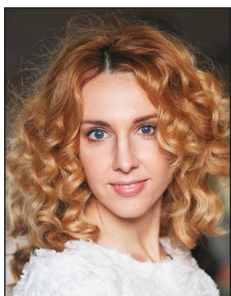


ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ КОЛЕБАНИЙ ВАГОНОПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННОГО РЯДА



Е.В. Маловецкая



Р.С. Большаков

Предлагается нетрадиционный подход для оценки сезонной неравномерности вагонопотоков, основанный на построении математических моделей прогноза. Идентификация моделей временного ряда колебаний вагонопотоков, сдаваемых по стыковым пунктам железных дорог, производится на основе системного подхода с возможностями прогнозирования их объемов. Получены графики временных рядов и коррелограмм.

Ключевые слова: математическая модель, временной ряд вагонопотоков, системный подход, колебание вагонопотоков, модель прогноза

DOI: 10.53883/20749325_2021_03_32

В современных условиях работы неравномерность в погрузке и перевозках грузов все более увеличивается, что вызывает существенные потери на железнодорожном транспорте. Одной из причин этого является переход от системы глобального государственного планирования к рыночным методам составления планов. Ряд исследований показывает, что за годы реформирования отрасли внутригодовая неравномерность перевозок возросла в среднем на 7–10%, а суточная — на 50% [2]. Представленный в статье материал затрагивает вопросы сезонной (годовой) неравномерности вагонопотоков, изучению которой не уделялось столь значительного внимания, как суточной, рассмотренной всесторонне в работах таких авторов как В.В. Повороженко, А.К. Угрюмов, В.И. Бодюл.

Особо актуальна проблема неравномерности по пунктам стыкования железных дорог и при погрузке вагонов в направлении портов Дальнего Востока,

функционирование которых характеризуется колебаниями объемов работы в значительных пределах. Возможность прогнозирования неравномерности перевозочного процесса, а также неравномерности погрузки с установлением соответствующих показателей — ключевой вопрос в ритмичности работы транспорта [1–5]. При оценке сезонной неравномерности вагонопотоков классическими методами возникают значительные погрешности. В качестве альтернативного решения данного вопроса авторы предлагают к рассмотрению обновленный методический инструментарий, позволяющий в последующем оценивать и прогнозировать неравномерность вагонопотоков.

В представленной статье проведен анализ структуры временных рядов колебаний вагонопотоков по пунктам стыкования железных дорог с целью дальнейшего построения модели прогноза колебаний вагонопотоков и в дальнейшем погрузки грузов в адрес портов Дальнего Востока.

Маловецкая Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Область научных интересов: организация движения длинносоставных поездов, математическое моделирование изменения перевозочных процессов, системный анализ. Автор более 30 научных работ.

Большаков Роман Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Область научных интересов: организация движения поездов, динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, системный анализ. Автор более 180 научных работ, в том числе двух монографий. Имеет более 30 патентов на изобретения.

Также рассмотрен транзитный вагонопоток, проходящий стыковые пункты без переработки. В дальнейшем планируется исследование вагонопотока, подлежащего переработке на станциях проследования и рассмотрение вариантов пропуска данного вагонопотока в составах различных категорий групповых поездов с прикреплением к расписанию.

Исследования структуры временного ряда с целью построения в дальнейшем адекватной модели прогноза, а также, осуществления анализа других временных рядов, связанных с исследуемым, не представляется возможным без установления структуры исследуемого ряда и структуры рядов с ним связанных [6–8].

В процессе составления моделей прогноза на долгосрочный период крайне важно установить, к каким именно классам рядов относится исследуемый временной ряд. Это могут быть либо стационарные ряды — TS (trend stationary), либо ряды, которые приводятся к стационарному виду — DS (difference stationary) [9].

Поэтому первым шагом в ходе исследования ряда является построение автокорреляционной и частной автокорреляционной функций.

Данная методика основана на построении модели прогноза вагонопотоков, сдаваемых по стыковым пунктам железных дорог и движущихся далее в направлении морских портов с последующим построением математической модели погрузки грузов, на основе которой в последующем можно будет спрогнозировать погрузку на предстоящий год.

Предложенный инструментарий позволяет разработать модели прогноза для оценки сезонной неравномерности погрузки грузов в направлении морских портов.

Все это будет давать возможность улучшить качество перевозочного процесса: возможность прогнозирования на перспективу и, как следствие, повысит качество принимаемых решений управленческим аппаратом холдинга «РЖД». Весь спектр мероприятий состоит в возможности построения прогнозных моделей для производственного блока холдинга «РЖД», помимо этого появится возможность актуализации структуры эксплуатационных показателей сети.

В настоящей работе рассматривается идентификация моделей временного ряда колебаний вагонопотоков и предложены модели для последующего построения прогноза, а также применен системный подход к решению проблемы прогнозирования объемов вагонопотоков. Возможность реализации прогнозов по средствам построения математических моделей является достаточно актуальной и является

особо необходимой в управленческом аппарате холдинга «РЖД».

Общие положения. Постановка задачи

Пусть даны последовательности $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n)$ и $y(t_{i+k}), y(t_{2+k}), \dots, y(t_{n+k})$, которые сдвинуты относительно друг друга на k моментов времени или, по-другому, с лагом k . Тогда можно определить уровень статистической зависимости между ними, вычислив оценку коэффициента автокорреляции $r(k)$ и построив коррелограмму [10]. Значение коэффициента автокорреляции вычисляется по следующей формуле:

$$r(k) = \frac{(n-k) \sum_{i=1}^{n-1} y_i y_{i+k} - \left(\sum_{i=1}^{n-1} y_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n-1} y_{i+k} \right)}{\sqrt{(n-k) \left(\sum_{i=1}^{n-1} y_i \right)^2} \sqrt{(n-k) \left(\sum_{i=1}^{n-1} y_{i+k} \right)^2}}. \quad (1)$$

«Последовательность коэффициентов корреляции $r(k)$, где $k=1, 2, \dots, n$, как функция интервала k между наблюдениями называется автокорреляционной функцией (ACF Autocorrelation function)» [11].

«Частной автокорреляцией называется автокорреляция, существующая между разделенными временем τ членами ряда $y(t)$ и $y(t+\tau)$ при устранении влияния на эту взаимосвязь всех промежуточных значений ряда. Величина τ называется порядком частной автокорреляции.» [12–15].

Частная автокорреляция второго порядка определяется по формуле:

$$r_{\text{частн}}(2) = \frac{r(2) - r^2(1)}{1 - r^2(1)}. \quad (2)$$

Значения частных автокорреляционных «функций» более высоких порядков могут быть подсчитаны аналогичным образом с использованием формулы» [6]

$$r_{\text{частн}}(2) = \frac{\begin{vmatrix} 1 & r(1) & \vdots & r(1) \\ r(1) & 1 & \vdots & r(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(m-1) & r(m-2) & \vdots & r(m) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & r(1) & \vdots & r(m-1) \\ r(1) & 1 & \vdots & r(m-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(m-1) & r(m-2) & \vdots & 1 \end{vmatrix}}. \quad (3)$$

«В настоящее время на Российских железных дорогах имеются 66 междорожных стыковых пункта. Они, в основном, отличаются объемами пропуска (обмена) грузовых поездов между железными дорогами. Работа стыковых станций осуществляется по одной общей технологии.» [16].

Особый интерес представляют железнодорожные стыковые пункты, расположенные в границах Восточного полигона [17], самого передового на сети дорог РФ и имеющего непосредственные выходы к морским портам Дальнего Востока.

В связи с этим был проанализирован статистический материал, характеризующий процессы приема и сдачи вагонов [18] по стыковому пункту Архара на Дальневосточной железной дороге, по стыковому пункту Петровский завод на Забайкальской железной дороге, по стыковому пункту Тайшет на Восточно-Сибирской железной дороге и по стыковому пункту Мариинск на Красноярской железной дороге.

На рис. 1 представлены графики исследуемых временных рядов.

Исходя из графиков, можно легко заметить изменчивый характер математического ожидания, который выражается в наличии тренда, имеющейся периодичности.

При этом отчетливо видно, что нет возможности разделения ряда на несколько частей, каждая из которых имела бы схожее среднее.

Таким образом, можно говорить о нестационарности рядов, представленных на графиках (см. рис. 1а–1г).

Оценка временных рядов

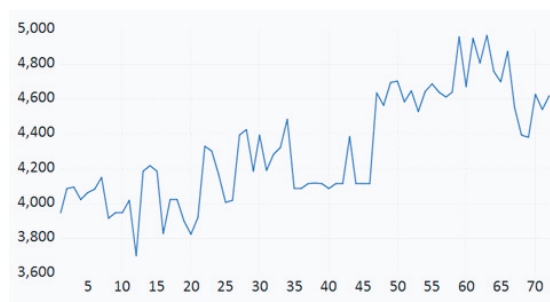
Анализ, осуществляемый по графикам — это начальная диагностика ряда. Еще одним из способов оценки ряда на стационарность является коррелограмма исследуемого временного ряда (ACF).

Графики коррелограмм исследуемых временных рядов представлены на рис. 2,3.

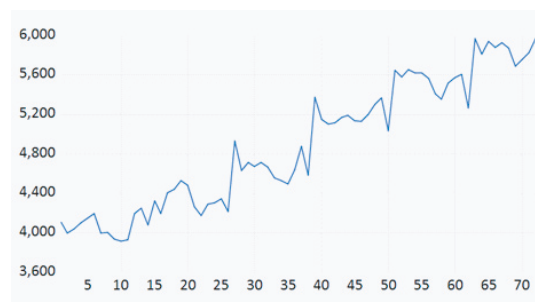
В случае, если исследуемый ряд стационарен, то его теоретическая ACF сходится к 0, при этом необходимо отметить, что сходится она постепенно. Поскольку исследование проходит с выборочными временными рядами, а, следовательно, и с выборочными автокорреляционными функциями, то сделать окончательный вывод только по коррелограмме сложнее.

Также необходимо отметить, что сложности диагностики по коррелограмме связаны еще и с тем, что анализируемые временные ряды являются достаточно короткими, поэтому фиксируется достаточно быстрое убывание ACF.

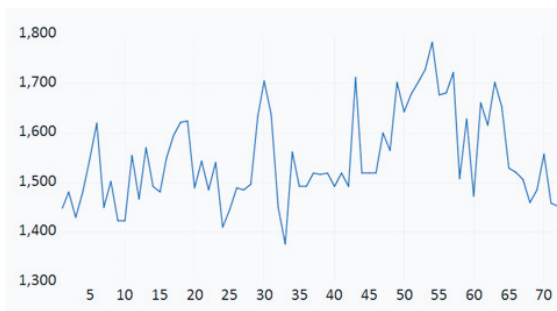
а



б



в



г

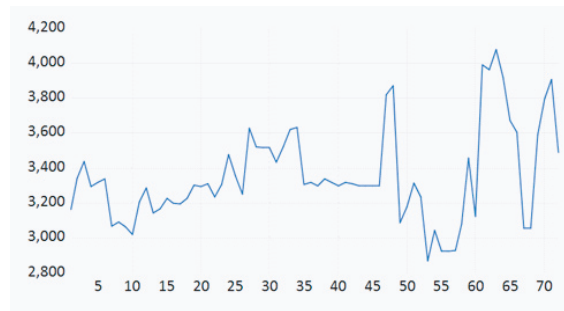


Рис. 1. Графики исследуемых временных рядов:

а – стыковой пункт Петровский Завод; б – стыковой пункт Архара;

в – стыковой пункт Тайшет; г – стыковой пункт Мариинск

«ОЦЕНКА ОСОБЕННОСТЕЙ КОЛЕБАНИЙ ВАГОНОПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННОГО РЯДА»

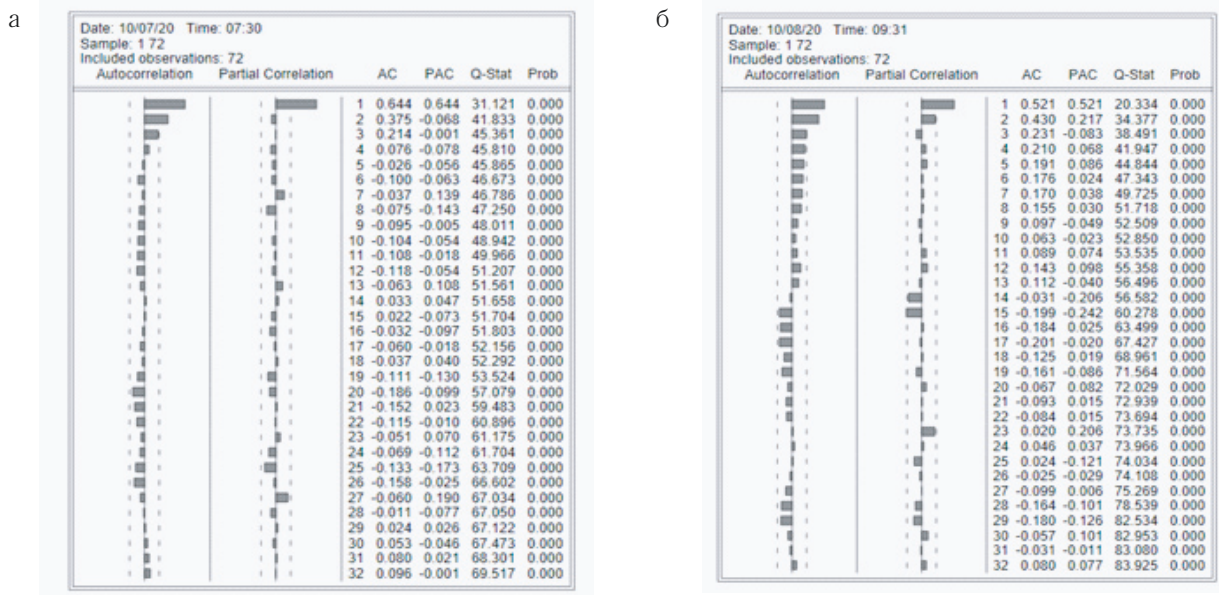


Рис. 2. Графики коррелограмм рядов: а – Тайшет; б – Мариинск

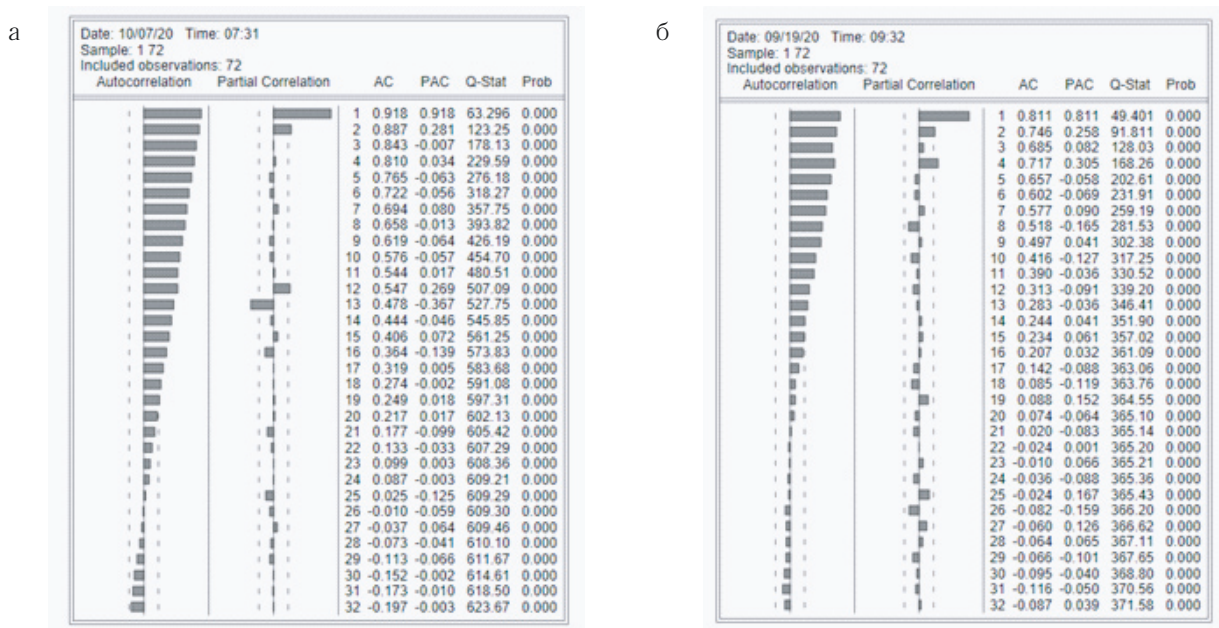


Рис. 3. Графики коррелограмм рядов: а – Петровский Завод; б – Архара

Также стационарность временного ряда можно проверять с помощью критериев по тесту Дики-Фуллера. Этот тест проверяет значение коэффициента a в авторегрессионном уравнении первого порядка $AR(1)$: $y_t = a \cdot y_{t-1} + \epsilon_t$.

Если процесс стационарен, то все корни не превосходят по модулю единицу, т.е. находятся в интервале $[-1; 1]$.

Анализ графиков коррелограмм

Проведем анализ исследуемых рядов согласно расширенному тесту Дики-Фуллера. Результаты анализа представлены на рис. 4,5.

В представленных на рис. 4,5 отчетах анализа исследуемых рядов гипотеза о нулевом корне отвергается на любом из приведенных уровней значимости.

а

Null Hypothesis: SERIES01 has a unit root				
Exogenous: Constant				
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)				
		t-Statistic	Prob.*	
Augmented Dickey-Fuller test statistic		-4.617099	0.0003	
Test critical values:		1% level	-3.525618	
		5% level	-2.902953	
		10% level	-2.588902	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(SERIES01)				
Method: Least Squares				
Date: 08/22/20 Time: 01:23				
Sample (adjusted): 2014M02 2019M12				
Included observations: 71 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SERIES01(-1)	-0.471387	0.102096	-4.617099	0.0000
C	730.9060	158.5697	4.609367	0.0000
R-squared	0.236029	Mean dependent var		0.056338
Adjusted R-squared	0.224957	S.D. dependent var		89.78926
S.E. of regression	79.04733	Akaike info criterion		11.60574
Sum squared resid	431145.2	Schwarz criterion		11.66947
Log likelihood	-410.0036	Hannan-Quinn criter.		11.63108
F-statistic	21.31760	Durbin-Watson stat		2.242382
Prob(F-statistic)	0.000017			

б

Null Hypothesis: SERIES01 has a unit root				
Exogenous: Constant				
Lag Length: 0 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)				
		t-Statistic	Prob.*	
Augmented Dickey-Fuller test statistic		-3.860110	0.0038	
Test critical values:	1% level	-3.525618		
	5% level	-2.902953		
	10% level	-2.588902		
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(SERIES01)				
Method: Least Squares				
Date: 10/07/20 Time: 07:28				
Sample (adjusted): 2 72				
Included observations: 71 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SERIES01(-1)	-0.353544	0.091589	-3.860110	0.0003
C	1189.516	307.9529	3.862656	0.0003
R-squared	0.177597	Mean dependent var	4.591549	
Adjusted R-squared	0.165678	S.D. dependent var	227.1916	
S.E. of regression	207.5196	Akaike info criterion	13.53609	
Sum squared resid	2971442	Schwarz criterion	13.59983	
Log likelihood	-478.5313	Hannan-Quinn criter.	13.56144	
F-statistic	14.90045	Durbin-Watson stat	1.895777	
Prob(F-statistic)	0.000252			

Рис. 4. Отчет анализа исследуемых рядов: а – Тайшет; б – Мариинск

а

Null Hypothesis: SERIES01 has a unit root				
Exogenous: None				
Lag Length: 3 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)				
		t-Statistic	Prob.*	
Augmented Dickey-Fuller test statistic		0.714936	0.8672	
Test critical values:	1% level	-2.599413		
	5% level	-1.945669		
	10% level	-1.613677		
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(SERIES01)				
Method: Least Squares				
Date: 10/08/20 Time: 18:43				
Sample (adjusted): 5 72				
Included observations: 68 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SERIES01(-1)	0.003376	0.004721	0.714936	0.4772
D(SERIES01(-1))	-0.438286	0.116906	-3.749063	0.0004
D(SERIES01(-2))	-0.281134	0.123738	-2.272003	0.0265
D(SERIES01(-3))	-0.365565	0.117696	-3.106008	0.0028
R-squared	0.242275	Mean dependent var	8.764706	
Adjusted R-squared	0.206757	S.D. dependent var	188.0960	
S.E. of regression	167.5262	Akaike info criterion	13.13718	
Sum squared resid	1796162	Schwarz criterion	13.26774	
Log likelihood	-442.6641	Hannan-Quinn criter.	13.18891	
Durbin-Watson stat	1.958688			

б

Null Hypothesis: SERIES01 has a unit root				
Exogenous: None				
Lag Length: 11 (Automatic - based on SIC, maxlag=11)				
		t-Statistic	Prob.*	
Augmented Dickey-Fuller test statistic		6.613999	1.0000	
Test critical values:		1% level	-2.604073	
		5% level	-1.946348	
		10% level	-1.613293	
*MacKinnon (1996) one-sided p-values.				
Augmented Dickey-Fuller Test Equation				
Dependent Variable: D(SERIES01)				
Method: Least Squares				
Date: 10/08/20 Time: 18:34				
Sample (adjusted): 13 72				
Included observations: 60 after adjustments				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
SERIES01(-1)	0.043957	0.006646	6.613999	0.0000
D(SERIES01(-1))	-0.790703	0.106273	-7.440285	0.0000
D(SERIES01(-2))	-0.567832	0.135339	-4.195617	0.0001
D(SERIES01(-3))	-0.499024	0.140939	-3.540707	0.0009
D(SERIES01(-4))	-0.520127	0.138725	-3.749347	0.0005
D(SERIES01(-5))	-0.690514	0.127403	-5.419936	0.0000
D(SERIES01(-6))	-0.800050	0.115646	-6.918095	0.0000
D(SERIES01(-7))	-0.636651	0.128453	-4.956308	0.0000
D(SERIES01(-8))	-0.483760	0.138943	-3.481725	0.0011
D(SERIES01(-9))	-0.431853	0.139558	-3.094441	0.0033
D(SERIES01(-10))	-0.459185	0.135724	-3.383224	0.0014
D(SERIES01(-11))	-0.737037	0.109413	-6.736297	0.0000
R-squared	0.726087	Mean dependent var	29.55000	
Adjusted R-squared	0.663316	S.D. dependent var	224.6242	
S.E. of regression	130.3370	Akaike info criterion	12.75498	
Sum squared resid	815411.5	Schwarz criterion	13.17385	
Log likelihood	-370.6494	Hannan-Quinn criter.	12.91882	
Durbin-Watson stat	1.367848			

Рис. 5. Отчет анализа исследуемых рядов: а – Петровский Завод; б – Архара

Расчетные значения t-Statistic имеют отрицательные показатели:

- ряд Петровский Завод t-Statistic = -4,61;
- ряд Архара t-Statistic = -3,860.

Все значения t-Statistic расположены левее (дальше от нуля) критических значений. Поскольку нулевая гипотеза отвергнута, то нет необходимости брать разности чтобы привести исследуемый ряд к стационарному виду [19].

Построенные коррелограммы первых разностей временных рядов Петровский Завод и Архара (рис. 6,7), а также модели авторегрессии первого порядка, имеют характерные особенности:

- автокорреляционная функция (Autocorrelation function) имеет постепенное угасание;
- частная автокорреляционная функция имеет резкий обрыв PACF (Partial correlation function);

• автокорреляционные значения имеют положительные коэффициенты $\text{Prob}_1=0.0003$ $\text{Prob}_2=0.0038$ соответственно (см. рис. 4).

По итогам анализа можно сделать вывод, что наиболее подходящая модель — авторегрессия первого порядка.

Проверка верности данного предположения возможна:

1. По коррелограмме остатков построенной модели.

2. По коррелограмме первых разностей ряда.

«Построение коррелограмм 1-х, 2-х разностей позволяет установить стационарность исходного ряда или ряда разностей. Наиболее целесообразно данное построение, если коэффициент автокорреляции первого порядка близок к единице» [9].

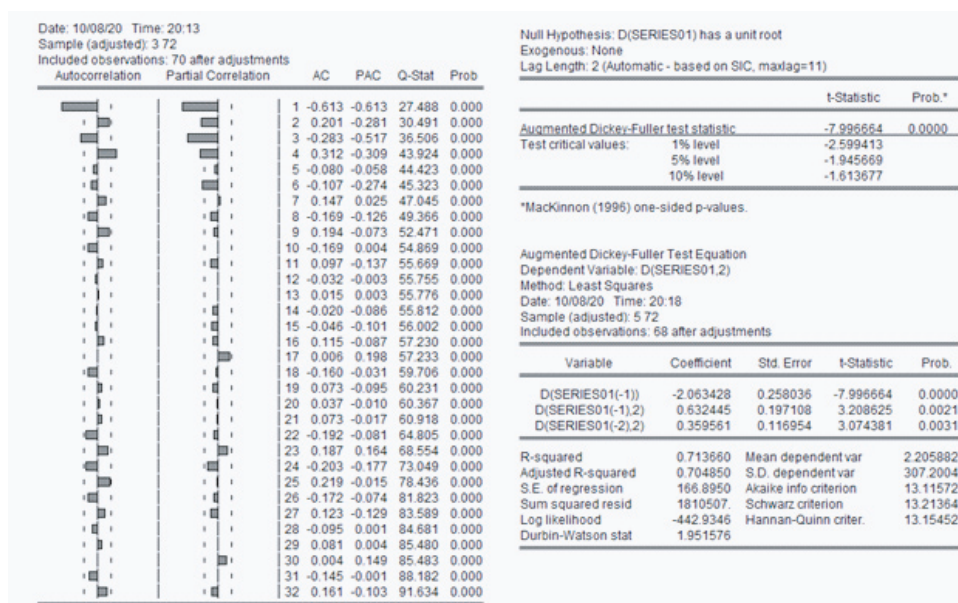


Рис. 6. Взятие первых разностей, Петровский Завод

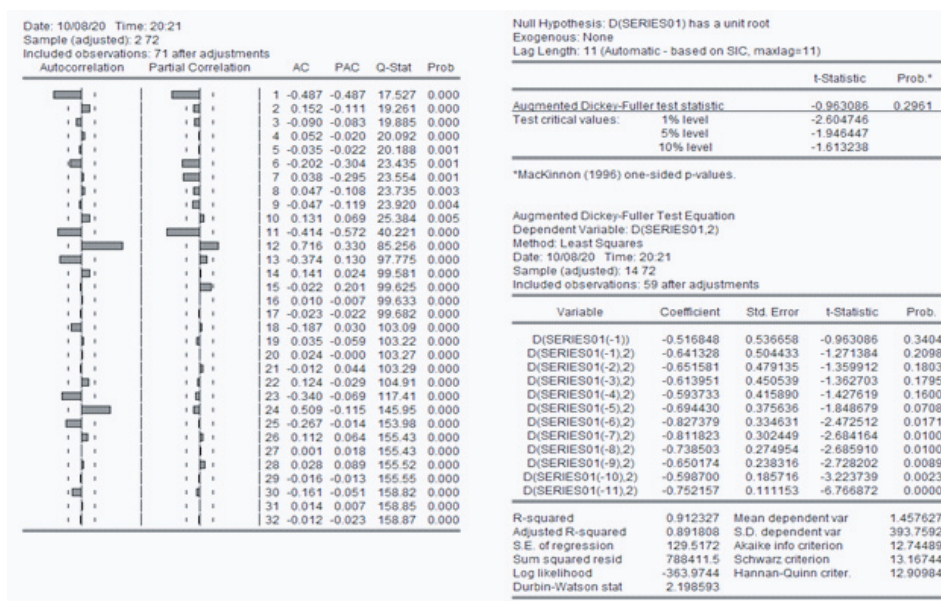


Рис. 7. Взятие первых разностей, Архара

Построенные коррелограммы первых разностей временных рядов Петровский Завод и Архара (рис. 6, 7), а также модели авторегрессии первого порядка, имеют характерные особенности:

- поэтапное убывание автокорреляционной функции, при этом данная функция носит знакопеременный характер;
- резкий обрыв частичной автокорреляционной функции;
- коэффициенты автокорреляции отрицательные.

Как результат, можно сделать вывод, что наиболее подходящая модель — авторегрессия первого порядка.

Заключение

Таким образом, получение адекватной модели временного ряда, которая позволит осуществлять долго-временный прогноз, как вагонопотоков, принимаемых и сдаваемых по стыковым пунктам железных дорог, так и дальнейшего погрузки в адрес морских портов, невозможно без установления класса и природы данных рядов и рядов с ними связанных.

По итогам проведения статистической проверки гипотез о случайности временного ряда, было выявлено, что исследуемые временные ряды вагонопотоков, поступающих на стыковые пункты, относятся к классу нестационарных временных рядов, в которых присутствует стохастический тренд. Данный стохастический тренд можно удалить путем последовательного дифференцирования ряда. Результаты численного моделирования будут использованы для дальнейшего построения модели прогноза поступления вагонопотоков по стыковым пунктам железных дорог РФ. Прогнозирование объемов вагонопотоков и, как следствие, объемов погрузки, приведет к системному контролю качества принимаемых решений на основе качественной информации, получаемой из прогнозных систем.

Все это будет способствовать повышению уровня планирования и анализа функционирования и развития железных дорог. Весь спектр мероприятий состоит в возможности построения прогнозных моделей для производственного блока холдинга «РЖД», помимо этого появится возможность актуализации структуры эксплуатационных показателей сети. Данная модель прогнозирования может быть внедрена в производственный цикл в целях автоматизации процесса прогнозирования объемов погрузки грузов железнодорожным транспортом, осуществляемого ЦФТО в рамках планирования объемов работ и потребности в ресурсах филиалов ОАО «РЖД» на год, квартал, месяц. 

Литература

1. Мачерет, Д.А. Объемы перевозок — ключевой фактор эффективности развития транспортной инфраструктуры/ Д.А. Мачерет, А.Ю. Ледней. — Текст: непосредственный // Экономика железных дорог. — 2019. — №4. — С. 28—38.
2. Бодюл, В.И. Математическая модель внутрисуточной неравномерности грузовых перевозок/ В.И. Бодюл. — Текст: непосредственный // Материалы международной конференции «Инфотранс 2005». — Москва. — С. 20—24.
3. Грунтов, П.С. Исследование влияния неравномерности движения на технологию сортировочных станций / Грунтов Петр Степанович: автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук; Белорус. ин-т инженеров ж. -д. транспорта. — Гомель, 1965. — 25 с. — Текст: непосредственный.
4. Сотников, Е.А. Неравномерность грузовых перевозок в современных условиях и ее влияние на потребную пропускную способность участков/ Е.А. Сотников, К.П. Шенфельд. — Текст: непосредственный // Вестник ВНИИЖТ. — 2011. — №5. — С. 3—9.
5. Маловецкая, Е.В. Актуализация порядка расчета плана формирования поездов и уточнения перечня показателей эксплуатационной работы на основе имитационного моделирования с учетом развития полигонных технологий/ Е.В. Маловецкая. — Текст: непосредственный // Современные наукоемкие технологии. — 2019. — №1(53). — С. 184—188.
6. Бабина, О.И. Сравнительный анализ имитационных и аналитических моделей/ О.И. Бабина. — Текст: непосредственный // Имитационное моделирование. Теория и практика: сборник трудов конференции. — Санкт-Петербург: Центр технологии судостроения и судоремонта (Санкт-Петербург), 2009. — С. 73—77.

7. Grigoroudis E., Orfanoudaki E., Zopounidis C. «Strategic performance measurement in a healthcare organisation: A multiple criteria approach based on balanced scorecard», *Omega*, 2012, №40 (1), pp. 104-119.
8. Sehra S. K., Brar D., Singh Y., Kaur D. «Multi criteria decision making approach for selecting effort estimation model», *arXiv preprint arXiv:1310.5220*, 2013.
9. Бурда А.Г. Экономико-математические методы и модели: учебное пособие / А.Г. Бурда, Г.П. Бурда; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». —Краснодар: КубГАУ, 2018. —180 с. ISBN 978-5-00097-684-5. —Текст: непосредственный.
10. Волокобинский М.Ю. Принятие решений на основе метода анализа иерархий/М.Ю. Волокобинский, О.А. Пекарская, Д.А. Рази. —Текст: непосредственный // *Финансы: Теория и практика*, 2016. —Т.20, №2. —С. 33–42.
11. Волкова, В.Н. Классификация моделей в системном анализе/ В.Н. Волкова, Л.В. Черненькая, В.Е. Магер. —Текст: непосредственный // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. —2013. —№3 (174). —С. 33–43.
12. Звягин, Л.С. Применение системно-аналитических методов в области экспертного прогнозирования/ Л.С. Звягин. —Текст: непосредственный // *Экономика и управление: проблемы, решения*. —2017. —Т.3, №6. —С. 145–148.
13. Самотина, С.А. Принятие управленческих решений в условиях неопределенности/С.А. Самотина, Е.В. Потапова. —Текст: непосредственный // *Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы*. —2011. —№1. —С. 3–4.
14. Sevcenko G. Statybos investicimq sprendime rizikos valdymas: Diss. VGTU leidykla «Technika», 2015, 186 p.
15. Valiris G., Chytas P., Glykas M. «Making decisions using the balanced scorecard and the simple multi-attribute rating technique», *Performance Measurement and Metric*, 2005.
16. Доклад генерального директора — председателя правления открытого акционерного общества «Российские железные дороги» О.В. Белозёрова на расширенном итоговом заседании правления ОАО «РЖД». —Текст: непосредственный // *Железнодорожный транспорт*. —2018. —№1. —С. 4–10.
17. Маловецкая, Е.В. Актуальность применения имитационного моделирования при расчете плана формирования поездов с учетом развития полигонных технологий/ Е.В. Маловецкая. —Текст: непосредственный // *T-Comm — Телекоммуникации и Транспорт*. —2019. Т.12, —№4. —С.48–53. ISSN 2072-8735 (Print). ISSN 2072-8743 (Online). DOI 10.24411/2072-8735-2018-10261.
18. Malovetskaya E.V., Bolshakov R.S., Dimov A.V., Byshlyago A.A. «Planning of qualitative indexes of railroad operational work in polygon technologies» et al 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 760 012041.
19. Синчуков, А.В. Современная классификация математических моделей/ А.В. Синчуков. —Текст: непосредственный // *Инновационная наука*. —2016. —№3-1. —С. 214–215.