

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБЪЕМОВ ПЕРЕВОЗОК ПАССАЖИРОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ «СЕРЫХ СИСТЕМ»

Достоверность прогноза пассажиропотока оказывает существенное влияние на систему использования перевозочных ресурсов железнодорожного транспорта и формирование бизнес-стратегии железной дороги. Прогнозирование – это сравнительный анализ ретроспективных данных и сопутствующей информации, а также их обработка с помощью научных математических методов с целью поиска закономерностей в их изменении. В данной статье предложено для прогнозирования пассажиропотока использовать теорию «серых систем», которая обеспечивает поиск приемлемых прогнозных значений в условиях ограниченности ретроспективы. В качестве исходных данных используется пассажиропоток Белорусской железной дороги в период с 2010 по 2019 год. В качестве прогнозных моделей используются традиционная и улучшенная «серые модели», а также производится сравнение точности полученных прогнозных значений.

В 1982 году Дэн Цзюлун (Джулонг) [1] впервые предложил теорию «серых систем», которая продемонстрировала большие возможности для изучения проблем неопределенности в условиях малой выборки, «плохой информации», высокой неопределенности и недостатка данных. Теория «серых систем» основывается на теории информации, кибернетической теории и математических методов решения неполных и неопределенных проблем. Теория серых систем фокусируется на системах с «плохой информацией», с «частичной информацией известной, частичной неизвестной информацией» [2]. Данная теория изучает и прогнозирует неизвестную область путем извлечения ценной информации из известных данных [3]. В течение последних лет теория серых систем быстро развивалась и привлекла внимание многих исследователей. Она широко и успешно применяется во многих областях, таких как социальные, научно-технические, геологические и медицинские системы [4, 5]. Предлагается использовать данный математический аппарат для прогнозирования пассажиропотоков в условиях влияния внешних факторов на спрос транспортных услуг.

1 Модель GM (1,1)

Модель GM (Grey Model) – это дифференциальное уравнение «серой модели» прогнозирования. Модель дифференциального уравнения первого порядка с N переменными может быть представлена как GM (1, N). Таким же образом модель дифференциального уравнения с одной переменной первого порядка представляется как GM (1, 1). Модель GM (1, 1) является самой простой и основной моделью серого прогнозирования.

Ниже приводится обобщенное описание процедуры построения модели GM (1, 1).

Шаг 1. Предварительная обработка исходных данных.

Требуется оценить возможность применения прогнозной модели GM (1, 1) к имеющейся последовательности. Вначале необходимо проанализировать исходные данные. Пусть переменная $x^{(0)}$ будет неотрицательной исходной последовательностью данных:

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3) \dots x^{(0)}(n)\}. \quad (1)$$

Рассчитаем параметры статистического ряда и проверим гладкость ряда данных:

$$\beta(k) = \frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)}, k = 3, 4, \dots, n. \quad (2)$$

Если все коэффициенты связности находятся в диапазоне (e^{-2n+1}, e^{2n+1}) , исходные данные соответствуют модели GM (1, 1) и пригодны для использования в прогнозировании. В противном случае последовательность данных должна быть предварительно обработана. В настоящее время обычно используются следующие методы предварительной обработки данных: метод наименьших квадратов, логарифмирование и сглаживание данных.

После предварительной обработки исходные данные накапливаются и генерируются для получения новой последовательности данных:

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3) \dots, x^{(1)}(n)\}, \quad (3)$$

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, 3 \dots n. \quad (4)$$

Затем проверяется, подчиняется ли последовательность $x^{(1)}$ квазиэкспоненциальному закону:

$$\sigma^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k)}{x^{(1)}(k-1)}, k = 3, 4, \dots, n. \quad (5)$$

Если существует $\sigma^{(1)}(k) \in [1, 1 + \delta]$ где δ обычно 0,5, то последовательность $x^{(1)}$ удовлетворяет экспоненциальному закону распределения. В противном случае выборка должна быть расширена.

Шаг 2. Составление дифференциального уравнения.

После операции дополнения выборки вновь сгенерированная последовательность $x^{(1)}$ приблизительно подчиняется экспоненциальному закону распределения, а решение дифференциального уравнения первого порядка имеет форму экспоненциального распределения. Можно предположить, что последовательность $x^{(1)}$ удовлетворяет условиям линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dx^{(1)}}{dx} + ax^{(1)} = u. \quad (6)$$

где a – коэффициент регрессии, отражающий тенденцию изменения исходных данных $x^{(0)}$ и новую последовательность данных $x^{(1)}$, которая является параметром разработки модели; u – коэффициент согласованности, отражающий взаимосвязь между данными модели.

Шаг 3. Расчет параметров a и u построение дифференциального уравнения.

Согласно определению производной

$$\frac{dx^{(1)}}{dx} = \lim_{\Delta t} \frac{x^{(1)}(t + \Delta t) - x^{(1)}(t)}{\Delta t}. \quad (7)$$

Тогда дифференциальное уравнение модели GM (1, 1) будет иметь вид

$$x^{(0)}(k) = -aZ^{(1)}(k) + u, \quad (8)$$

где $Z^{(1)}$ – это сгенерированная последовательность, непосредственно смежная с последовательностью $x^{(1)}$,

$$Z^{(1)}(k) = 0,5[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)], \quad k = 2, 3, \dots \quad (9)$$

В результате получаем матрицу следующего вида:

$$\begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \dots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -Z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Y_n = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T \quad (11)$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & 1 \\ -Z^{(1)}(3) & 1 \\ \dots & \dots \\ -Z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (13)$$

Оценка \hat{a} методом наименьших квадратов:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n. \quad (14)$$

Шаг 4. *Формирование модели прогнозирования.*

Подставляя полученные параметры a и u в уравнение (6), получаем

$$\tilde{x}^{(0)}(t) = \left[\hat{x}^{(1)} - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (15)$$

Уравнение (15) называется моделью функции времени отклика GM (1, 1). После сокращения вспомогательных значений и восстановления исходного состояния выборки (то есть удаления сгенерированных на первом шаге дополнительных данных), модель прогнозирования исходной последовательности $x^{(0)}$ может быть представлена как

$$\begin{aligned} \tilde{x}^{(0)}(k+t) &= x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) = \\ &= (e^{-a} - 1) \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak}. \end{aligned} \quad (16)$$

Модель прогнозирования GM (1, 1) представляет собой сглаженную экспоненциальную кривую, которая снижает неопределенность исходных данных.

2 Оптимизация «серой модели» GM (1, 1)

Пусть исходная последовательность данных является строгой экспоненциальной последовательностью:

$$x^{(0)}(k) = M e^{-\eta(k-1)}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (17)$$

Сгенерированная последовательность

$$x^{(1)}(k) = M \frac{1 - e^{\eta k}}{1 - e^\eta}, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (18)$$

Используя традиционный метод прогнозирования, можно получить модель GM (1, 1) вида

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} M^2 \frac{-e^\eta - e^{2\eta}}{1 - e^\eta} & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2} M^2 \frac{-e^{2\eta} - e^{3\eta}}{1 - e^\eta} & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2} M^2 \frac{-e^{(\eta-1)\eta} - e^{\eta n}}{1 - e^\eta} & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$Y_n = \begin{bmatrix} M e^\eta \\ M e^\eta \\ \dots \\ M e^{(\eta-1)\eta} \end{bmatrix} \quad (20)$$

В результате получаем

$$\begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n = \begin{bmatrix} \frac{2(1 - e^\eta)}{1 + e^\eta} \\ \frac{2M}{1 + e^\eta} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Тогда прогнозное значение можно получить из выражений

$$\hat{x}^{(0)}(1) = M; \quad (22)$$

$$\tilde{x}^{(0)}(k) = \frac{-M e^\eta (1 - e^a)}{1 - e^\eta} e^{-a(k-1)}, \quad k = 2, 3, \dots, n. \quad (23)$$

Сравнивая формулы (22) и (18), видим, что различия между формулами выражаются в виде смещения. Поэтому традиционная модель GM (1, 1) смещена при моделировании экспоненциальных рядов.

Создание улучшенной прогнозной модели GM (1, 1) выполняется следующим образом.

Согласно уравнению (21)

$$\eta = \ln \frac{2-a}{2+a}, \quad M = \frac{2u}{2+a}, \quad (24)$$

т. е. параметры a , u традиционной модели GM (1, 1) могут использоваться для представления параметров η , M исходной последовательности, где

$$a' = \ln \frac{2-a}{2+a}, \quad M' = \frac{2u}{2+a}. \quad (25)$$

Тогда $a' = \eta$, $M' = M$.

Исходя из этого при построении улучшенной модели GM (1, 1) шаги с 1-го по 3-й относятся к шагам с 1-го по 3-й традиционной модели GM (1, 1).

Шаг 4. *Определение параметров несмещенной модели GM (1, 1).*

$$a' = \ln \frac{2-a}{2+a}, \quad M' = \frac{2u}{2+a}.$$

Шаг 5. *Создание исходной модели последовательности данных.*

$$\hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1); \quad (26)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k) = M' e^{a'(k-1)}, \quad k = 2, 3, \dots, n. \quad (27)$$

По сравнению с традиционной моделью GM (1, 1) улучшенная модель GM (1, 1) в основном устраняет неотъемлемые отклонения от традиционной модели GM (1, 1), а диапазон ее применения шире, чем у традиционной модели GM (1, 1). Кроме того, улучшенная модель GM (1, 1) не требует кумулятивного сокращения, что упрощает этапы моделирования и увеличивает скорость расчета модели [6]. Однако улучшенная модель прогнозирования GM (1, 1) может предсказать тенденцию изменения параметров по приближенному к экспоненциальному закону распределения и не может предсказать неопределенность данных. В связи с этим предлагаемый метод прогнозирования в последующем может развиваться и дополняться.

3 Прогнозирование пассажиропотоков с использованием модели GM (1, 1)

3.1 Традиционная модель GM (1, 1) прогнозирования пассажиропотока

Модель прогнозирования GM (1, 1) позволяет получать относительно точные результаты на основании небольшого количества ретроспективных данных. По сравнению с методом статистического регрессионного анализа преимущество модели прогнозирования GM (1, 1) заключается в том, что она может решить проблему моделирования небольших выборок и коротких последовательностей без необходимости больших выборок статистических данных, что характерно для систем прогнозирования пассажиропотоков в транспортных системах. На железнодорожный пассажиропоток влияет множество различных факторов, таких как экономика, погодные условия, эпидемиологическая обстановка и др. Всё множество влияющих факторов можно представить как подмножества определенных и неопределенных факторов, а их совокупность можно рассматривать как «серую систему».

В этой статье в качестве анализируемых данных используется пассажиропоток, млн пас·км, перевезенный Белорусской железной дорогой в период с 2010 по 2019 год (таблица 1) [7].

Таблица 1 – Фактический объем пассажиропотока Белорусской железной дороги с 2010 по 2019 г.

Вид транспорта	Год									
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Железнодорожный	7578	7941	8977	8998	7796	7117	6428	6295	6215	6277

Вначале проверим беспристрастность модели GM (1, 1), т. е. возможность ее использования для получения прогнозных значений. В результате анализа данных таблицы 1 установлено, что общий тренд изменения является нисходящим с очевидной неустойчивостью, что соответствует общим характеристикам исходных данных «серой модели» прогнозирования.

Модель GM (1, 1) представляет собой линейную модель первого порядка с одной переменной. Тогда изменение пассажиропотока представим как функцию изменения количества перевезенных пассажиров от времени. Факторы, влияющие на мощность пассажиропотока, являются сложно формализуемыми, при этом многие факторы динамично изменяются. Тогда представим пассажиропоток как «серую величину», которая зависит как от известных, так и от неизвестных факторов. Установим для них модель GM (1, 1).

В соответствии с формулой (1) на основании таблицы 1 формализуем неотрицательную исходную последовательность данных:

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(9), x^{(0)}(10)\} = \{7578, 7941, 8977, 8998, 7796, 7117, 6428, 6295, 6215, 6277\}.$$

Для исходной последовательности $x^{(0)}$ формуле (2) проверим гладкость анализируемого ряда данных (таблица 2).

Таблица 2 – Значения коэффициентов гладкости данных

k	$\beta(k)$	k	$\beta(k)$
3	0,95428787	7	1,09540537
4	0,88459396	8	1,10718731
5	0,99766615	9	1,02112788
6	1,15418163	10	1,01287208

Так как все соотношения находятся в диапазоне $(e^{-2/n+1}, e^{2/n+1}) = (0,857403919, 1,16631144)$, исходные данные соответствуют модели GM (1, 1) и пригодны для прогнозирования.

Расширим исходную последовательность $x^{(0)}$ путем объединения со сгенерированной последовательностью $x^{(1)}$ (см. формулу (3)).

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(9)\} = \{7578, 15519, 24496, 33494, 41290, 48407, 54835, 61130, 67345\}.$$

Согласно формуле (5) проверим, подчиняется ли последовательность $x^{(1)}$ квазиэкспоненциальному закону распределения. Тестовое значение экспоненциального закона распределения представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Тестовые значения экспоненциального закона распределения

K	$\sigma^{(1)}(k)$	K	$\sigma^{(1)}(k)$
3	1,5784522	7	1,1327907
4	1,3673253	8	1,1147989
5	1,2327581	9	1,1016686
6	1,1723662	10	1,0932066

Из таблицы 3 видно, что при $k > 3$ $\sigma^{(1)}(k) \in [1, 1,15]$. Следовательно, выборка удовлетворяет экспоненциальному закону распределения, а модель GM (1, 1) является установленной.

Составим дифференциальное уравнение GM (1, 1) для $x^{(1)}$ (см. формулу (6)) и сгенерируем последовательности $x^{(1)}$ и $Z^{(1)}$ (см. формулу (9)).

$$Z^{(1)} = \{Z^{(1)}(2) + Z^{(1)}(3) + \dots + Z^{(1)}(9)\} = \{11548,5, 20007,5, 28995, 37392, 44848,5, 51621, 57982,5, 64237,5, 70483,5\}.$$

Согласно формуле (7) установим дифференциальное уравнение GM (1, 1) и получим следующую матрицу:

$$\begin{bmatrix} 7941 \\ 8977 \\ 8998 \\ 7796 \\ 7117 \\ 6428 \\ 6295 \\ 6215 \\ 6277 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -11548,5 & 1 \\ -20007,5 & 1 \\ -28995 & 1 \\ -37392 & 1 \\ -44848,5 & 1 \\ -51621 & 1 \\ -57982,5 & 1 \\ -64237,5 & 1 \\ -70483,5 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}$$

$$Y_n = [7941, 8977, 8998, 7796, 7117, 6428, 6295, 6215, 6277]^T.$$

Оценка \hat{a} методом наименьших квадратов (см. формулу (14)) составит:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_n = \begin{bmatrix} 0,048972173855 \\ 9444,656894877554 \end{bmatrix}.$$

В результате получаем коэффициент регрессии $a = 0,048972173855$ и коэффициент согласованности $u = 9444,656894877554$.

Подставим коэффициенты a, u в формулу (23):

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (e^{-0,048972173855} - 1) \left[7578 - \frac{9,44465689477554}{0,048972173855} \right] e^{-0,048972173855k} = 8854952967e^{-0,048972173855k}.$$

В результате расчетов на основании модели GM (1, 1) получены прогнозные значения пассажиропотока, млн пас·км, на период с 2010 по 2019 год (таблица 4).

Таблица 4 – Прогнозируемые значения по традиционной прогнозной модели GM (1, 1)

Год	Исходный пассажиропоток	Прогнозные значения пассажиропотока
2010	7578	8432
2011	7941	8029
2012	8977	7645
2013	8998	7280
2014	7796	6932
2015	7117	6600
2016	6428	6285
2017	6295	5985
2018	6215	5699
2019	6277	5426

В результате сравнительного анализа установлено, что прогнозные данные, полученные на основании традиционной модели GM (1, 1), достаточно схожи с исходной выборкой, однако в отдельные годы (2012–2014) имеются расхождения в значениях свыше 20 %.

На основании традиционной модели GM (1, 1) сформирован прогноз изменения пассажиропотока, млн пас·км на период с 2021 по 2030 год (таблица 5).

Таблица 5 – Прогнозируемые значения пассажиропотока по традиционной модели GM (1, 1) на период 2021–2030 гг.

Год	Величина прогноза пассажиропотока железнодорожного транспорта
2021	4920
2022	4685
2023	4461
2024	4248
2025	4045
2026	3851
2027	3667
2028	3492
2029	3325
2030	3166

3.2 Улучшенная модель GM (1, 1) прогнозирования пассажиропотока

Для повышения качества прогнозирования, при использовании теоретических основ, описанных в п. 2 данной статьи, разработана улучшенная модель прогнозирования пассажиропотока.

Используя полученные ранее коэффициенты регрессии $a = 0,048972173855$ и согласования $u = 9444,656894877554$ традиционной модели GM (1, 1), на основании формулы (25) определяются параметры улучшенной модели:

$$a' = \ln \frac{2-a}{2+a} = -0,048981965; M' = \frac{2u}{2+a} = 9218,92158.$$

Используя формулы (26), (27) разработали улучшенную модель GM (1, 1):

$$\hat{x}^{(0)}(k) \begin{cases} 7578, k = 1 \\ 9218,92158e^{-0,048981965(k-1)}, k = 2, 3, 4, 5, 6, \dots 9. \end{cases}$$

Исходя из этого получены результаты прогнозирования улучшенной модели GM (1, 1), млн пас·км, которые представлены в таблице 6. Сравнительный анализ прогнозных значений пассажиропотока по тради-

ционной и улучшенной моделям GM (1, 1) с исходными данными приведен на рисунке 1.

Таблица 6 – Прогнозируемые значения по улучшенной прогнозной модели GM (1, 1)

Год	Исходный пассажиропоток	Прогнозные значения пассажиропотока
2010	7578	8432
2011	7941	8029
2012	8977	7645
2013	8998	7280
2014	7796	6932
2015	7117	6600
2016	6428	6285
2017	6295	5985
2018	6215	5699
2019	6277	5426

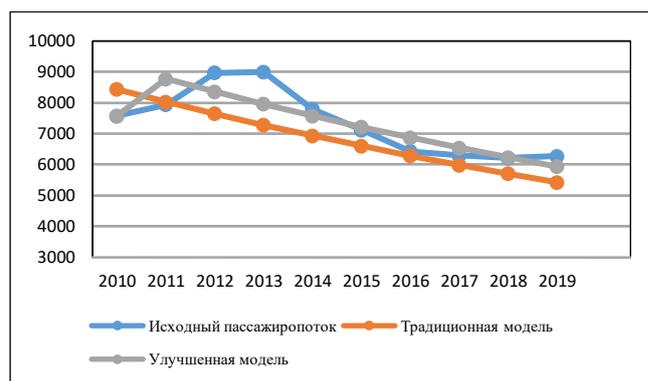


Рисунок 1 – Сравнение прогнозных значений пассажиропотока по традиционной и улучшенной моделям GM (1, 1) с исходными данными

В результате сравнительного анализа установлено, что прогнозные данные, полученные на основании улучшенной модели GM (1, 1), имеют более близкие значения к исходным данным по сравнению с традиционной моделью.

На основании улучшенной модели GM (1, 1) разработан прогноз изменения пассажиропотока на период с 2022 по 2025 год (таблица 7).

Таблица 7 – Прогнозируемые значения пассажиропотока по традиционной и улучшенной моделям GM (1, 1) на период с 2022 по 2025 год

Год	Прогнозные значения пассажиропотока по традиционной модели	Прогнозные значения пассажиропотока по улучшенной модели
2022	4685	5122
2023	4461	4877
2024	4248	4644
2025	4045	4422

3.3 Прогнозирование пассажиропотока между станциями Белорусской железной дороги и Москвой

Модели GM (1, 1) могут применяться для прогнозирования параметров на основании выборок меньшей величины. При этом величина прогнозного периода не должна превышать величины ретроспективного.

В данной работе выполнено прогнозирование пассажиропотока между станциями Белорусской железной дороги и станциями Московского узла. Так как объем архивных данных с необходимой детализацией ограничен, в качестве исходных данных приняты значения пассажиропотока за период с 2016 по 2019 год.

На основании приведенных выше формул выполнен прогноз по традиционной и улучшенной GM (1, 1) моделям, млн пас·км (таблица 8).

Таблица 8 – Прогнозируемые значения пассажиропотока по традиционной и улучшенной моделям GM (1, 1) на период с 2016 по 2019 год между станциями Белорусской железной дороги и Московского железнодорожного узла

Год	Исходный пассажиропоток	Прогнозные значения пассажиропотока по традиционной модели	Прогнозные значения пассажиропотока по улучшенной модели
2016	1245	1254	1245
2017	1265	1275	1264
2018	1269	1295	1285
2019	1281	1316	1306

Можно сделать вывод, что наблюдается тенденция к росту размера пассажиропотока. При этом результаты прогнозирования по моделям GM (1, 1) имеют аналогичный GM (1, 1) тренд.

Выполним расчет параметров модели

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(4)\} = \{1245, 1265, 1269, 1281\}.$$

Выполним проверку гладкости исходной последовательности $x^{(0)}$: $\beta(k3) = 0,99655$, $\beta(k4) = 0,99072$. Диапазон проверки гладкости составляет $(0,67032 \sim 1,49182)$, т. е. все значения в пределах допустимого диапазона. Таким образом, нет необходимости в предварительной обработке исходных данных.

$$x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(4)\} = \{1245, 2509, 2534, 2550\}.$$

При проверке установлено, что полученные результаты подчиняются экспоненциальному закону и модель GM (1, 1) может быть установлена.

Тогда сгенерированная последовательность

$$Z^{(1)} = \{Z^{(1)}(2) + Z^{(1)}(3) + \dots + Z^{(1)}(4)\} = \{1877, 2521, 2542\}.$$

Построим матрицу:

$$\begin{bmatrix} 1265 \\ 1269 \\ 1281 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1876992,5 & 1 \\ -2521315,5 & 1 \\ -2541510 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -1876992,5 & 1 \\ -2521315,5 & 1 \\ -2541510 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Y_n = [1264507, 1268878, 1280757]^T.$$

Получаем: $a = -0,01616373$, $u = 1233989,55102334$.

Аналогичным образом установлены параметры улучшенной модели: $a' = \ln(2 - a) / (2 + a) = 0,016164082$, $M' = 2u / (2 + a) = 1244043,745$.

Результаты прогнозирования на период с 2022 по 2025 год приведены в таблице 9.

В результате прогнозирования установлено, что рост пассажиропотока между станциями Белорусской железной дороги и Москвой по обеим моделям к 2025 году составит 10–15 % при отсутствии существенных неформализованных позитивных и негативных факторов. К негативным факторам, которые могут привести к уменьшению пассажиропотока, относится продление карантинных мероприятий в государствах на продолжительный период. Позитивными факторами могут стать повышение скоростей движения поездов между станциями

Получено 25.03.2021

Wang Yubian. Forecasting the volumes of transportation of passengers based on gray systems theory.

The reliability of the forecast of passenger traffic has a significant impact on the system of using the transportation resources of railway transport and the formation of the business strategy of the railway. Forecasting is a comparative analysis of retrospective data and related information, as well as their processing using scientific mathematical methods in order to find patterns in their change. In this article, it is proposed to use the theory of "gray systems" to predict passenger traffic, which provides a search for acceptable forecast values under conditions of limited retrospective. The passenger traffic that was transported by the Belarusian Railway in the period from 2010 to 2019 is used as the initial data. Traditional and improved gray models are used as predictive models, and the accuracy of the obtained predicted values is compared.

Белорусской железной дороги и Москвой, а также переход к тактовому движению поездов.

Таблица 9 – Прогнозируемые значения пассажиропотока по традиционной и улучшенной моделям GM (1, 1) на период с 2022 по 2025 год между станциями Белорусской железной дороги и Московского железнодорожного узла

Год	Величина прогноза пассажиропотока железнодорожного транспорта	Улучшенная объективная модель GM (1, 1) для прогнозирования пассажиропотока на железнодорожном транспорте
2022	1382	1371
2023	1404	1393
2024	1427	1416
2025	1450	1439

Вывод. В статье предложена методика прогнозирования пассажиропотока с использованием традиционной и улучшенной моделей GM (1, 1). Однако сравнивая прогнозные значения с фактическими, можно заметить значительные отклонения, что приводит, в отдельных случаях, к значительным погрешностям вычислений. Кроме того, GM (1, 1) не позволяют прогнозировать в условиях значительного влияния внешних факторов на объем перевозочной работы.

Таким образом, модели прогнозирования GM (1, 1) могут ограниченно применяться при стабильном состоянии внешней среды. Для учета влияния внешних факторов модели GM (1, 1) нуждаются в улучшении.

Список литературы

- 1 **Deng, J. L.** Introduction to grey system theory / J. L. Deng // J Grey System. – 1989; 1:1–24.
- 2 **Bindhu, B. K.** Application of grey system theory on the influencing parameters of aerobic granulation in SBR / B. K. Bindhu, G. Madhu // Environ Technol. – 2017. – Sep; 38(17):2143–2152.
- 3 **iPhos-PseEvo: Identifying Human Phosphorylated Proteins by Incorporating Evolutionary Information into General PseAAC via Grey System Theory / W. R. Qiu [et al.] // Mol Inform. – 2017 May; 36(5–6).**
- 4 **Wang, C. N.** Integrated DEA models and grey system theory to evaluate past-to-future performance: a case of Indian electricity industry / C. N. Wang, N. T. Nguyen, T. T. Tran // Scientific World Journal. – 2015; 638710.
- 5 **Mahmod, W. E.** Modified Grey Model and its application to groundwater flow analysis with limited hydrogeological data: a case study of the Nubian Sandstone / W. E. Mahmod, K. Watanabe // Kharga Oasis, Egypt. Environ Monit Assess. – 2014 Feb; 186(2):1063–81.
- 6 **Zhao, X.** Based on Gray Prediction Model GM (1, 1), Research on Forecasting Overseas Talents / X. Zhao, D. Li // Ocean Development and Management. – 2010. – Vol. 27. – P. 036–038. 2010.
- 7 **Транспорт. Ч. 1. Пассажирооборот. За 1990–2019 гг. // Нац. стат. комитет Респ. Беларусь [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – Режим доступа : <http://belstat.gov.by>. – Дата доступа : 20.02.2021.**