



УДК 330.4, 338.2, 519.2

Скалозуб В.В.*доктор технических наук, профессор,
декан факультета технической кибернетики
Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта имени академика Всеволода Лазаряна***Клименко И.В.***ассистент кафедры
компьютерных информационных технологий
Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта имени академика Всеволода Лазаряна*

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ВАГОНПОТОКОВ НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ПРОЦЕДУРЫ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В статье получили развитие методы и процедуры анализа процессов железнодорожного транспорта, представленных антиперсистентными временными рядами (ВР) вагонопотоков. Предложена классификация подобных рядов на основе обобщения последовательных уровней ряда. Приведены примеры классификации ВР, раскрывающие возможности предлагаемой процедуры.

Ключевые слова: показатель Херста, фрактальный анализ, антиперсистентность, прогнозирование временных рядов, классификация, грузовые железнодорожные перевозки.

Скалозуб В.В., Клименко И.В. ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЧАСОВИХ РЯДІВ ВАГОНПОТОКУ НА ОСНОВІ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ПРОЦЕДУРИ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

У статті отримали розвиток методи і процедури аналізу та процесів залізничного транспорту, представлених антиперсистентними часовими рядами. Запропонована класифікація таких рядів на основі узагальнення послідовних рівнів ряду. Наведені приклади класифікації часових рядів, що розкривають можливості запропонованої процедури.

Ключові слова: показник Херста, фрактальний аналіз, антиперсистентність, прогнозування часових рядів, класифікація, вантажні залізничні перевезення.

Skalozub V.V., Klymenko I.V. ESTIMATION AND PREDICTION OF THE PARAMETERS OF TIME SERIES OF TRAFFIC VOLUMES BASED ON THE SPECIALIZED PROCEDURES OF THE FRACTAL ANALYSIS

In this article have developed methods and procedures of analysis of the processes of railway represented by antipersistent time series of traffic volumes. Classification of such series on the basis of generalization of a number of successive levels is presented. Provided the examples of the classification of time series revealing the possibility of the proposed procedure.

Keywords: Hirst indicator, fractal analysis, antipersistent, prediction of time series, classification, freight railroad transportation.

Постановка проблемы. Современный железнодорожный транспорт (ж.д.т.) является чрезвычайно сложной производственной организационно-технической системой, анализ состояния и управления которой в настоящее время практически невозможен в рамках ранее сложившихся традиционных подходов [1; 2]. Распределенность и сложность процессов поездобразования, технологий осуществления процессов грузовых перевозок, функционирования транспортной инфраструктуры и ее объектов (железнодорожные узлы, станции, транспортные коридоры и т. д.) приводят к возникновению событий и ситуаций с принципиально недетерминированными параметрами. Названные и другие факторы обуславливают причины отсутствия общих математических моделей для многочисленных процессов ж.д.т. по расчету экономико-технологических и других показателей. К тому же это исключает возможности работы ж.д.т. в полностью автоматическом режиме [1; 3; 4]. Всесторонний анализ состояний и эффективное управление такой системой с привлечением только классических методов решения сложных задач математического моделирования невозможен. В настоящее время совершенствование управления комплекса ж.д.т. связывается с применением новых методов описания и анализа процессов, внедрением интеллектуальных систем, которые наряду с общепринятыми точными математическими моделями используют представленные в различных формах данные и знания, накопленные в процессе деятельности [3].

В связи со сложностью и недетерминированностью многочисленных процессов ж.д.т. одним из основных способов их описания является представление данных в виде упорядоченных по этапам и интервалам значений некоторых основных измеримых характеристик – формирование временных рядов (ВР). Примерами таких ВР для ж.д.т. являются параметры вагонопотоков различных категорий на полигонах и станциях, оценки затрат различных видов ресурсов по периодам, параметры грузопотоков, последовательности событий процессов эксплуатации и др. Модели и методы анализа и прогнозирования состояний и параметров сложных систем на основе ВР получили признание и широкое распространение, находят новые области применения и формы реализации [12; 13]. Вместе с тем ВР процессов ж.д.т., а также требования к представлению результатов их анализа имеют определенную и важную специфику, которая отличает их от анализа ВР природных процессов, например, солнечной и атмосферной активности, кардиологических, деятельности мозга [14]. Укажем здесь основные из них: во-первых, ВР являются «короткими»; во-вторых, требование результативности, то есть практической «пригодности» процедур для реализации достоверного производственно-технического прогнозирования и планирования основных показателей деятельности, обусловленных ВР. В представленной статье основное внимание уделяется процессам деятельности ж.д.т., представленным антиперсистентными ВР грузовых вагонопотоков (ВР-В) [5].

Анализ последних исследований и публикаций. Многообразные и многочисленные процессы различной природы и происхождения находят свое отображение в форме недетерминированных, случайных, нечетких и других временных рядов [13; 14]. Исследованиям природы, свойств ВР, а также моделям и методам их анализа и прогнозирования посвящены многочисленные работы [2; 5–9]. В последние годы особое внимание уделяется методам хаотической динамики, фрактального анализа [8; 9]. На основе этих методов выполнены исследования широкого круга финансово-экономических, природных и технологических процессов в сложных системах [9; 13]. Исследования свойств ВР некоторых процессов перевозки и обслуживания вагонопотоков ж.д.т. методами фрактального анализа позволили классифицировать их как антиперсистентные. Применение к таким процессам известных методик оценки свойств, анализа и планирования параметров приводит к существенным дополнительным издержкам. В то же время отмечается отсутствие общепризнанных и приемлемых для практики методов и процедур, необходимых для анализа и прогнозирования антиперсистентных ВР. Отмеченные выше факторы являются источником и предметом статьи.

Цель статьи. Многочисленные процессы ж.д.т. могут быть представлены и исследованы как ВР. Установлено методами фрактального анализа, что некоторые ВР-В являются антиперсистентными, по объему данных ВР являются «короткими». В статье представлена специализированная процедура анализа таких ВР-В, основанная на классификации относительно обобщения последовательных уровней. По результатам применения этой процедуры устанавливается класс ВР-В, на основе чего устанавливается объемный показатель, характеризующий возможности построения тренда процесса ВР. В качестве примеров ВР-В использованы вагонопотоки, сформированные для перевозки зерна в порты Украины, а также некоторые модельные ВР, раскрывающие возможности предлагаемой процедуры.

Изложение основного материала исследования. В работе для анализа свойств вагонопотоков в качестве исходных данных использованы ВР наблюдений, представленные на рис. 1 [5], рис. 2, характеризующие количество вагонов, отправляемых в сутки (ВР-В). Представленные ВР имеют сложную хаотическую структуру, отражающую особенности технолого-экономических процессов железнодорожных перевозок. Выявление общих свойств и оценка параметров таких ВР-В дает возможность обоснованного планирования процессов как организации, так и выполнения железнодорожных перевозок, прогнозирования оценок количественных характеристик показателей затрат на переработку вагонопотоков и т. п.



Рис. 1. Динамика отправки вагонов со станции в течение года

Далее для исследования общих свойств ВР-В использованы методы фрактального анализа, вычис-

ления показателя Херста [8–10]. Его значения позволяют установить категорию, классифицировать процессы ВР на персистентные (трендолобность), антиперсистентные (излом тенденции, возвратность), выявить случайный характер процесса. Приведем формулу:

$$H = \frac{\log(R/S)}{\log(a * N)}, \quad (1)$$

где H – показатель Херста, S – среднеквадратическое отклонение ряда наблюдений, R – размах накопленного отклонения, N – число периодов наблюдений, a – заданная константа. В работе С.Б. Кузнецова, О.П. Гладковского, а также в исследовании Э. Наймана [10; 11] было показано, что для «коротких» ВР (соответствуют реальным процессам реализации ж.д. перевозок) лучше использовать величину константы $a = \pi/2$. Такое значение параметра (1) позволяет с большей достоверностью оценивать свойства ВР и утверждать, когда ВР имеет память ($H > 0,5$).

Выполненные исследования ВР-В, характеризующих вагонопотоки на некоторых ж.д. полигонах, показали, что часть из них имеют антиперсистентный характер. Разработанные методы анализа таких ВР-В не позволяют получить приемлемые для нужд практики методики анализа, планирования и управления. В частности, рассчитывать достоверные оценки ожидаемых объемов переработки вагонов на очередном этапе, а также установить значения связанных с этим затрат различных типов ресурсов. Вместе с тем исследование ВР-В, характеризующих перевозки зерна (ВР-З) железнодорожным транспортом, показали, что в большинстве эти процессы являются персистентными. Для их анализа и прогнозирования достаточно применения известных экономико-математических методов и процедур анализа и моделирования.



Рис. 2. Перевозки зерна в течение года

С учетом сказанного в статье предложена специализированная процедура анализа ВР, позволяющая, во-первых, дифференцировать антиперсистентные ВР, относить их к некоторым различным классам (различающимся числом объединенных рядом стоящих уровней, длинами интервалов достоверного планирования), во-вторых, выполнять процедуры прогнозирования значений суммарных объемных показателей модифицированного ряда за установленный интервал (период обобщения данных). Таким образом, в рамках предлагаемой процедуры открывается возможность количественного анализа указанных антиперсистентных ВР-В, но лишь на выявленном при классификации интервале.

Далее предлагается следующая процедура (ПКР) построения классификации ВР путем их преобразования, обобщения и выравнивания расположенных рядом уровней. При этом на основе исходного ВР формируется серия $ВР_i(k)$ новых, $k = 2, 3, 4, 5 \dots$. В серии $ВР_i(k)$ параметр k указывает на количество

последовательно расположенных уровней ряда, которые используются для построения одного очередного уровня преобразованного ряда (как среднего значения уровней k) на этапе анализа i . То есть “ i ” означает номер этапа процедуры ПКР по образованию и исследованию преобразованных $BP_i(k)$ на основе модели (1). На следующем ($i+1$) и последующих этапах процедура ПКР применяется к новым, образованным на предыдущих этапах $BP_i(k)$. Построение серий $BP_i(k)$ прекращается, если для некоторого значения k соответствующий $BP_i(k)$ станет персистентным соответственно (1). В качестве другого, но подобного, условия окончания процедуры ПКР служит выполнение требования на этапе i : $H(BP_i(k)) > H^*(1)$. При выполнении условия остановки серии $BP_i(k)$ для нескольких обобщенных уровней k будем считать, что ВР относится к классу с меньшим k . Особенности реализации условия окончания процедуры ПКР обсуждаются ниже.

К полученным на этапе k модифицированным рядам далее применяем методы корреляционно-регрессионного анализа [6; 7], строим регрессионную модель образованного ВР. Мерой достоверности каждой из построенных является коэффициент детерминации (R^2). Чем он выше, тем более достоверна выбранная модель регрессии.

Рассмотрим примеры применения процедуры ПКР к некоторым ВР-В. На рис. 3–4 представлены модели регрессии для модифицированных ВР-В, образованных путем агрегации 7-ми ($k=7$) и 8-ми ($k=8$) уровней исходного.

Расчеты показывают, что для большинства таких уже персистентных ВР-В можно построить достоверную регрессионную модель для построения оперативного плана работы станции на промежуток времени, который соответствует количеству “ k ” агрегированных уровней начального ВР.

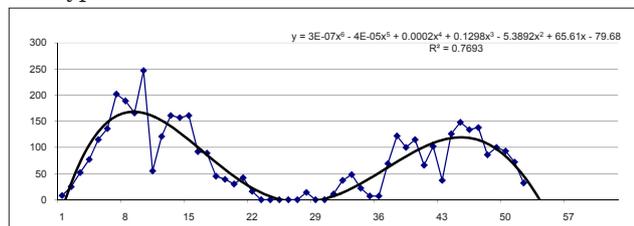


Рис. 3. Модель регрессии для ВР ($k=7$)

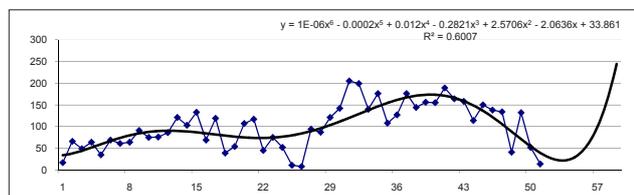


Рис. 4. Модель регрессии для ВР ($k=8$)

Представим другие результаты использования процедуры ПКР на модельном ряде, а затем на исследуемом ВР-В ж.д. вагонопотоков.

При этом в качестве правила классификации, разделения рядов между собой использовано простейшее – меньшее число этапов осреднения “ k ”, требуемых для преобразования исходного ряда наблюдений в персистентный, $H(k) > 0.5$. На рис. 5 представлен исходный модельный временной ряд, фрагмент антиперсистентного ВР вагонопотока по станции. На рис. 6 и 7 приведены модифицированные ВР для различных классов k . Установлено, что ряд рис. 5 отно-

сится к классу $k = 3$. Попытка отнести его к классу $k = 5$ (рис. 8) представляется менее успешной, учитывая значения константы $H(1)$. Из примера ясно, что ВР рис. 5 не относится к классу $k = 2$, поскольку показатель Херста на рис. 6 и после второй итерации остается $H(k=2) < 0.5$.

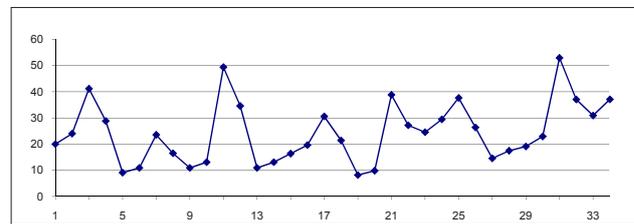


Рис. 5. Модельный ряд данных, $H=0,348$

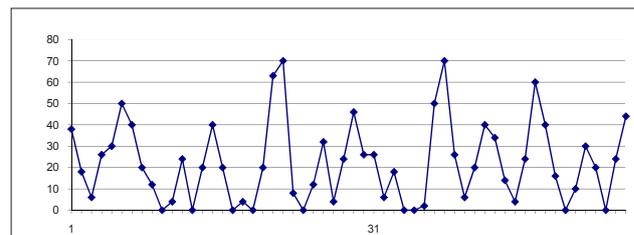


Рис. 6. ВР класса 2, $BP_2(2)$, $H=0,422$

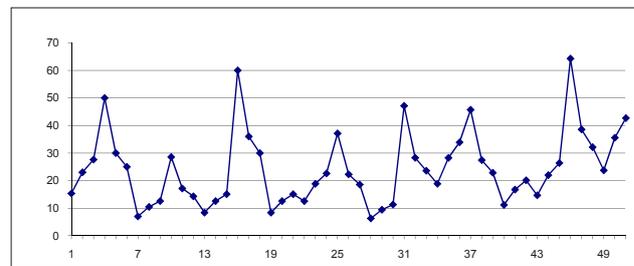


Рис. 7. ВР класса 3, $BP_1(3)$, $H=0,563$

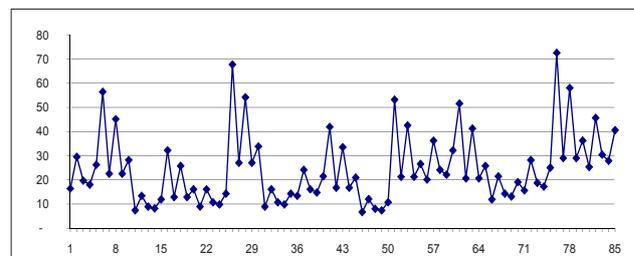


Рис. 8. ВР после применения процедуры, $BP_1(5)$, $H=0,5125$

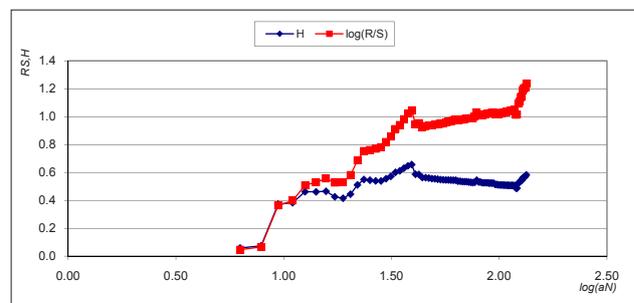


Рис. 9. Изменения показателя H , R/S для каждого последующего уровня, $BP_1(5)$

На рис. 9 представлены параметры процесса исследования ВР рис. 8 на основе модели оценки (1).

Представим результаты применения процедуры обобщения ПКР для анализа некоторых антиперсистентных ВР-В, которые характеризуют перевозки зерна (рис. 10, рис. 11).



Рис. 10. Динамика объемов перевозок зерна по станции в течение месяца

Проведенный анализ позволил установить, что представленный ВР относится к 5-му классу (рис. 11).

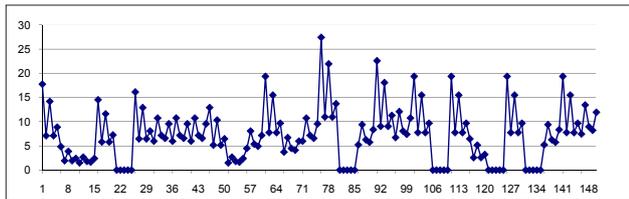


Рис. 11. ВР1(5), N=0,587

Выводы. В статье предложена специализированная процедура ПКР анализа ВР, позволяющая, во-первых, дифференцировать антиперсистентные ВР, отнести их к некоторым различным классам (различающимся числом объединенных рядом стоящих уровней, длинами интервалов достоверного планирования), во-вторых, выполнять процедуры прогнозирования значений суммарных объемных показателей модифицированного ряда за установленный интервал (период обобщения данных). В рамках процедуры ПКР открывается возможность количественного анализа антиперсистентных ВР, но лишь на выявленном при классификации интервале.

По результатам анализа согласно (1) свойствам модифицированных ВР необходимо отметить, что при увеличении интервала обобщения k и (или) i не всегда исходный антиперсистентный ВР систематически переводится в персистентный (рис. 6–8). Это свидетельствует о сохранении «собственных свойств» исследуемого ВР (наличие механизмов порождения недетерминированных процессов в силу процессов поездобразования), которые проявляются при определенных условиях. Рис. 7 и рис. 8 демонстрируют нетривиальность содержания процедуры осреднения интервалов (уровней ряда): ряд класса $k = 3$ (рис. 7) все же в меньшей степени соответствует классу $k = 5$, (рис. 8). В общем случае, видимо, установить принадлежность некоторого временного ряда к определенному классу k с требуемой для практики точностью,

используя указанную процедуру осреднения $ВР_i(k)$, не удастся. Тогда к ним неприменимы выводы относительно существования «интервальной» памяти и возможностей прогнозирования «интервальных объемов» соответствующих ВР показателей.

Вместе с тем сходимость процедуры обобщения уровней обеспечивается, поскольку для нее в пределах выполняется осреднение по всем уровням ряда. Тогда значение интервального показателя заранее фиксировано, оно равно среднему для ряда или сумме уровней ВР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Тишкин Е.М. Информационно-управляющие технологии эксплуатации вагонного парка / Е.М. Тишкин. – М. : Тр. ВНИИАС. – 2004. – Вып. 4. – 184 с.
2. Модели стохастических нестационарных потоков в транспортных сетях / [В.В. Скалозуб, С.Ю. Цейтлин, В.А. Андриященко] // Системні технології. – 2001. – №3. – С. 141–150.
3. Гапанович В.А. Основные направления развития интеллектуального железнодорожного транспорта / В.А. Гапанович, И.Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 4. – С. 5–11.
4. Задачи по эксплуатации вагонных парков на основе автоматизированной системы управления грузовыми перевозками Укрзалізничці / [В.В. Великодний, В.Б. Землянов, И.В. Жуковецкий, В.В. Скалозуб] // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. – № 3. – С. 62–67.
5. Моделирование и прогнозирование процессов на основе обобщенного логистического отображения / [В.В. Скалозуб, В.Е. Белозеров, И.В. Клименко, Б.Б. Белый] // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2013. – № 6 (48). – С. 99–109.
6. Бокс Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс ; пер. с англ. – М. : Мир, 1974. – 604 с.
7. Кендалл М.Дж. Многомерный статистический анализ и временные ряды / М.Дж. Кендалл, А. Стьюарт. – М. : Наука, 1976. – 736 с.
8. Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков. Применение теории Хаоса в инвестициях и экономике / Э. Петерс. – М. : Интернет-трейдинг, 2004. – 304 с.
9. Тимохин В.Н. Методология моделирования экономической динамики : [монография] / В.Н. Тимохин ; научн. ред. Ю.Г. Лысенко. – Донецк : ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – 269 с.
10. Кузнецов С.Б. Фрактальный анализ котировок ВТБ / С.Б. Кузнецов, О.П. Гладковский [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://cprsob.ru/load/14-l-0-53>.
11. Найман Э. Расчет показателя Херста с целью выявления трендовости (персистентности) финансовых рынков / Э. Найман. – 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.capital-times.com.ua/index.php?option=com_content&task=view&id=11623&Itemid=88888963.
12. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем / Н.Г. Ярушкина. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
13. Афанасьева Т.В. Моделирование нечетких тенденций временных рядов / Т.В. Афанасьева. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 215 с.
14. Рекуррентный анализ самоподобных и мультифрактальных временных рядов / [Л.В. Кириченко, А.К. Барановский, Ю.Ю. Кобицкая] // Information Content and Processing : International Journal. – 2016. – Vol. 3, № 1. – P. 16–37.