	Збоншинек – Жепин	40853	6528	227	54	356.75	2566	6295	2.64
5	Лодзь-Калиская – Серадз	863521	107563	4303	925	10267.10	9521	57623	74.15
6	Краков-Главный – Тарнув	948204	163658	6068	1421	5268.79	35440	123357	80.00
7	Варшава-Западная – Гродзиск-Мазовецкий	2025760	442698	14809	3939	20361.57	34149	283173	402.50
8	Ополе-Главный – Бжег	174910	27909	882	237	2478.87	1839	24582	71.63
9	Жёшув-Главный – Пшеворск	241271	31858	1018	318	3633.26	4469	52132	45.90
10	Белосток – Сокулка	337044	38361	1134	386	3542.62	3094	17521	59.78
11	Гданьск-Главный – Тчев	564995	85415	2824	670	8287.99	18557	49672	178.00
12	Катовице – Гливице	948112	107774	4971	1281	20223.53	8960	174321	327.50
13	Кельце – Скаржиско-Камённа	254824	36147	1317	372	2843.10	5726	29370	40.27
14	Ольштын-Главный – Илава-Главный	244163	29237	997	291	1914.11	8099	21784	84.23
15	Познань-Главный – Збоншинь	584872	121611	4568	977	2842.12	10617	98209	197.87
16	Щецин-Главный – Голенюв	428136	71782	2207	459	5199.20	7624	26800	110.00
Местные линии									
17	Клодско-Главный – Валбжих-Главный	184290	20654	577	141	1185.58	2601	12719	8.33
18	Грудзёндз – Хелмжа	111431	9684	369	115	1954.70	1425	3813	31.33
19	Замосць-Восточный – Звежинец	76677	8541	279	90	1919.04	2544	7084	23.89
20	Жары – Зелёна-Гура	185775	26129	897	208	1514.98	1534	21145	28.10
21	Лодзь-Калиская – Кутно	828287	102150	3985	903	10864.94	8965	53155	86.56
22	Новы-Сонч – Мушина	104896	13308	527	143	987.71	4755	11364	69.13
23	Насельск – Серпц	64274	7012	270	65	456.27	611	3274	2.86
24	Ныса – Кендзежин-Козле	132923	19273	654	159	1462.31	5057	9562	25.46
25	Ясло – Загуж	145984	17548	667	221	1821.32	2831	32628	26.91
26	Белосток – Черемха	328781	38718	1155	399	1837.33	2863	17894	46.86
27	Хойнице – Косцежина	80769	7976	305	92	609.45	905	5758	21.79
28	Живец – Звардонь	60542	7308	306	74	1032.82	1682	9718	32.33
29	Скаржиско-Камённа – Островец-Свентокшиский	176108	18966	639	195	2677.22	1379	13415	11.00
30	Ольштын-Главный – Бранево	214861	28478	983	249	1258.51	6091	19930	62.33
31	Лешно – Вольштын	88347	15812	725	167	1125.74	3706	13128	9.15
32	Колобжег – Голенюв	120852	20622	627	160	872.65	23929	8174	19.94



Частный коэффициент корреляции позволяет оценить исключительно линейную зависимость между исследуемыми переменными. Поэтому после его расчёта и в случае отсутствия тесной связи между переменными, необходимо при помощи построения диаграммы разброса оценить отклонение исследуемых переменных от графика линейной функции, соответствующей рассчитанному коэффициенту корреляции, а также проверить наличие нелинейной зависимости между анализируемыми переменными. Кроме того, расчёт частных коэффициентов корреляции характеризуется довольно высокой вычислительной сложностью.

## 5.2 Расчёт частных коэффициентов корреляции

Расчёт значений частных коэффициентов корреляции выполнялся с использованием программы STATISTICA. В качестве независимых переменных, определяющих объем пассажирских перевозок, использовались показатели по отдельным социально-экономическим факторам (табл. 5). В качестве зависимой переменной выбрана средняя вместимость подвижного состава (табл. 6, вариант 1). Затем значения исследуемых независимых переменных были пересчитаны с учетом коэффициента, учитывающего количество региональных пассажирских поездов, пропущенных по каждой железнодорожной линии в течение года (табл. 6, вариант 2). В данной таблице значение коэффициента корреляции, попадающего в двусторонний доверительный интервал с уровнем значимости 0.05, выделено жирным шрифтом [21].

Таблица 6. Расчётные значения частных коэффициентов корреляции

Показатель	Вариант 1	Вариант 2
Численность населения в регионе, чел./км	-0.036	-0.123
Численность малых предприятий, ед./км	-0.076	-0.189
Численность средних предприятий, ед./км	0.078	0.116
Численность крупных предприятий, ед./км	0.029	0.109
Доступность пассажирских железнодорожных перевозок, чел./км	-0.081	0.022
Число мест размещения в гостиницах, чел./км	0.073	0.104
Число пассажиров, чел./км	0.178	-0.019
Число автобусных и трамвайных ездов, ед.	0.286	0.303
Число поездов, ед.	-	<b>0.481</b>

Результаты расчёта частных коэффициентов корреляции показали, что выбранные социально-экономические факторы, определяющие размер пассажиропотока на конкретной железнодорожной линии, не оказывают существенного влияния на среднюю вместимость подвижного состава, используемого на этой линии. Это говорит о том, что при выборе вместимости

поездов, используемых на пригородных железнодорожных перевозках, не учитываются социально-экономические факторы соответствующего региона.

Примером фактора, не влияющего на среднюю вместимость железнодорожного пассажирского подвижного состава, является доступность железнодорожного транспорта для населения, величина которой зависит от размера и расположения населённых пунктов относительно железнодорожных линий. На рис. 2 представлена диаграмма разброса величины средней вместимости подвижного состава и доступности железнодорожных перевозок. Диаграмма показывает не только отсутствие линейной зависимости, которая исследовалась с использованием частного коэффициента корреляции, но и отсутствие какой-либо связи между этими величинами.

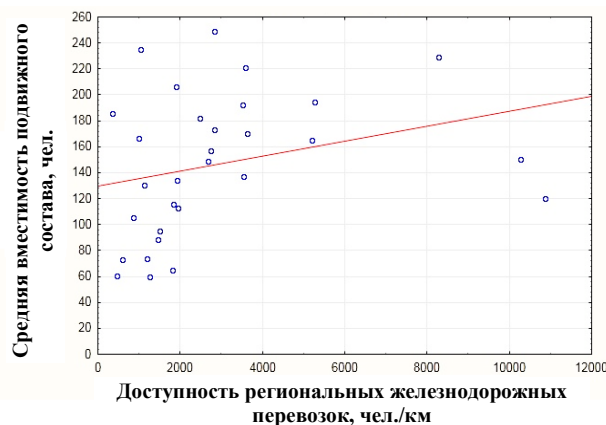


Рис. 2. Диаграмма разброса значений средней вместимости подвижного состава и доступности региональных железнодорожных перевозок для жителей

Более сильная связь наблюдается между величиной вместимости подвижного состава и среднесуточным числом ездов автобусов и трамваев, обеспечивающих перевозку пассажиров до железнодорожного вокзала (рис. 3).

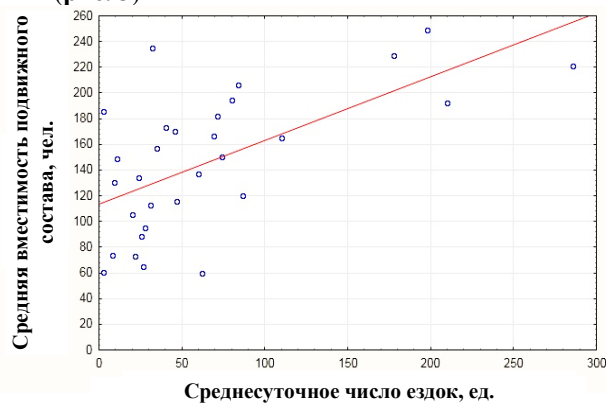


Рис. 3. Диаграмма разброса значений средней вместимости пассажирского железнодорожного подвижного состава и среднесуточного числа ездов автобусов и трамваев до железнодорожных вокзалов

На этой диаграмме разброса видно, что связь между исследуемыми величинами невелика, однако отчётливо прослеживается. Это вызвано тем, что люди, имеющие удобный доступ от места проживания к железнодорожному вокзалу, чаще решают воспользоваться этим видом транспорта. Кроме того, интенсивность автобусных и трамвайных перевозок выше в густонаселённых и экономически развитых регионах Польши, где существует большая потребность в пассажирских перевозках, что приводит к увеличению пассажиропотока. В свою очередь, региональные железнодорожные перевозчики, работающие в густонаселённых районах, имеют в своём распоряжении большие финансовые ресурсы, позволяющие им приобретать вместительный подвижной состав.

Однако наиболее сильная связь обнаружилась между величиной средней вместимости эксплуатируемого подвижного состава и числом поездов, пропущенных линиями в течение года. Диаграмма разброса для этих величин показана на рис. 4.

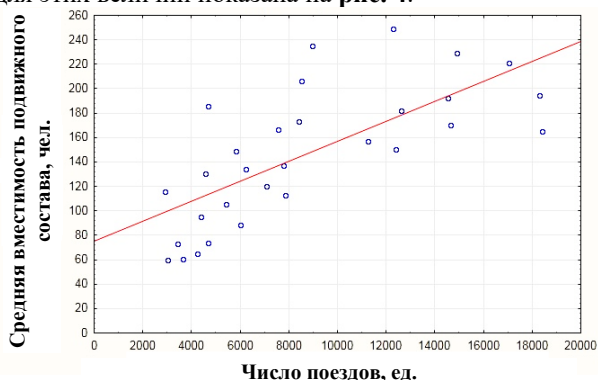


Рис. 4. Диаграмма разброса значений средней вместимости пассажирского железнодорожного подвижного состава и числа пропущенных железнодорожной линией поездов в течение года

Этот график показывает наличие линейной зависимости между этими величинами. На железнодорожных линиях с большим пассажиропотоком, помимо большего числа ниток графика движения пассажирских поездов, по сравнению с малодеятельными линиями, как правило используются в среднем более вместительные поезда.

## 6. Заключение

Авторы впервые исследовали связи между социально-экономическими факторами регионов с железнодорожным сообщением, объёмом пассажирских перевозок и вместимостью подвижного состава, используемого на соответствующих железнодорожных линиях. Расчёты показали, что среднее число мест в подвижном составе, используемом для региональных пассажирских перевозок на анализируемых железнодорожных линиях, не зависит от социально-экономических факторов, определяющих размеры пассажиропотоков. Не выявлена зависимость вместимости используемого подвижного состава от таких факторов, как: числен-

ность населения в регионе; число предприятий; доступность железнодорожного сообщения для населения; число мест размещения в гостиницах. Основной причиной отсутствия такой связи может быть недостаточный учёт спроса на региональные железнодорожные пассажирские перевозки в процессе их организации, при определении вместимости подвижного состава. В экономически менее развитых регионах Польши, например, в Подкарпатском и Подляском воеводствах, из-за нехватки подвижного состава у перевозчиков наблюдается недостаточная провозная способность железнодорожных линий.

Выявлена слабая связь между среднесуточным числом ездов автобусов и трамваев по маршрутам, связывающих населённые пункты с железнодорожными вокзалами, и вместимостью используемого подвижного состава. Это связано с тем, что люди, которым легче добраться от места жительства до железнодорожного вокзала, чаще совершают поездки по железной дороге. Кроме того, число автобусных и трамвайных маршрутов обычно больше в экономически развитых регионах страны. В таких регионах, например, в Силезском, Мазовецком воеводствах, региональные железнодорожные перевозчики располагают достаточными финансовыми средствами для приобретения более вместительного подвижного состава.

Наиболее сильная прямая связь наблюдается между величиной средней вместимости подвижного состава на линии и числом поездов, пропущенных линией в течение года. Как и в случае со среднесуточным числом ездов автобусов и трамваев до железнодорожных вокзалов, это связано с тем, что линии с большим числом пропускаемых пассажирских поездов расположены в экономически развитых регионах Польши.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наилучшее соответствие провозной способности железнодорожных линий потребностям в региональных пассажирских перевозках, обеспеченность этих перевозок подвижным составом достаточной вместимости наблюдается в экономически развитых регионах Польши, расположенных, в основном на юге и западе страны. В менее экономически развитых регионах используются подвижной состав недостаточной вместимости.

Увеличение провозной способности регионального пассажирского железнодорожного транспорта стимулирует спрос на соответствующие перевозки. Недостаточная провозная способность железнодорожных линий заставляет население пользоваться автомобилями. Понимание представленных в статье связей между социально-экономическими факторами регионов и параметрами региональных железнодорожных перевозок имеет важное значение для эффективного городского и регионального планирования. В частности, повышение удовлетворённости населения в региональных железнодорожных пассажирских перевозках способствует уменьшению интенсивности потока автомобилей, уменьшению заторов на автодорогах, снижению выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта.

## Список литературы

1. Kamiński W., Śladkowski A. Determination the influence of socio-economic factors on the volume of railway passenger transport in different regions of Poland // *Transport Problems: XI International Conference*. Katowice-Bochnia, 26-28 June. С. 308-319.
2. Thorlacius P., Larsen J., Laumanns M. An integrated rolling stock planning model for the Copenhagen suburban passenger railway // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2015. Т. 5. № 4. С. 240-262. <https://www.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2015.11.001>.
3. Massel A. The evolution of the railway infrastructure in Poland in the years 1990-2014 // *Logistics*. 2014. № 4. С. 2182-2190.
4. Nationwide railway base Homepage [Электронный ресурс]. URL: [www.bazakolejowa.pl](http://www.bazakolejowa.pl).
5. Bartczak K. Rolling stock analysis in Poland // *Rail Transport Technique*. 2015. № 12. С. 1780-1785.
6. Cadarso L., Marín Á. Robust rolling stock in rapid transit networks // *Computers & Operations Research*. 2011. Т. 38. № 8. С. 1131-1142. <https://www.doi.org/10.1016/j.cor.2010.10.029>.
7. Giacco G. L., D'Ariano A., Pacciarelli D. Rolling Stock Rostering Optimization Under Maintenance Constraints // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2014. Т. 18. № 1. С. 95-105. <https://www.doi.org/10.1080/15472450.2013.801712>.
8. Alfieri A., Groot R., Kroon L., Schrijver A. Efficient Circulation of Railway Rolling Stock // *Transportation Science*. 2006. Т. 40. № 3. С. 378-391. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.1060.0155>.
9. Haahr J., Lusby R. M. Integrating rolling stock scheduling with train unit shunting // *European Journal of Operational Research*. 2017. Т. 259. № 2. С. 452-468. <https://www.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.053>.
10. Andrés J., Cadarso L., Marín Á. Maintenance Scheduling in Rolling Stock Circulations in Rapid Transit Networks // *Transportation Research Procedia*. 2015. Т. 10. С. 524-533. <https://www.doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.006>.
11. Cadarso L., Marín Á. Improving robustness of rolling stock circulations in rapid transit networks // *Computers & Operations Research*. 2014. Т. 51. С. 146-159. <https://www.doi.org/10.1016/j.cor.2014.05.007>.
12. Cacchiani V., Caprara A., Galli L., Kroon L., Maróti G., Toth P. Railway Rolling Stock Planning: Robustness Against Large Disruptions // *Transportation Science*. 2012. Т. 46. № 2. С. 217-232. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.1110.0388>.
13. Lai Y.-C., Fan D.-C., Huang K.-L. Optimizing rolling stock assignment and maintenance plan for passenger railway operations // *Computers & Industrial Engineering*. 2015. Т. 85. С. 284-295. <https://www.doi.org/10.1016/j.cie.2015.03.016>.
14. Abbink E., van den Berg B., Kroon L., Salomon M. Allocation of Railway Rolling Stock for Passenger Trains // *Transportation Science*. 2004. Т. 38. № 1. С. 33-41. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.1030.0044>.
15. Borndörfer R., Reuther M., Schlechte T., Waas K., Weider S. Integrated Optimization of Rolling Stock Rotations for Intercity Railways // *Transportation Science*. 2016. Т. 50. № 3. С. 863-877. <https://www.doi.org/10.1287/trsc.2015.0633>.
16. Kamiński W., Śladkowski A. Analysis of the Influence of Socio-Economic Factors on the Volume of Railway Passenger Transport in Łódź Region. // *Reliability and Statistics in Transportation and Communication / I. Kabashkin [и др.]*. Cham: Springer International Publishing, 2020. С. 233-243.
17. Statistics Poland [Электронный ресурс]. URL: <https://stat.gov.pl/>.
18. Nagy E., Csiszár C. Analysis of Delay Causes in Railway Passenger Transportation // *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*. 2015. <https://www.doi.org/10.3311/PPtr.7539>.
19. Dicembre A., Ricci S. Railway traffic on high density urban corridors: Capacity, signalling and timetable // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2011. Т. 1. № 2. С. 59-68. <https://www.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2011.11.001>.
20. Asuero A. G., Sayago A., González A. G. The Correlation Coefficient: An Overview // *Critical Reviews in Analytical Chemistry*. 2006. Т. 36. № 1. С. 41-59. <https://www.doi.org/10.1080/10408340500526766>.
21. Kończak G. Testing the significance of partial and multiple correlation coefficients for multidimensional division tables // *Economic Studies*. 2014. Т. 189. С. 40-48.