

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ**

УДК 629.463.001.18

*В. И. СЕНЬКО, доктор технических наук, профессор, Е. П. ГУРСКИЙ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ,  
ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЧИСЛЕННОСТЬ ВАГОННОГО ПАРКА**

Рассмотрена актуальность и практическая значимость данной проблемы. Показаны количественные и качественные характеристики вагонного парка. Проведен анализ существующих методик по определению необходимого вагонного парка и показана необходимость учета многопараметрического, корреляционного характера процесса его формирования. Проведен отбор факторов, определены и исследованы показатели, с помощью которых устанавливается их влияние на структуру парка грузовых вагонов. Дана классификация факторов по значимости их влияния. Разработана математическая модель долгосрочного прогноза количественных характеристик вагонного парка и получены расчетные значения численности подвижного состава на заданный горизонт прогнозирования. Результаты исследования были учтены и использованы при разработке бизнес-плана Белорусской железной дороги, реализация которого позволит повысить эффективность использования грузового подвижного состава и всей инфраструктуры, обеспечивающей его функционирование.

**В** настоящее время железнодорожный транспорт, обеспечивая перевозки грузов и пассажиров, работает в сложных экономических условиях. Поэтому поиск оптимальных решений в различных отраслях его деятельности приобретает первостепенное значение. Без широкого и корректного применения современных экономико-математических методов невозможно. Не представляется сегодня возможным и принятие обоснованных решений в вопросах оздоровления и обновления подвижного состава без разработки долгосрочных прогнозов в его потребности. Основой таких прогнозов является научно обоснованная оценка перспективного уровня величины вагонного парка для устойчивой и эффективной работы железной дороги на основе применения современных методов прогнозирования. Для решения возникшей проблемы по заданию Белорусской железной дороги была проведена научно-исследовательская работа по обоснованию прогнозных значений численности вагонного парка дороги.

В первую очередь выполнена количественная и качественная оценка имеющегося в распоряжении Белорусской железной дороги парка грузовых вагонов, а также проведен анализ исследований по определению прогнозных показателей использования вагонного парка. Анализ показал, что характерным для вагонного хозяйства Белорусской железной дороги является старение подвижного состава (таблица 1). При разделении вагонного парка бывшего МПС СССР между железнодорожными администрациями (1992 г.) средний возраст грузовых вагонов составлял 15,3 года, на 2008 г. этот показатель составил 24 года [1]. С момента разделения вагонный парк сократился приблизительно на 27 %, в то время как объемы перевозок на сегодняшний день превысили уровень 1992 г.

В этих условиях проявился острый дефицит подвижного состава, в первую очередь цистерн, полувагонов, хоппер-цементовозов, вагонов для перевозки калийных и азотных удобрений, технической соли и других агрессивных грузов.

Таблица 1 – Характеристика инвентарного парка Белорусской железной дороги

Род вагонов	Средний возраст вагонов, лет	Срок службы вагонов, лет	Процент износа вагонов	Процент вагонов с истекшим сроком службы
Крытые	28	32	87,5	33,6
Платформы	29	32	90,6	42,3
Полувагоны	17	22	77,3	40,2
Цистерны	26	32	81,3	40,0
Прочие	25	26	96,2	48,9
ВСЕГО	24	28	78,8	41,0

Отсутствие систематического пополнения парка новыми вагонами в Республике Беларусь привело к росту эксплуатационных и ремонтных затрат на

восстановление его работоспособности, к увеличению количества отцепок в текущий ремонт и, как следствие, к снижению безопасности движения.

Проблема обеспечения перевозочного процесса надежными грузовыми вагонами является следствием объективных законов развития экономики стран СНГ и, в частности, условий работы железных дорог, которые функционируют в режиме ограниченного финансирования. Уже сегодня необходимо вложение значительных инвестиций (практически 56 % от общей стоимости парка) в обновление подвижного состава [1]. Но инвестиционная программа должна базироваться на научно обоснованных прогнозах потребности и эффективности использования вагонного парка. Очевидно, что эта задача чрезвычайно сложна, для ее решения нужен тщательный технико-эксплуатационный анализ и на его основе – прогноз потребности в грузовых вагонах. Целесообразно использовать селективные алгоритмы и построенные на их основе прогнозные модели оптимальной сложности.

Существующие математические методы исследования эффективности работы вагонных парков показали, что величина рабочего парка определяется в основном сочетанием двух различных показателей: в первом случае – оборотом вагона и работой дороги; во втором – затратами вагоно-часов в движении, под грузовыми операциями и на технических станциях, в третьем – грузооборотом железной дороги и производительностью вагона, в четвертом – общим и среднесуточным пробегам подвижного состава [2]. Проведенный анализ исследований существующих методик расчета рабочего парка показал ограниченную сферу их использования вследствие того, что применяемые модели не позволяют учесть многообразие и неопределенность влияющих на вагонный парк параметров, что приводит к значительным ошибкам при определении его перспективных значений и необоснованным затратам на содержание «лишнего» парка, а также к упущению прибыли от невыполненных объемов перевозок при «нехватке» вагонов. Очевидно, что функционирование транспортной системы определяется различными факторами, а эксплуатационные процессы носят вероятностный, корреляционный, а не однозначно детерминированный характер. Однако из множества воздействующих на систему показателей лишь небольшая их часть является доминирующей и достаточной для получения достоверного прогноза [3]. Поэтому очень ответственным этапом прогнозирования является отбор факторов и определение круга показателей, с помощью которых устанавливается их влияние на исследуемый признак.

Для определения ряда факторов, характеризующих величину парка грузовых вагонов, использован индивидуальный и коллективный экспертные методы оценки. Важным моментом при формировании массива данных является установление длины ретроспективного ряда. Она должна

быть такой, чтобы до минимума свести влияние «шума», вызванного данными начального периода ряда. При этом не должен быть искажен физический процесс рассматриваемого явления. При таком подходе повышается «вес» информации последних данных временного ряда. В качестве примера на рисунке 1 показан характер изменения грузооборота железной дороги за последние 16 лет. Из графика видно, что прогнозные значения сильно зависят от выбранного базисного года.

Установление оптимальной длины ряда ретроспекции возможно с использованием корреляционного анализа временных рядов. В ходе анализа длина ретроспективного ряда изменялась от 41 до 10 лет с интервалом один год. Выполненные исследования свидетельствуют, что рациональной протяженностью ретроспективного ряда для исследования показателей использования вагонного парка является 10–20 лет [2].

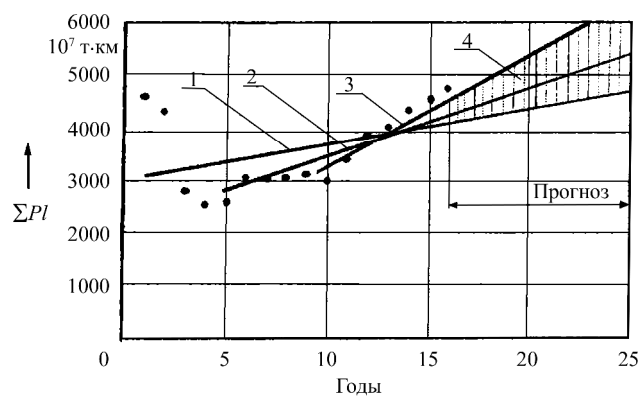


Рисунок 1 – Зависимость прогноза грузооборота железной дороги от номера базисного года:  
1 – прогноз, соответствующий 1-му базисному году; 2 – то же, 5-му;  
3 – то же, 10-му; 4 – зона возможных значений прогноза при изменении базисного года

Аналізу была подвергнута динамика изменения парка грузовых вагонов, начиная с 1993 года. В ходе анализа мнений экспертов были выделены семнадцать наиболее важных показателей работы вагонных парков: грузооборот –  $x_1$ , млн т·км; пассажирооборот –  $x_2$ , млн пас·км; участковая скорость –  $x_3$ , км/ч; техническая скорость –  $x_4$ , км/ч; масса поезда –  $x_5$ , т; оборот вагона –  $x_6$ , сут; среднесуточный пробег –  $x_7$ , км; статическая нагрузка –  $x_8$ , т; погрузка –  $x_9$ , млн т; объем вывоза грузов –  $x_{10}$ , млн т·км; коэффициент местной работы –  $x_{11}$ ; коэффициент порожнего пробега –  $x_{12}$ , среднесуточная производительность вагона –  $x_{13}$ , т·км; динамическая нагрузка –  $x_{14}$ , т; работа дороги –  $x_{15}$ , ваг/сут; простой вагона под грузовой операцией –  $x_{16}$ , ч; простой вагона на технической станции –  $x_{17}$ , ч, и за исследуемый период был собран аналитический материал.

Для статистических оценок исследования кор-

реляционных зависимостей и решения других задач рассмотрена модель  $y = f(x_i)$ . Проанализированы линейная, экспоненциальная и степенная зависимости. Оптимальный вариант модели выбран по критерию остаточной дисперсии. Оценка степени влияния входящих в модель факторов и тесноты связи произведена соответственно по коэффициенту детерминации и корреляции. По каждому из 17 факторов установлены регрессионная и корреляционная взаимосвязи с величиной парка грузовых вагонов.

Анализ полученных результатов позволил ответить на ряд весьма важных вопросов, в частности, какой вид зависимости из трех исследуемых для функции  $y = f(x_i)$  является предпочтительным (по минимуму остаточной дисперсии). Например, были получены зависимости численности парка грузовых вагонов от грузооборота. Наименьшие отклонения расчетных значений численности вагонного парка от фактических значений имеет линейная зависимость (рисунок 2). Она характеризуется достаточно высоким уровнем важнейшего показателя при анализе регрессионных зависимостей – коэффициентами корреляции  $r(x_1, N_p) = 0,89$  и детерминации  $R^2 = 0,70$ . Исследованы также зависимости влияния и остальных факторов, входящих в модель. Подобные модели на начальном этапе позволяют исследователям при заданном значении каждого из семнадцати факторов получить значение рабочего парка вагонов.

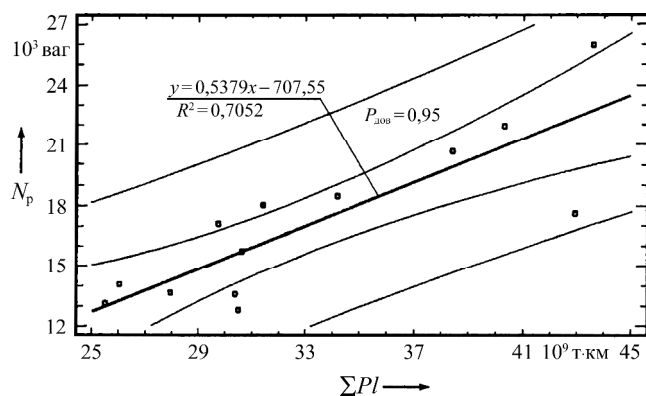


Рисунок 2 – Динамика изменения численности вагонного парка в зависимости от грузооборота

Для оценки значимости каждого из факторов рассчитаны производные  $dN_p/dx$  по полученным аппроксимирующим зависимостям. В таблице 2 приведены результаты расчетов. При этом произведение полученного  $i$ -го углового коэффициента  $K$  на прирост  $i$ -го фактора  $\Delta x_i$  будет определять величину изменения исследуемой величины  $\Delta y$ .

Наличие таких характеристик по каждой из семнадцати зависимостей позволило сделать предварительный анализ учета влияния факторов, на величину парка грузовых вагонов. Например, из анализа результатов расчетов видно, что наибольшее влияние на формирование парка по критерию  $dN_p/dx$  оказывают следующие факторы: грузооборот, производительность, работа дороги, среднесуточный пробег и т. д.

Таблица 2 – Результаты расчетов производных

Фактор	$K$	$\Delta x_i$	$\Delta y$
$x_1$	0,53	3283	1740
$x_2$	-0,01	1612	18
$x_3$	-1386	0,45	624
$x_4$	-871	0,54	466
$x_5$	28,80	40	1152
$x_6$	4978	0,26	1281
$x_7$	-103	15	1547
$x_8$	726	0,68	492
$x_9$	306	5	1543
$x_{10}$	1057	902	955
$x_{11}$	-19797	0,05	1056
$x_{12}$	103169	0,01	859
$x_{13}$	-4	443	1729
$x_{14}$	1062	0,39	419
$x_{15}$	3,27	487	1595
$x_{16}$	402	3	1245
$x_{17}$	1312	1,10	1520

Многообразие факторов, их взаимодействие, наличие противоположных тенденций (часто неизвестных) влияния их на прогнозируемый показатель приводят к тому, что существующие методы отбора оказываются не всегда работоспособными. Зачастую при исследовании многофакторных моделей искажение действительной зависимости сопоставляемых переменных может быть обусловлено взаимным влиянием факторных переменных, то есть мультиколлинеарностью. Наличие в модели взаимосвязанных признаков ведет к дублированию влияния одних и тех же факторов на результативный показатель. Вследствие этого коэффициент корреляции между изучаемыми признаками будет завышен. Поэтому важно, чтобы взаимосвязанные показатели не вошли в модель оптимальной сложности. Для этого выполнены исследования, по результатам которых сформирована корреляционная матрица, приведенная в таблице 3.

Анализ данных таблицы 3 позволил установить, что предварительно не следует иметь в модели либо фактор  $x_1$ , либо  $x_5$ ;  $x_1 \leftrightarrow x_9$ ,  $x_1 \leftrightarrow x_{10}$ ,  $x_1 \leftrightarrow x_{15}$ ,  $x_1 \leftrightarrow x_{17}$  и т. д.

Таблица 3 – Корреляционная матрица межфакторных связей

Фактор	y	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>	x <sub>8</sub>	x <sub>9</sub>	x <sub>10</sub>	x <sub>11</sub>	x <sub>12</sub>	x <sub>13</sub>	x <sub>14</sub>	x <sub>15</sub>	x <sub>16</sub>	x <sub>17</sub>
y	1,00																	
x <sub>1</sub>	0,89	1,00																
x <sub>2</sub>	0,03	0,07	1,00															
x <sub>3</sub>	-0,38	0,29	0,45	1,00														
x <sub>4</sub>	-0,26	-0,45	0,36	0,45	1,00													
x <sub>5</sub>	0,84	0,86	0,29	0,61	-0,30	1,00												
x <sub>6</sub>	0,81	0,51	0,08	0,56	0,01	0,71	1,00											
x <sub>7</sub>	-0,70	-0,30	0,01	-0,43	-0,13	-0,48	-0,95	1,00										
x <sub>8</sub>	0,69	0,70	0,29	0,75	-0,20	0,95	0,69	-0,46	1,00									
x <sub>9</sub>	0,58	0,79	0,32	0,50	-0,07	0,74	0,26	-0,05	0,66	1,00								
x <sub>10</sub>	0,91	0,90	0,19	0,51	-0,23	0,92	0,70	-0,51	0,81	0,70	1,00							
x <sub>11</sub>	-0,88	-0,76	-0,20	-0,60	0,07	-0,84	-0,82	0,66	-0,79	-0,58	-0,82	1,00						
x <sub>12</sub>	0,64	0,76	0,04	0,58	-0,34	0,82	0,46	-0,21	0,85	0,61	0,76	-0,73	1,00					
x <sub>13</sub>	-0,67	-0,26	0,11	-0,32	-0,12	-0,39	-0,91	0,98	-0,34	0,04	-0,45	0,61	-0,15	1,00				
x <sub>14</sub>	0,28	0,28	0,61	0,76	0,14	0,64	0,43	-0,28	0,76	0,56	0,42	-0,43	0,38	-0,12	1,00			
x <sub>15</sub>	0,81	0,95	-0,02	0,10	-0,42	0,66	0,33	-0,18	0,46	0,72	0,79	-0,61	0,61	-0,17	0,04	1,00		
x <sub>16</sub>	0,89	0,66	0,24	0,59	-0,00	0,83	0,96	-0,86	0,76	0,47	0,81	-0,90	0,54	-0,80	0,52	0,49	1,00	
x <sub>17</sub>	0,88	0,80	-0,25	0,11	-0,46	0,64	0,65	-0,55	0,50	0,33	0,78	-0,71	0,60	-0,57	-0,04	0,77	0,66	1,00

В существующей литературе рекомендуется не включать в модель факторы, которые имеют корреляционную взаимосвязь с аргументом на уровне  $< 0,75$ . Выполненные исследования и полученные результаты подтверждают это, но только для однофакторных моделей. Для многофакторных же моделей эти рекомендации не всегда оправдываются. Например, двухфакторная модель прогноза численности вагонного парка  $N_p = f(x_3(\text{уч. скорость}), x_{14}(\text{дин. нагрузка}))$  с индивидуальными коэффициентами корреляции ( $r_{x_3} = -0,38$ ) и  $r_{x_{14}} = 0,28$ ) менее 0,50 дает совокупный коэффициент корреляции ( $r_{x_3, x_8} = 0,78$ ) больше 0,75. У факторов  $x_1, x_5, x_6, x_{10}, x_{11}, x_{15}, x_{16}, x_{17}$  для рассматриваемых зависимостей коэффициент корреляции с исследуемой величиной  $> 0,75$ , поэтому эти факторы безусловно приняты значимыми и будут включены в модель. Факторы  $x_2, x_3, x_4, x_7, x_8, x_9, x_{12}, x_{13}, x_{14}$  имеют коэффициент корреляции с исследуемой величиной  $< 0,75$ . Однако физическая природа транспортных процессов, экспертная оценка специалистов-практиков однозначно указывает на то, что и скорости движения, и среднесуточный пробег, и погрузка, и остальные факторы с коэффициентом корреляции  $< 0,75$  в некоторой степени определяют величину рабочего парка грузовых вагонов.

В связи с этим было принято решение не иск-

лючать из рассмотрения на начальном этапе формирования модели эти факторы.

Таким образом, предлагаемый подход к анализу факторов, определяющих величину парка вагонов, позволил на начальном этапе предварительно оценить степень их влияния на исследуемую величину, отметить общие закономерности в анализируемом процессе и разработать алгоритм построения математической модели.

С учетом выполненных исследований весь процесс формирования математической модели долгосрочного прогноза количественных характеристик вагонного парка предусматривает выполнение следующих этапов:

- выбор основных факторов ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ );
- расчет коэффициентов корреляции между парком вагонов и факторами, а также факторов между собой. На этом этапе из модели удалялись те факторы, которые имели достаточно большой ( $r \geq 0,75$ ) коэффициент корреляции с оставшимися в модели факторами. В модели оставлялся фактор, который является логически более важным (системообразующим) и имеет больший коэффициент корреляции между исследуемой величиной и фактором;
- ранжирование факторов по коэффициенту корреляции;
- получение уравнения множественной регрессии;
- ранжирование факторов коэффициенту множественной регрессии;
- ранжирование факторов по сумме баллов

двух критериев – коэффициенту корреляции и коэффициенту множественной регрессии;

– построение модели оптимальной сложности.

Разработанный алгоритм формирования модели и проведенные оптимизационные расчеты позволили установить эмпирические прогнозные зависимости. В частности, исследования показали, что прогнозный вагонный парк по уровню минимальной остаточной дисперсии наилучшим образом описывается экспоненциальной зависимостью. Определяющими факторами являются: грузооборот, оборот, статическая нагрузка. Для данной трехфакторной модели  $y = f(x_1, x_2, x_3)$  зависимость представлена на рисунке 3.

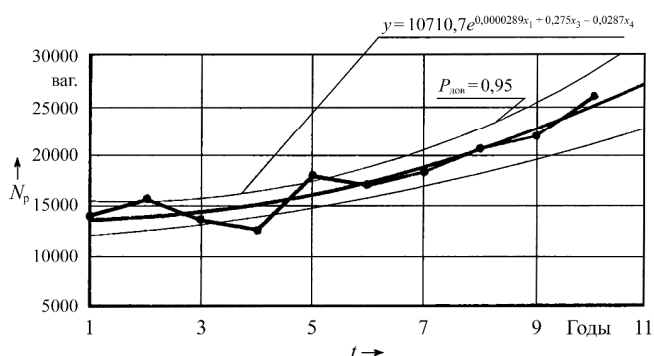


Рисунок 3 – График зависимости  $y = f(x_1, x_3, x_4)$

По результатам выполненных исследований получены прогнозные значения численности парка

Получено 10.11.2008

**W. I. Senko, E. P. Gurskiy.** Estimation level factors defining number wagon fleet.

Considered urgency and practical value given problems. They are shown quantitative and qualitative features wagon fleet. The organized analysis existing methods on determination required amount wagon fleet and is shown need of the account multivariable, correlation of the nature of the process of its shaping. The organized selection factor, are determined and explored factors, by means of which is fixed their influence upon amount fleet freight-cars. The executed categorization factor on value of their influence. It is designed mathematical model of the long-term forecast of the quantitative features wagon fleet and are received design values to number of the rolling stock on given forecasting time-frame. Results of the study were taken into account and used at development of the business plan of the Belorussian railway, realization which will allow to raise efficiency of the use the cargo rolling stock and whole infrastructures, providing its operation.

грузовых вагонов на период до 2012 года. Исследования позволили:

– более точно и системно оценить показатели, определяющие численность вагонного парка, классифицировать их как конкурентоспособные при синтезе модели оптимальной сложности и положить в основу формирования модели;

– разработать математическую модель долгосрочного прогноза количественных характеристик парка грузовых вагонов на основе анализа выборочной совокупности статистических данных о работе железной дороги, что впервые позволило учесть многопараметрический характер перевозочного процесса и повысить точность вычислений;

– получить расчетные значения численности парка грузовых вагонов на заданный горизонт прогнозирования и закономерности ее изменения с учетом количественных и качественных характеристик перевозочного процесса.

#### Список литературы

1 **Сенько, В. И.** Вопросы технического состояния инвентарного парка и определения его потребности / В. И. Сенько, Е. П. Гурский // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізничного трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 15. – С. 120–125.

2 Исследование динамики изменения парка грузовых вагонов за период 1995–2004 годы и расчет прогнозных показателей на период 2006–2010 годы : отчет о НИР / Белорус. гос. ун-т трансп. ; рук. В. И. Сенько. – Гомель, 2005. – 30 с. – № ГР 20053427.

3 **Правдин, Н. В.** Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М. : Транспорт, 1987. – 247 с.