

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ARIMA ПРИ ПОСТРОЕНИИ ПРОГНОЗНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВАГОНОПОТОКОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-1-33-41

Manuscript received 10 December 2022;
Accepted 15 January 2023

Маловецкая Екатерина Викторовна,
 Иркутский государственный университет путей сообщения,
 г. Иркутск, Россия, katerina8119@mail.ru

Мозалевская Анна Константиновна,
 Иркутский государственный университет путей сообщения,
 г. Иркутск, Россия, Mozalevskaya@mail.ru

Ключевые слова: метод, модель, имитационная модель, прогноз, временной ряд, системный подход, неравномерность, планирование и прогнозирование транспортных потоков, линейное и динамическое программирование, теория больших систем

В представленной работе дается оценка современному состоянию разработок в области неравномерности железнодорожных перевозок и проблем принятия эффективных управленческих решений по организации перевозочного процесса на полигонах курсирования. Представлен сравнительный анализ результатов прогнозирования вагонопотоков с помощью различных моделей. В основе была использована ARIMA модель. В качестве альтернативного варианта построения прогноза вагонопотоков по стыковым пунктам дорог, рассмотрен адаптивный метод прогнозирования, в частности, метод двойного экспоненциального сглаживания Хольта-Винтерса. Оптимизация использования инфраструктуры может произойти вследствие анализа проблем неравномерного поступления потоков вагонов, поиска различия колебаний, которые неизбежны, от перерывов или сгущений, которые возникают из-за неэффективности формирования процесса перевозки, а также их последующее регулирование, создания необходимых механизмов, которые снизят неравномерность. Дается оценка использования различных математических моделей с последующей возможностью формирования прогнозных моделей отклонений вагонопотоков в пределах полигонов сети. Основное внимание уделяется прогнозированию временных рядов (TSF), на основе которых в дальнейшем можно строить прогнозные модели отклонений вагонопотоков. Проведён сравнительный обзор способов и средств формирования прогнозных моделей изменения вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог, работающих в едином технологическом пространстве. Оценивается использование временных рядов в качестве математического аппарата построения имитационных моделей прогноза колебаний вагонопотоков и погрузки. Рассмотрены перспективы использования имитационного моделирования в качестве инструмента для оценки колебаний вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог, имеющих единый центр управления. На основе проведённого анализа предлагается ряд направлений расширения существующей методологической базы построения имитационных моделей железнодорожных перевозок.

Информация об авторах:

Маловецкая Екатерина Викторовна, к.т.н., доцент кафедры "Управление эксплуатационной работой" ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Мозалевская Анна Константиновна, соискатель ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия

Для цитирования:

Маловецкая Е.В., Мозалевская А.К. Возможности применения моделей ARIMA при построении прогнозных значений вагонопотоков // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №1. С. 33-41.

For citation:

Malovetskaya E.V., Mozalevskaya A.K. (2023) Possibilities of application of ARIMA models in building forecast values of car-flows. T-Comm, vol. 17, no. 1, pp. 33-41. (in Russian)

Введение

Имея представление о тенденциях дальнейшего развития транспортной системы и железнодорожного транспорта, в частности, можно уже сейчас принимать оперативные решения, вносить корректировки в программы и планы развития, способствующие получению наилучших результатов [1-5]. Все это может быть достигнуто посредством построения прогнозов транспортных потоков и анализа временных рядов, составленных на основе исторических данных.

Прогнозирование данных различных по своей природе временных рядов является достаточно сложной задачей, главным образом из-за беспрецедентных изменений тенденций и условий, с одной стороны, и отсутствия полной информации, с другой стороны. Поэтому необходимо оценивать, насколько точными являются прогнозы, особенно при применении разнообразных методик прогнозирования. Например, при прогнозировании с применением регрессионного анализа, так как при его использовании имеется множество ограничений. Главная цель настоящего материала – провести исследование и выявить, какие именно методы прогнозирования влияют на получение наиболее точных прогнозов и допускают наименьшее количество ошибок.

Проведение прогнозного анализа, позволяющего адекватно оптимизировать работу наличных инфраструктурных элементов в увязке с колебаниями вагонопотоков, требует использования математического аппарата, в том числе временных рядов, применение которых позволяет учитывать различного рода неравномерности, а также имитационных моделей [6-10]. При наличии у вагонопотоков свойства неравномерности также возникает необходимость в её учёте и оценке перспектив изменения вагонопотоков, в том числе и по стыковым пунктам железных дорог [11-15].

В предлагаемой статье проведён анализ современного состояния разработок в области построения прогнозных моделей колебаний вагонопотоков с использованием математических моделей различного вида.

1. Особенности задач планирования железнодорожных перевозок

Исторически планирование перевозок грузов началось в России в 1918 году. Именно в указанный период В.И. Ленин подписал декрет, именуемый «О пределах компетенции Народного комиссариата путей сообщения в деле транспорта». В упомянутом документе была отражена следующая информация:

1. Народный комиссариат путей сообщения являлся единственным органом, который не только руководил транспортным делом касательно создания и исполнения планов, но и занимался объединением вышеуказанного.

2. Лица и иные ведомства, которые были заинтересованы в перевозках, могли составлять исключительно предварительные планы перевозочной деятельности.

Дальнейшие разработки плановых задач осуществлялись методами моделирования перевозок грузов, получивших широкое развитие в СССР в конце 1970 г. В основу методов был заложен принцип поиска основополагающих факторов, определяющих перспективную траекторию развития.

На сегодняшний день существует достаточно большое количество методов прогнозирования, в том числе применяемых на железнодорожном транспорте. Наибольшее распространение при решении задач по прогнозированию транспортных потоков получили интуитивные методы (метод экспертных оценок, прогнозирования по образу, метод исторических аналогий) и формализованные методы (экстраполяция, моделирование).

Основные модели, используемые при прогнозировании грузовых перевозок, можно разделить на три блока:

- модели на основе анализа временных рядов;
- балансовые модели;
- модели интеллектуального анализа данных (рис. 1).



Рис. 1. Классификация моделей прогнозирования грузовых перевозок

Базовыми показателями, представляющими интерес для дальнейшей разработки стратегии развития и принятия решений, являются:

- реднесуточная погрузка, которая измеряется в вагонах;
- объем перевозок (количество отправленных), который считается в вагонах или тоннах, в том числе на основании имеющейся номенклатуры грузов;
- средняя дальность грузоперевозок – измеряется в километрах;
- оборот грузов – измерение происходит в тарифных тонно-километрах;
- грузонапряженность, измеряется в миллионах тонно-километрах на один километр, а также средняя, в том числе по конкретным направлениям;
- средняя статическая нагрузка вагона, расчет которой осуществляется в тоннах [6].

Продуктивность мероприятий по планированию зависит от проведения анализа изменения того или иного показателя, в том числе мощности вагонопотоков с учётом различного рода неравномерностей. Методы детализированной оценки колебаний вагонопотоков базируются на применении математического аппарата, такого как: временные ряды, статистические методы, построение зависимостей и др.

Формирование адекватных имитационных моделей на основе перечисленных способов позволяет учесть колебания вагонопотоков за различные периоды, в том числе и по стыковым пунктам железных дорог, что актуально на данный момент в связи с внедрением полигонных технологий управления железнодорожным транспортом.

II. Обзор разработок в области оценки неравномерностей на железнодорожном транспорте

Для построения математических моделей транспортных потоков активно применялись следующие методы:

- теории массового обслуживания;
- теории вероятности;
- линейного программирования.

Кроме того, была создана дорожно-сетевая модель, которая оценивала влияние неравномерности грузоперевозок, а также трудностей в применении парка вагонов некоторых железных дорог (далее также – ж/д) на работу других направлений сети [16-22]. В данном тренде активно применялись подходы, которые были связаны с применением гидродинамической модели. Производился анализ таких терминов, как «ударные волны», «волны разряжения», «распад разрыва», которые считаются главными в теории газовой динамики.

Целью анализа временных рядов является изучение траекторий наблюдений временных рядов и построение модели для описания структуры данных и прогнозирования будущих значений временных рядов. В связи с важностью прогнозирования временных рядов во многих отраслях прикладных наук требуется построить эффективную модель с целью повышения точности прогнозирования. В научной литературе были разработаны различные модели прогнозирования временных рядов [23-30].

Прогнозирование временных рядов традиционно выполняется в эконометрике с использованием моделей ARIMA, которые обобщены Боксом и Дженкинсом. ARIMA уже давно является стандартным методом прогнозирования временных рядов.

Несмотря на то, что модели ARIMA широко распространены при моделировании экономических и финансовых временных рядов, они имеют некоторые серьезные ограничения. Например, в простой модели ARIMA трудно смоделировать нелинейные взаимосвязи между переменными. Кроме того, предполагается, что в модели ARIMA существует постоянное стандартное отклонение ошибок, которое на практике может не выполняться. Когда модель ARIMA интегрируется с обобщенной моделью авторегрессионной условной гетероскедастичности (GARCH), это предположение может быть смягчено. С другой стороны, оптимизация модели GARCH и ее параметров может быть сложной и проблематичной.

III. Состояние разработок в области имитационного моделирования транспортных процессов

Разработке методики имитационного моделирования железнодорожных станций и направлений посвящено достаточно большое количество научных работ: разработаны математические модели для имитации процесса поездобразования и продвижения поездов на сети с использованием объектно-ориентированной системы моделирования.

Среди имитационных моделей функционирования железнодорожной сети интересен опыт ученых БИЛИЗТА. Предложена система автоматизированного создания имитационной модели железнодорожной сети на основе имитационных моделей железнодорожных станций, входящих в ее состав. Разработанные модели станций формализованы на базе теорий массового обслуживания и сетевого планирования. Основными недостатками данных моделей является сложность их построения и дискретность в моделировании работы железнодорожной сети, то есть работа каждой станции сети моделируется автономно, а полученные результаты являются исходными данными для моделирования работы следующей станции. Это не позволяет применять такие модели для исследования работы железнодорожной сети в условиях оперативного управления организацией вагонопотоков.

IV. Особенности формирования прогнозов на железнодорожном транспорте

В настоящее время при исследовании объектов железнодорожного транспорта применяются разнообразные методики, осуществляется прогноз расчетов на базе разделения эксплуатационных характеристик на две части – случайные отклонения от тенденции развития и сама тенденция. Указанное происходит ввиду того, что установка длительных тенденций, которые отражают изменение характеристик с учетом перспективы, – одна из наиболее важных задач в процессе прогнозирования роста любой области народного хозяйства (далее также – НХ), в том числе и транспортной. В имеющейся системе непрерывающегося планирования производится анализ будущего развития областей НХ.

Одним из основных направлений в области прогнозирования транспортных потоков является анализ эксплуатационных показателей их изменения с учетом влияния отраслей промышленности и общей экономической ситуации. Для получения детализированной картины необходим анализ как количественных, так и качественных показателей, для построения адекватной картины дальнейшего развития. В этом случае необходимо применение прогнозных методик, основанных на теории вероятностей с учетом внутренних и внешних факторов при условии неопределенности событий.

При оценке отраслей промышленности необходимо учитывать различия в технологиях расчета и оценки показателей при учете того обстоятельства, что при прогнозировании на длительный период меньше внимания уделяется деталям, что, в свою очередь, выявляет необходимость обнаружения факторов, влияющих на перевозочный процесс в зависимости от конкретной ситуации, к примеру, соотношение грузовых поездопотоков и производственных мощностей различных уровней. При решении такого рода задач могут быть использованы логические методы [8, 15, 31].

Некоторые ученые применяли количественные методики прогнозирования деятельности транспорта, в частности, обоснование целесообразности использования балансового метода – метода прямого счета при планировании на 5- и 10-летний временной промежуток. Если прогнозирование производится на более длительный период, то ученый советует использовать метод косвенных расчетов, в котором применяются динамические ряды показателей [12, 14 – 17].

Также были осуществлены исследования по региональному планированию транспортных показателей. Под руководством и при участии некоторых авторов на Украине была осуществлена разработка методик регионального планирования показателей для всех видов магистрального транспорта на территории страны [15].

В.Л. Иванов и С.П. Кузнецов в более поздний период времени тоже выполнили методические работы по региональному планированию. Упомянутый первым исследователь применил следующие методы: математико-статистический, экспертных оценок и расчетно-аналитический и определил транспортные показатели на территории РФ на будущий период. Вторым были осуществлены такие же расчеты, но по автомобильному транспорту РФ.

В процессе прогнозирования были использованы нормативные показатели развития областей НХ РФ, а также экстраполяционные модели динамического ряда. Планирование объемов транспортной работы осуществлялось и зарубежными учеными. Например, в трудах Л. Фишмана, Дж. Фишера и Т. Ландсберга определены прогнозы работы перевозок транспорта Америки на период до 1980 и до 2000 годов. Они строили прогноз на анализе зависимости валового национального дохода и транспорта. Данная зависимость была применена и шведским исследователем Г. Тутелиусом при планировании грузоперевозок и выборе транспортных средств [15].

Полином, являющийся аппроксимацией временного ряда исследуемого показателя, – математическая основа экстраполяционных методов. Указанные методы дополняются с учетом применения автокорреляции в некоторых рядах динамики, когда есть уровень зависимости между значениями параметра, который включен в динамический ряд, становится значительным. Дополнение производится при использовании многофакторной математической модели анализа с применением факторов-аргументов, которые запаздывают во времени. Указанный вариант модели был исследован в трудах Г.В. Бондаренко и С.Г. Круглова.

Целью данного исследования является анализ и характеристика современных методов прогнозирования и стратегического планирования железнодорожных перевозок. Научная новизна полученных результатов заключается в углублении теоретических положений по прогнозированию и стратегическому планированию железнодорожных перевозок, в частности развитие теоретико-методических подходов к выбору метода прогнозирования и стратегического планирования железнодорожных перевозок на предприятиях и организациях.

Теоретическую основу исследования прогнозирования и планирование деятельности железнодорожного транспорта составили научные труды зарубежных и отечественных ученых, таких как: Ачкасов А. Е., Баурос Д., Бланк И.А., Губанов В. А., Голубков Е. П., Ламберт Д. М., Сток Дж. Р., Старостина А. О., Лахтионова Л. А., Лушкин В. А., Луис Р., Мазараки А. А., Пономарев В. Д., Носова С. С., Шеремет А. Д., Сайфулин Р. С. Ялдин И.В. и много других. Однако, несмотря на значительный объем научных разработок, и публикаций по теории организации деятельности в сфере перевозок, проблема управления логистикой перевозок в условиях нестабильности транспортного потока остается открытой.

V. Сравнительный анализ прогнозирования вагонопотоков

Работа транспортной сети и, в частности, железнодорожной составляющей связана со значительными изменениями, что особенно заметно в последнее время. Санкционное давление на экономику страны сохраняется, и транспортная отрасль приспосабливается к работе в новых меняющихся условиях, что делает более сложным выбор и принятие точных и верных управленческих решений на всех уровнях системы.

Изменение транспортно-логистических потоков еще более увеличивает нагрузку на Восточный полигон, имеющий достаточное количество участков с лимитированной пропускной способностью. В связи с этим требуются грамотные прогнозы вагонопотока и его баланс, в том числе и по стыковым пунктам железных дорог.

Основная цели построения прогнозных моделей – отражение влияния реальных производственных процессов без учета случайных возмущений, носящих нерегулярный характер. При формировании прогноза на перспективу главенствующая роль отводится учету основных тенденций развития с учетом возможных сценариев. В связи с этим, необходимо достаточно тщательно подходить к выбору методов и моделей прогнозирования.

В представленной работе на первом этапе построения модели временного ряда (ВР) используется модель Бокса-Дженкинса (Box-Jenkins approach). Box-Jenkins модель является моделью авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего (АРПСС) или в англоязычном варианте Autoregressive Integrated Moving Average mode (ARIMA).

При анализе исторических данных в рассматриваемом ВР нет отчетливо выраженных регулярных составляющих. Отдельные наблюдения могут содержать значительные ошибки, что мешает не только выделить регулярные компоненты, но также построить прогноз. Методология ARIMA позволяет осуществить выбор регулярных компонент.

В представленной модели рассматривают два основных процесса:

1. Процесс авторегрессии (AR):

При условии содержания во временном ряду (ВР) элементов, последовательно зависящих друг от друга, ВР можно представить в следующем виде:

$$y_t = z + a_1 y_{t-1} + a_2 y_{t-2} + a_3 y_{t-3} + \dots + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где z – константа; a_1, a_2, a_3 – параметры авторегрессии.

Здесь каждый элемент ряда – это сумма случайной компоненты, а также линейной комбинации предыдущих наблюдений.

2. Процесс скользящего среднего (МА):

Отличие данного процесса от предыдущего заключается в наличие суммарное воздействие предыдущих ошибок на каждое последующее наблюдение. Такой процесс имеет следующий вид:

$$y_t = \mu + e_t - b_1 \varepsilon_{t-1} - b_2 \varepsilon_{t-2} + b_3 \varepsilon_{t-3}, \quad (2)$$

где μ – константа; b_1, b_2, b_3 – параметры МА.

Можно сделать вывод о том, что текущее наблюдение ряда является суммой случайной компоненты в этот момент

и линейной комбинации случайных воздействий в предыдущие моменты времени.

В эконометрических исследованиях чаще всего используют модели ARIMA (p, d, q), значения параметров которой принимают значения не больше числа 2. При этом параметры p и q определяют порядок авторегрессионной составляющей и порядок скользящего среднего (для этого рассматривают модели ARMA (p, q) – модели авторегрессии со скользящими средними) соответственно, а параметр d – порядок разности (дискретной производной)

Общий вид ARIMA модели:

$$\Delta_y^d = c + \sum_{i=1}^p a_i \mu \cdot \Delta y_{t-1} + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где ε_t – стационарный временной ряд; c, a_i, b_j – параметры модели; Δ^d – оператор разности.

Для выбора необходимого количества параметров каждого ряда, воспользуемся графиками автокорреляционной функции (АКФ) и частной автокорреляционной функции (ЧАКФ), представленными для ряда Петровский Завод на рисунках 2 и 3.

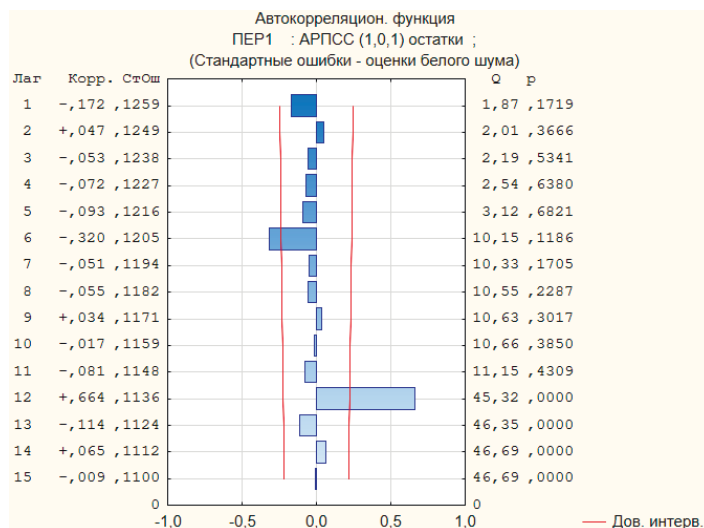


Рис. 2. Автокорреляционная функция для ВР Петровский Завод

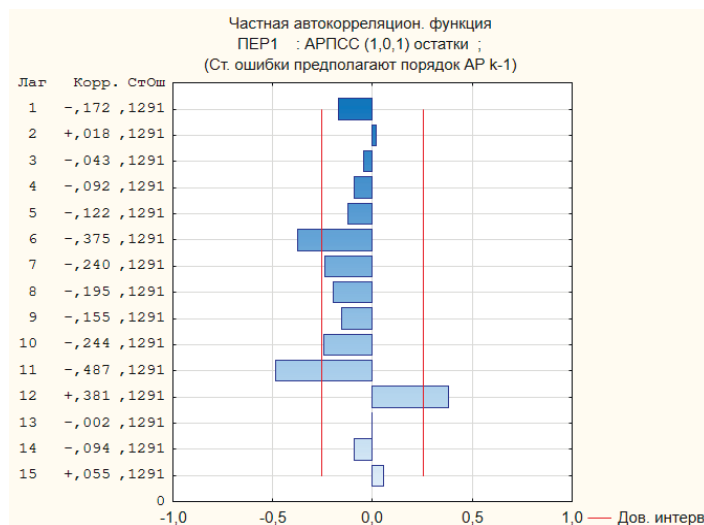


Рис. 3. Частная автокорреляционная функция для ВР Петровский Завод

АКФ процесса вычисляется в соответствии с рекуррентным соотношением по первым p ее значениям $y(1), \dots, y(p)$. ЧАКФ процесса будет иметь ненулевые значения лишь при $\tau \leq p$; все значения $y_{\text{част}}(p)$ при $\tau > p$ будут нулевыми. Данное свойство ЧАКФ AR(p) – процесса используется при выявлении порядка в модели авторегрессии для конкретных анализируемых ВР. В случае, когда все частные коэффициенты автокорреляции, начиная с порядка k , статистически незначимо отличаются от нуля, то порядок модели авторегрессии определяют равным $p = k-1$. В представленной статье авторами каждый ВР был рассмотрен отдельно, поскольку все исследуемые ВР являются нестационарными, что подтверждено тестом Дики-Фуллера.

Таблица 1

Графики АКФ и ЧАКФ и их свойства

Функция	ARMA (1, 0)	ARMA (2, 0)	ARMA (0, 1)	ARMA (0, 2)	ARMA (1, 1)
АКФ	Экспоненциально затухает	Экспоненциально затухает или имеет форму синусоидальной волны	Пик на лаге 1	Пики на лагах 1 и 2	Экспоненциально затухает от значения $r(1)$
ЧАКФ	Пик на лаге 1	Пики на лагах 1 и 2	Экспоненциально затухает	Экспоненциально затухает или имеет форму синусоидальной волны	Экспоненциально затухает от значения $r_p(1)$

При идентификации ARIMA-моделей необходимо подобрать порядок d модели. Последовательное структурирование рассматриваемого процесса y_t с помощью операторов $\Delta, \Delta^2, \dots, \Delta^d$ направлены на устранение его нестационарности. До тех пор, пока $1 < k$ процессы Δ_{yt}^k будут оставаться нестационарными и это будет характеризоваться отсутствием быстрого спада в поведении выборочной АКФ. Поэтому предполагается, что необходимая для получения стационарности степень k разности Δ достигнута, если АКФ ряда быстро затухает. После подбора порядка k анализируется уже не сам ряд y_t , а его k -е разности. Идентификация ВР сводится к идентификации ARMA (p, q) моделей. Согласно проведенным исследованиям, для всех рядов будет принят порядок модели $d=1$, основанный на анализе поведения АКФ исследуемых ВР.

Для осуществления проверки модели на адекватность, были рассчитаны следующие ошибки прогноза:

- те ущая сумма ошибок прогноза RSFE;
- среднее абсолютное отклонение (Mean Absolute Derivation, MAD) измеряет точность прогноза, усредняя величины ошибок прогноза (абсолютные значения каждой ошибки);
- среднеквадратическая ошибка (Mean Squared Error, MSE);
- средняя абсолютная ошибка в процентах (Mean Absolute Percentage Error, MAPE) вычисляется путем отыскания

абсолютной ошибки в каждый момент времени и деления ее на действительно наблюдаемое значение;

- трекинг сигнал TS – это мера, показывающая отклонение ошибки прогноза в большую или меньшую сторону.

Определенные выше способы оценки точности прогноза используются для следующих целей:

- сравнение точности прогноза двух различных методов;
- оценка адекватности и надежности метода
- выявление наиболее оптимального метода.

Для исследуемых рядов были выполнены проверки с использованием показателей MAD , MSE , $MAPE$, MPE , $RSFE$, TS (табл. 2).

Таблица 2

Результаты проверок модели на адекватность

Стыковой пункт	MAD	MSE	$MAPE$	MPE	TS
Тайшет	13,68	338,05	0,01	0,00009	MIN -6.19 MAX 7.44
Мариинск	32,17	2247,94	0,01	0,00020	MIN -6.73 MAX 6.63
Петровский Завод	30,6	1682,2	0,01	0,00006	MIN -7.31 MAX 4.99
Архара	92,6	7620,89	0,01	0,000202	MIN -7.59 MAX 5.85

Полученная модель является достаточно точной, так как средняя абсолютная ошибка ($MAPE$) составляет 1%. Сформированный прогноз, является «мягким» поскольку присутствует выход трекинг-сигнала за пределы $(-4;4)$, но находящегося в пределах $(-7;7)$. Модель проходит проверку на адекватность.

По итогам проводимых исследований были построены графики фактических значений и моделей прогноза исследуемых временных рядов, представленные на рисунках 4, 5.



Рис. 4. Очищенный ВР Петровский завод от сезонности и функция тренда

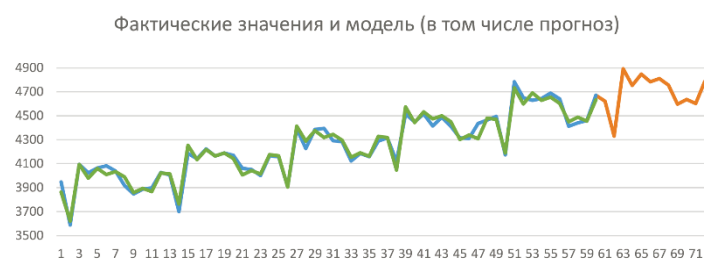


Рис. 5. Фактические значения и модель ARIMA прогноза колебаний вагонопотоков по стыковому пункту Петровский Завод ЗаБЖД

Полученные результаты, отображенные на графике и значениями AIC, показывают, что модель ARIMA является адекватной и удовлетворяет критерию качества при выбранном наборе параметров. Таким образом, их можно использовать для построения прогноза вагонопотоков с целью получения достоверного результата.

При построении прогнозных моделей, для выбора оценочных вариантов, наиболее эффективно построение нескольких вариантов математических моделей. В качестве альтернативного варианта построения прогноза вагонопотоков по стыковым пунктам дорог, рассмотрен адаптивный метод прогнозирования, в частности, метод двойного экспоненциального сглаживания Хольта-Винтерса. Данный метод возможен к применению при наличии в исследуемых ВР тренда. При этом в рассматриваемом методе в каждом периоде обновляются компоненты: уровень и тренд ряда. Уровень представляет собой сглаженное значение данных в конце каждого периода, а тренд – сглаженное значение среднего роста в конце каждого периода.

Метод Хольта-Уинтерса в общем виде описывает система уравнений:

$$\begin{cases} \hat{Y}_{t+p} = (L_t p + T_t) S_{t-s+p}; \\ L_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}} + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}); \\ T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}; \\ S_t = \gamma \frac{Y_t}{L_p} + (1 - \gamma)S_{t-s}, \end{cases} \quad (4)$$

где L_t – оценка текущего уровня; α – константа сглаживания для данного уровня; Y – новое наблюдение или реальное значение величины за период; β – константа сглаживания для оценки тренда; T_t – оценка тренда; γ – константа сглаживания для оценки тренда; S_t – оценка сезонности; p – количество периодов в будущем, на которое строится прогноз; s – длительность периода сезонного колебания; $\hat{Y}_{t+p}$ – прогноз на p периодов вперед.

Как и в методе линейного экспоненциального сглаживания Хольта, веса α , β и γ могут выбираться субъективно или путем минимизации ошибки прогнозирования, например, значения MSE. Наиболее подходящей методикой для определения этой величины является алгоритм нелинейной оптимизации констант сглаживания. Фактические значения и модель прогноза, построенная с помощью модели двойного экспоненциального сглаживания Хольта-Винтерса представлена на рисунке 6.



Рис. 6. Фактические значения и модель Хольта-Винтерса прогноза колебаний вагонопотоков по стыковому пункту Петровский Завод ЗаБЖД

После построения двух варианта математических моделей: на основе ARIMA модели и методом Хольта-Винтерса, для каждой из них были рассчитаны параметры точности и адекватности. Для исследуемых ВР были выполнены проверки с использованием показателей *MAD, MSE, MAPE, MPE, RSFE, TS*.

Полученные результаты сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты проверок моделей на адекватность

Модель	MAD	MSE	MAPE	MPE	TS
АРПСС	2840,48	14090510,17	0,0227	0,0013	MIN -1.1 MAX 7.6
Хольт-Винтерс	3952,13	24020976,21	0,0314	0,0022	MIN -6.99 MAX -0.84

Обе модели являются «мягкими» из-за трекинг сигнала, выходящего за границы диапазона (-4;4), но находящегося в пределах (-8;8).

Модель, построенная методом тренда и сезонности, оказалась более точной ввиду меньшего значения среднеквадратического отклонения: $MAPE_1=2,27\%$ и $MAPE_2=3,14\%$. Теперь следует посмотреть на распределение остатков модели рисунк 7.

Empirical Distribution Test for SERIES01

Hypothesis: Normal

Date: 01/09/21 Time: 04:59

Sample: 1 60

Included observations: 60

Method	Value	Adj. Value	Probability
Lilliefors (D)	0.086918	NA	> 0.1
Cramer-von Mises (W2)	0.065172	0.065715	0.3183
Watson (U2)	0.065042	0.065584	0.2828
Anderson-Darling (A2)	0.361607	0.366353	0.4338

Method: Maximum Likelihood - d.f. corrected (Exact Solution)

Parameter	Value	Std. Error	z-Statistic	Prob.
MU	126148.6	1035.567	121.8159	0.0000
SIGMA	8021.470	738.4361	10.86278	0.0000
Log likelihood	-624.0289	Mean dependent var.		126148.6
No. of Coefficients	2	S.D. dependent var.		8021.470

Рис. 7. Итоги теста на нормальное распределение остатков модели АРПСС

Итоги тестов на нормальное распределение остатков показывают уровень значимости 5%, соответственно нельзя отклонить гипотезу о нормальности распределения остатков. А это, в свою очередь, свидетельствует о правильности выбранной модели. Поэтому для прогноза колебаний вагонопотоков по стыковым пунктам полигона была использована модель на основе тренда и сезонности.

Заключение

В заключении хотелось бы отметить, что на сегодняшний день в России не сформирован единый подход к построению прогнозных моделей грузовых перевозок. Наличие широкого спектра разнонаправленных исследований в данной области не способствует выработке единого направления дальнейшего развития.

Большое количество способов и средств детализированной оценки колебаний транспортных потоков позволяет осуществлять планирование и прогнозирование перевозочного процесса, в том числе и на железнодорожном транспорте, с различной долей точности. Однако, в условиях постоянно меняющейся оперативной обстановки и наличия различного рода неравномерностей, в вопросах прогнозирования имеют место нерешённые вопросы.

Таким образом, в плане дальнейшего проведения научных исследований, вопрос неравномерности транспортных потоков, в частности, вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог в условиях полигонных технологий, является достаточно актуальным.

Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года УТВЕРЖДЕНА распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р.
2. Белозеров О.В. Доклад генерального директора -председателя правления открытого акционерного общества "Российские железные дороги" О.В. Белозерова на итоговом заседании правления ОАО "РЖД" // Железнодорожный транспорт. 2021. № 3. С. 7-16.
3. Липидус Б.М. Об основных направлениях научных исследований в интересах опережающего развития ОАО "РЖД" и их приоритизации // Железнодорожный транспорт. 2021. № 11. С. 22-29.
4. Липидус Б.М., Мишарин А.С., Махутов Н.А. и др. О научной платформе стратегии развития железнодорожного транспорта в России до 2050 года // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. 2017. № 2. С. 1-20.
5. Бородин А.Ф., Панин В.В., Лаханкин Е.А. и др. Повышение и использование перевозочной мощности полигонов сети: эффективные стратегия и тактика // Железнодорожный транспорт. 2022. № 7. С. 8-16.
6. Правдин Н.В., Дыканюк М.Л., Негрей В.Я. Прогнозирование грузовых потоков. М.: Общество с ограниченной ответственностью Центр "Транспорт", 1987. 247 с.
7. Осьминин А.Т. Научное решение проблем перевозочного процесса // Железнодорожный транспорт. 2018. № 12. С. 12-17.
8. Осьминин А.Т., Белозерова И.Г. Совершенствование системы планирования перевозок грузов // Железнодорожный транспорт. 2020. № 3. С. 17-21.
9. Краковский Ю.М., Домбровский И.А. Прогнозирование грузооборота дороги на основе статистической и экспертной информации // Вестник стипендиатов DAAD. 2013. № 1(10). С. 48-54.
10. Бутыркин А.А., Куликова Е.Б., Мадяр О.Н. Модели прогнозирования пассажирских перевозок на железнодорожном и авиационном транспорте // Наука и техника транспорта. 2021. № 1. С. 19-27.
11. Бодюл В.И. Математическая модель распределения вагонного парка по железным дорогам в условиях неравномерности грузовых перевозок // Вестник ВНИИЖТ. 2006. № 3. С. 3-9.
12. Сотников Е.А., Шенфельд К.П. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков // Вестник ВНИИЖТ. 2011. №5. С. 3-9.
13. Ульяницкий Е.М., Складов В.Н. Моделирование процессов управления вагонопотоками на железнодорожном транспорте // Вестник ВНИИЖТа. 55 2003. № 6. С. 39-42.
14. Максимей И.В., Сукач Э.И., Гируц П.В., Ерофеева Э.А. Имитационное моделирование вероятностных характеристик функционирования железнодорожной сети // Математические машины и системы. 2008. № 4. С. 147-153.
15. Ашууров А.М. Прогноз и ретроспективное диагностирование тенденций изменения параметров рынка услуг

железнодорожного транспорта // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2018. Т. 2. № 4(44). С. 54-63.

16. *Портнова О. Ю.* Построение и исследование математической модели обеспечения вагонами промышленных предприятий // Транспорт Урала. 2013. № 1(36). С. 60-67.

17. *Белозерова И.Г.* Моделирование планируемой погрузки по различным сценариям // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2019. Т. 16. № 3. С. 372-379.

18. *Маловецкая Е.В., Большаков Р.С.* Оценка особенностей колебаний вагонопотоков с использованием математических моделей прогноза на основе временного ряда // Наука и техника транспорта. 2021. № 3. С. 32-39.

19. *Король Р.Г., Балалаев А.С.* Имитационное моделирование работы припортовой железнодорожной станции с вероятностно-статистическим подходом к изменению параметров поступающего вагонопотока // Транспорт Урала. 2014. № 3(42). С. 53-57.

20. *Маловецкая Е.В., Большаков Р.С.* Особенности применения временных рядов для оценки колебаний вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 1. С. 35-40.

21. *Маловецкая Е.В.* Применение принципов системного моделирования для построения прогнозных моделей вагонопотоков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 3(71). С. 171-178.

22. *Максимей И.В., Сукач Е.И., Гируц П.В.* Использование имитационного моделирования для нахождения интегрального максимального потока в транспортной сети региона // DataRecording, Storage&Processing. 2008. Vol. 10. № 1. Р. 49-58.

23. *Рахмангулов А.Н., Тянь Ю.* Исследование методов "BIG DATA" для прогнозирования параметров транспортных потоков //

Отчет о НИР № Ор-15-37-51307\15 от 10.08.2015 (Российский Фонд Фундаментальных Исследований).

24. *Козлов П.А., Пермикин В.Ю., Колокольников В.С.* Автоматизированное построение имитационных моделей крупных транспортных объектов // Транспорт Урала. 2013. № 2 (37). С. 3-6.

25. *Хэйт Ф.* Математическая теория транспортных потоков. М.: Мир, 1996. 287 с.

26. *Карманов В.Г.* Математическое программирование. М.: Наука, 1986.

27. *Портнова О.Ю.* Построение и исследование математической модели обеспечения вагонами промышленных предприятий // Транспорт Урала. 2013. № 1(36). С. 60-67.

28. *Король Р.Г.* Обоснование математического аппарата для моделирования работы железнодорожной станции во взаимодействии с портом // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в 21 веке : труды всерос. молодеж. науч.-практ. конф. с междунар. участием / Под ред. А. Ф. Серенко. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. Т. 2. С. 161-170.

29. *Сорокина И.С., Числов О.Н.* Методы системного анализа и имитационного моделирования в работе предприятий промышленного железнодорожного транспорта // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2014. № 2. С. 115-120.

30. *Мазуренко О.О., Кудряшов А.В.* Имитационная модель работы железнодорожного направления для исследования вариантов организации грузовых вагонопотоков в оперативных условиях // Транспортные системы и технологии перевозок. 2012. №3. С. 50-55.

31. *Пехтерев Ф.С.* Обоснование долгосрочных перспектив объемов перевозок грузов железнодорожным транспортом с использованием межотраслевых балансов // Экономика железных дорог. 2013. № 12. С. 23-30.

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF ARIMA MODELS IN BUILDING FORECAST VALUES OF CAR-FLOWS

Ekaterina V. Malovetskaya, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia, katerina8119@mail.ru

Anna K. Mozalevskaya, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia, Mozalevskay@mail.ru

Abstract

The current condition of developments in the field of estimating the unevenness of railway transportation in the field of solving the problems of efficiency of the organization of the transportation process with the use of landfill technologies is considered. Studying the problems of irregularities in the flow of cars, identifying the differences between unavoidable fluctuations from congestion or interruptions initiated by improper modes of movement with the need to eliminate, the creation of appropriate mechanisms to reduce unevenness can significantly optimize infrastructure use. The use of mathematical models of various kinds for formation of models of the forecast of change of car flows on railways is estimated. In particular, the method of time series allows you to build predictive models based on an array of data on car traffic. A comparative review of methods and means of forming forecast models of changes in car flows at the junctions of railways operating in a single technological space. The use of time series as a mathematical apparatus for constructing simulation models for forecasting wagon fluctuations and loading is estimated. Prospects for the use of simulation modeling as a tool for estimating the fluctuations of wagon flows at the junctions of railways with a single control center are considered. On the basis of the conducted analysis a number of directions of expansion of the existing methodological base of construction of simulation models of railway transportations is offered.

Keywords: forecasting of transport car traffic, mathematical model, time series, system approach, non-uniformity of car traffic, predictive analysis, forecast model, mathematical statistics, simulation model, linear and dynamic programming, performance indicators, theory of large systems.

References

1. The strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 was APPROVED by the Decree of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 № 877-р.
2. O. V. Belozarov (2021) BELOZEROV at the final meeting of the board of Russian Railways. *Railway transport*. No. 3. P. 7-16.
3. B. M. Lapidus (2021) On the main directions of scientific research in the interests of the advanced development of Russian Railways and their prioritization. *Railway transport*. No. 11. P. 22-29.

4. B. M. Lapidus, A. S. Misharin, N. A. Makhutov et al. (2017) On the scientific platform for the development strategy of railway transport in Russia until 2050. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. No. 2. P. 1-20.
5. A.F. Borodin, V.V. Panin, E.A. Lakhankin et al. (2022) Increasing and using the transportation capacity of the network polygons: effective strategy and tactics. *Zheleznodorozhny transport*. No. 7. P. 8-16.
6. N.V. Pravdin, M.L. Dykanyuk, and V.Ya. Negrey (1987) Forecasting cargo flows. Moscow: Limited Liability Company Center "Transport". 247 p.
7. A. T. Osminin (2018) Scientific solution of the problems of the transportation process. *Railway transport*. No. 12. P. 12-17.
8. A. T. Osminin, I. G. Belozeroва (2020) Improving the planning system for cargo transportation. *Zheleznodorozhny transport*. No. 3. P. 17-21.
9. Yu. M. Krakovsky, I. A. Dombrovsky (2013) Forecasting the freight turnover of the road based on statistical and expert information. *Bulletin of DAAD Fellows*. No. 1(10). P. 48-54.
10. A. Ya. Butyrkin, E. B. Kulikova, and O. N. Madyar (2021) Models for predicting passenger traffic in railway and air transport. *Science and Technology of Transport*. No. 1. P. 19-27.
11. V.I. Bodyul (2006) Mathematical model of the distribution of the rolling stock on the railways in the conditions of uneven freight traffic. *Vestnik VNIIZhT*. No. 3. P. 3 - 9.
12. E.A. Sotnikov, K.P. Shenfeld (2011) Irregularity of freight traffic in modern conditions and its impact on the required throughput capacity of sections. *Vestnik VNIIZhT*. No. 5. P. 3-9.
13. E.M. Ulyanitsky, V.N. Sklyarov (2003) Modeling of control processes of car flows in railway transport. *Bulletin of VNIIZhT*. № 6. P. 39-42.
14. I. V. Maksimey, E. I. Sukach, P. V. Giruts, E. A. Erofeeva (2008) Simulation modeling of the probabilistic characteristics of the functioning of the railway network. *Mathematical machines and systems*. No. 4. P. 147-153.
15. A. M. Ashurov (2018) Forecast and retrospective diagnosis of trends in changes in the parameters of the railway transport services market. *Polytechnic Bulletin. Series: Intellect. Innovation. Investments*. Vol. 2. No. 4 (44). P. 54-63.
16. O. Yu. Portnova (2013) Construction and study of a mathematical model for providing wagons for industrial enterprises. *Transport of the Urals*. No. 1 (36). P. 60-67.
17. I. G. Belozeroва (2019) Modeling the planned loading according to various scenarios. *Bulletin of the Petersburg University of Communications*. Vol. 16. No. 3. P. 372-379.
18. E.V. Malovetskaya, R.S. Bolshakov, R.S. Bolshakov (2021) Evaluation of the peculiarities of fluctuations in car flows using mathematical forecast models based on the time series. *Science and Technology of Transport*. No. 3. P. 32-39.
19. R. G. Korol, A. S. Balalaev (2014) Simulation modeling of the operation of a port railway station with a probabilistic-statistical approach to changing the parameters of the incoming car traffic. *Transport of the Urals*. No. 3 (42). P. 53-57.
20. E.V. Malovetskaya, R.S. Bolshakov (2021) Features of the use of time series for assessing the fluctuations of car flows at railway junction points. *T-Comm*. Vol. 15. No. 1. P. 35-40.
21. E. V. Malovetskaya (2021) Application of the principles of system modeling for building predictive models of car flows. *Modern technologies. System analysis. Modeling*. No. 3(71). P. 171-178.
22. I. V. Maksimey, E. I. Sukach, P. V. Giruts (2008) Using simulation to find the integral maximum flow in the transport network of the region. *DataRecording, Storage&Processing*. Vol. 10. No. 1. P. 49-58.
23. A.N. Rakhmangulov, Y. Tian (2015) Study of "BIG DATA" methods for predicting traffic flow parameters. Research report No. Or-15-37-51307. 15 dated 10.08.2015 (Russian Foundation for Basic Research).
24. P. A. Kozlov, V. Yu. Permikin, V. S. Kolokolnikov (2013) Automated construction of simulation models of large transport facilities. *Transport of the Urals*. No. 2 (37). P. 3-6.
25. F. Hayt (1996) Mathematical theory of traffic flows. Moscow: Mir. 287 p.
26. V.G. Karmanov (1986). Mathematical programming. Moscow: Nauka.
27. O. Yu. Portnova (2013) Construction and study of a mathematical model for providing wagons for industrial enterprises. *Transport of the Urals*. No. 1 (36). P. 60-67.
28. R. G. Korol (2013) Substantiation of the mathematical apparatus for modeling the operation of a railway station in cooperation with a port. youth scientific-practical. conf. with international participation / Ed. A. F. Serenko. Khabarovsk: Publishing House of the Far East State University of Railway Engineering. Vol. 2. P. 161-170.
29. I. S. Sorochkina, O. N. Chislov (2014) Methods of system analysis and simulation modeling in the work of industrial railway transport enterprises. *Proceedings of the Rostov State University of Communications*. No. 2. P. 115-120.
30. O. O. Mazurenko, A. V. Kudryashov (2012) Simulation model of the railway direction for the study of options for organizing freight car traffic in operational conditions. *Transport systems and transportation technologies*. No.3. P. 50-55.
31. F. S. Pekhterev (2013). Substantiation of long-term prospects for the volume of cargo transportation by rail using interbranch balances. *Economics of Railways*. No. 12. P. 23-30.

Information about authors:

Ekaterina V. Malovetskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia

Anna K. Mozalevskaya, Applicant, Irkutsk State Transport University (IrGUPS), Irkutsk, Russia