

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ ПАРКА ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Важливым пріоритетом для Білоруської залізниці є освоєння обсягу перевезень, що збільшується, при гарантованій безпеці руху поїздів. Для цього необхідно забезпечити перевізний процес сучасним, надійним рухомим складом. На даний час ця проблема, що насамперед пов'язана зі старінням парку вантажних вагонів, є достатньо гостро характерною для Білоруської залізниці та потребує найшвидшого її вирішення. Для розробки ефективної стратегії оздоровлення та оновлення рухомого складу важливе значення має науково обґрунтований прогноз робочого парку. Розроблено математичну модель прогнозу робочого парку вантажних вагонів та отримано його розрахункові значення на період до 2012 року, які враховані та використані при розробці бізнес-плану роботи залізниці до 2010 року.

Важным приоритетом для Белорусской железной дороги является освоение возрастающего объема перевозок при гарантированной безопасности движения поездов. Для этого необходимо обеспечить перевозочный процесс современным, надежным подвижным составом. В настоящее время эта проблема, связанная, в первую очередь, со старением парка грузовых вагонов, достаточно остро характерна для Белорусской железной дороги и нуждается в скорейшем ее решении. Для разработки эффективной стратегии оздоровления и обновления подвижного состава важное значение имеет научно обоснованный прогноз рабочего парка. Разработана математическая модель прогноза рабочего парка грузовых вагонов и получены его расчетные значения на период до 2012 года, которые учтены и использованы при разработке бизнес-плана работы дороги до 2010 года.

Performing the increasing amount of transportations under guaranteed safety of the train traffic is the most important priority for Belorussian railway. To do so, it is necessary to provide the transportation process with a modern, reliable rolling stock. At present this problem, related firstly to the ageing of freight wagon stock, is acute enough for Belorussian railway and has need for its quickest solution. For development of the efficient strategy of recovery and renovation of the rolling stock the great importance has a scientifically justified forecast of the working stock. A mathematical model of the forecast of working stock of freight-wagons is developed and its design values for a period till 2012 are obtained, which are taken into account and used in development of the business plan of the railway operation till 2010.

Кризисные явления в экономике в начале 1990-х годов привели к снижению объемов перевозок, в результате чего значительная часть парка грузовых вагонов оказалась невостребованной, закупки подвижного состава были практически остановлены, и вместе с тем происходило сокращение парка грузовых вагонов из-за окончания срока их службы. В условиях установившейся динамики увеличения объемов перевозочной работы стал проявляться дефицит отдельных видов подвижного состава. Это заставило специалистов обратить самое пристальное внимание на активную часть производственных фондов – грузовые вагоны, средний срок службы которых на сегодняшний день составил 24 года [1, 2]. Устаревший в техническом отношении вагонный парк не позволит в перспективе обеспечить заявленный спрос на грузовые перевозки, что приведет к отказам клиентов от услуг железнодорожного транспорта, переходу на другие виды транспорта и, как результат, потере доходов Белорусской же-

лезной дороги. Управление активной частью производственных фондов – подвижным составом, а также формирование инвестиционной программы Белорусской железной дороги, эффективное решение других важных стратегических задач невозможно без научного обоснования рабочего парка вагонов. Для решения возникшей проблемы в соответствии с планами НИОКР Белорусской железной дороги были начаты исследовательские работы по обоснованию прогнозных значений рабочего парка. Указанное направление исследования является весьма актуальным, имеет важное научное значение для отрасли и практическое применение для Белорусской железной дороги.

В первую очередь проведен анализ имеющегося в распоряжении Белорусской железной дороги подвижного состава по его количеству и техническому состоянию. Он показал, что для вагонного хозяйства Белорусской железной дороги характерно старение парка грузовых вагонов.

В 1992 году на 5 Совете по железнодорожному транспорту парк грузовых вагонов бывшего МПС СССР был разделен между железнодорожными администрациями. С момента разделения парк грузовых вагонов уменьшился приблизительно на 27 % [2]. Это уменьшение произошло в основном за счет исключения его из инвентаря по техническому состоянию. При разделении вагонного парка средний возраст вагонов инвентарного парка составлял 15,3 года, а сейчас этот показатель равен 24 годам, то есть, чтобы достичь начального среднего воз-

раста, необходимо вложение значительных инвестиций (практически 56 % от общей стоимости парка) в обновление подвижного состава. Анализ статистических данных (табл. 1) свидетельствует о том, что количество вагонов инвентарного парка дороги с истекшим нормативным сроком службы составляет 41 % от общего парка. Износ основных фондов грузовых вагонов инвентарного парка на 01.07.2007 г. составил 78,8 %, в том числе: крытые – 87,5; платформы – 90,6; полувагоны – 77,3; цистерны – 81,3; прочие – 96,2 %.

Таблица 1

Характеристика инвентарного парка на 01.07.2007 г.

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

Наибольшую тревогу вызывает техническое состояние цистерн, полувагонов, хопперцементовозов, вагонов, используемых под перевозку калийных и азотных удобрений, технической соли и других агрессивных грузов. Данная часть вагонного грузового парка являются наиболее дефицитной, так как более 80 % от общего объема перевозок осуществляется именно этими типами вагонов. Изношенный и стареющий подвижной состав не позволяет перейти на современные перевозочные технологии, увеличить межремонтные сроки, гарантийные плечи пробега, веса поездов, решать многие другие задачи, диктуемые временем, требованиями безопасности движения.

Анализ мирового опыта и авторские исследования показали, что проблему сохранения вагонного парка и улучшения его технического состояния необходимо решать, в первую очередь, путем повышения качества капитального и деповского ремонтов вагонов, закупки новых вагонов и освоения капитально-восстановительного ремонта с продлением их срока службы. В связи с этим при разработке эффективной стратегии развития вагонного парка Белорусской железной дороги, собственной базы ремонта и производства элементов подвижного

состава важное значение имеет научно обоснованный прогноз рабочего парка.

Авторские исследования по вопросу определения потребных рабочих парков свидетельствуют, что при расчете используется, в основном, детерминированный подход, основанный на обработке данных по объемам погрузки грузов, а также некоторых показателей использования вагонов за предшествующие годы [1]:

$$N_p = U \Theta, \quad (1)$$

где U – работа дороги, ваг./сут;

Θ – оборот вагона, сут.

Современные направления исследований характеризуются тем, что эксплуатационные процессы носят вероятностный, корреляционный, а не однозначно детерминированный характер. Методы, разработанные в рамках этого подхода, позволяют повысить эффективность принимаемых решений, особенно при разработке стратегических планов развития вагонных парков и вагоноремонтной базы на Белорусской железной дороге. Выполненные исследования позволили установить, что для получения прогноза по рабочим паркам с наименьшей ошибкой необходимо учитывать воздействие многих факторов, как внешних, так и внутрен-

них, определяющих его количественное состояние. В данной постановке задачи необходимо учесть влияние таких показателей, как грузооборот, участковая скорость, вес поезда, оборот, статическая нагрузка, среднесуточная производительность, простои под грузовой операцией и на технической станции и т.д. Процесс формирования парка вагонов наиболее полно в этом случае описывает корреляционно-регрессионная модель оптимальной сложности.

Непременным условием построения адекватной математической модели является достаточно строгое представление о цели функционирования исследуемой системы, в нашем случае – парка грузовых вагонов. Необходимо также располагать информацией об ограничениях, которые впоследствии будут определять область допустимых значений управляемых переменных. Естественно, что и цель, и ограничения должны быть представлены в виде функций от управляемых переменных. Целью анализа полученной модели является определение наилучшего управляющего воздействия на объект управления (парк грузовых вагонов).

Сложность реальных транспортных систем затрудняет представление цели и ограничений в аналитическом виде. Поэтому перед исследователем ставится задача уменьшить «размерность системы». Функционирование любой системы определяется воздействием большого числа факторов. Однако в конечном итоге оказывается, что лишь небольшая их часть является доминирующей и достаточной для получения достоверного прогноза [3].

Реальная система имеет два уровня абстракции: упрощенный образ реальной системы и модель. Упрощенный образ реальной системы отличается от системы оригинала тем, что он представляется как результат воздействия доминирующих факторов, которые, в свою очередь, определяют поведение реальной системы. Модель представляет собой наиболее существенные для описания системы соотношения в виде целевой функции и совокупности ограничений. Разработка модели начинается с определения ее назначения и семейства объектов, для анализа работы которых она будет использоваться. В зависимости от назначения модели устанавливаются: требуемый уровень ее надежности, перечень объектов, по которым будет формироваться необходимый объем статистических данных, семейство факторов, определяющих работу системы.

Получение модели формирования парков грузовых вагонов преследует две основные це-

ли: установить главные факторы, влияющие на их величину, и степень этого влияния. Это позволит наметить первоочередные меры по повышению показателей эффективности работы вагонных парков, спрогнозировать количество единиц рабочего парка и тем самым даст возможность наметить первоочередные меры по оздоровлению подвижного состава, рационально расходовать средства на закупку подвижного состава, выработать обоснованные решения развития собственной базы индустриального ремонта и производства элементов подвижного состава.

Весьма 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 рабочего парка грузовых вагонов, использован индивидуальный и коллективный экспертные методы оценки. В ходе оценки мнений экспертов предложен и проанализирован ряд внутренних и внешних факторов, оказывающих влияние на формирование парка. 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. Выполненный анализ исследований показал, что рациональной протяженностью временного ряда является 10–20 лет. С учетом обоснованности длины ряда анализу подвергнута динамика изменения парка грузовых вагонов за период 1993–2005 гг. В ходе анализа мнений экспертов из рассмотренных факторов 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 собран массив их статистических данных.

Для статистических оценок влияния различных факторов на рабочий парк вагонов исследованы однофакторные корреляционно-регрессионные зависимости вида

$$N_p = f(X_i), \quad i = 1 \dots 17. \quad (2)$$

Проанализированы следующие зависимости: линейная, экспоненциальная и степенная. Выбор лучшего варианта модели осуществлен 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 установлена регрессионная и корреляционная взаимосвязи с рабочим парком грузовых вагонов. Анализ полученных результатов позволил ответить на ряд весьма важных вопросов, в частности, какой вид зависимости из трех исследуемых для функции $N_p = f(X_i)$ является предпочтительным (по минимуму остаточной дисперсии). Таким образом, на начальной стадии разработки многофакторной модели было определено, что на рабочий парк грузовых вагонов некоторые факторы влияют несущественно. Например, связь пассажирооборота с изменением парка грузовых вагонов характеризуется коэффициентом корреляции $r = 0,03$, а $R^2 = 0,002$. И такие факторы при формировании модели оптимальной сложности могут быть учтены, если это требуется на финишных этапах расчетов.

Важным моментом на начальном этапе прогноза вагонного парка является установление системообразующих факторов. Это позволяет в дальнейшем мультиколлинеарном анализе установить, какой из факторов, имеющий высокий уровень корреляции с другим фактором, оставить для дальнейших исследований, а какой исключить. С этой целью проведены исследования, по результатам которых впервые была сформирована корреляционная матрица и построены 17 моделей системообразующих факторов. На рис. 1 приведена графическая модель корреляционной взаимосвязи грузооборота с рабочим парком, а также с другими рассматриваемыми факторами. Такой анализ позволил более точно, системно оценить факторы и классифицировать их как конкурентоспособные при синтезе модели оптимальной сложности.

Предлагаемый подход к анализу факторов позволил оценить степень их влияния на исследуемую величину, отметить общие закономерности в анализируемом процессе и разработать

алгоритм построения многофакторной корреляционно-регрессионной модели оптимальной сложности.

Основополагающим моментом при разработке модели является выбор ее оптимальной сложности. При этом необходимо иметь в виду следующие важнейшие положения [4]:

- затраты на создание модели, дающей более точные результаты, растут быстрее, чем сама точность;

- в последовательных и параллельных цепях формирования ошибок моделирования доминирующую роль играет ошибка самого неточного, «грубого» звена;

- рациональный уровень точности модели лежит в границах, которые определяются сочетанием точности исходной информации и вычислительных алгоритмов.

Наилучшей является та модель, которая с наименьшим числом факторов описывает процесс с заранее заданной точностью. Обобщив имеющиеся подходы, выполнив собственные исследования и практические расчеты, для условий функционирования Белорусской железной дороги предложено производить направленное формирование модели с учетом двух критериев. В задачу каждого критерия входит расстановка факторов, влияющих на формирование рабочего парка по значимости. Самым значимым является тот фактор, который в наибольшей (по сравнению с другими) степени определяет изменение величины рабочего парка.

Два предлагаемых критерия представляют собой:

- парный коэффициент корреляции i -го фактора и рабочего парка грузовых вагонов – $r_{x_i, N}$;

- стандартизованный коэффициент β_i множественной линии регрессии.

С учетом выполненных исследований весь процесс формирования корреляционно-регрессионной модели оптимальной сложности предусматривает выполнение следующих этапов:

- выбор основных факторов ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$), определяющих величину парка грузовых вагонов. Одним из основных требований включения факторов в модель является отсутствие взаимной корреляции;

- расчет коэффициентов корреляции между парком вагонов и факторами, а также факторов между собой. На этом этапе из модели удалены 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 (системообразующий) и имеет больший коэффициент корреляции между исследуемой величиной и фактором;

– ранжирование факторов по коэффициенту корреляции. Фактору с наибольшим коэффициентом корреляции присваивался один балл и т.д.;

– получение уравнения множественной регрессии, выраженного в стандартизованном виде;

– ранжирование факторов по стандартизованному коэффициенту множественной регрессии. Фактору, который является наиболее значимым по этому критерию, присваивался один балл и т.д.;

– ранжирование факторов по сумме баллов двух критериев – коэффициенту корреляции и стандартизованному коэффициенту множественной регрессии;

– построение модели оптимальной сложности.

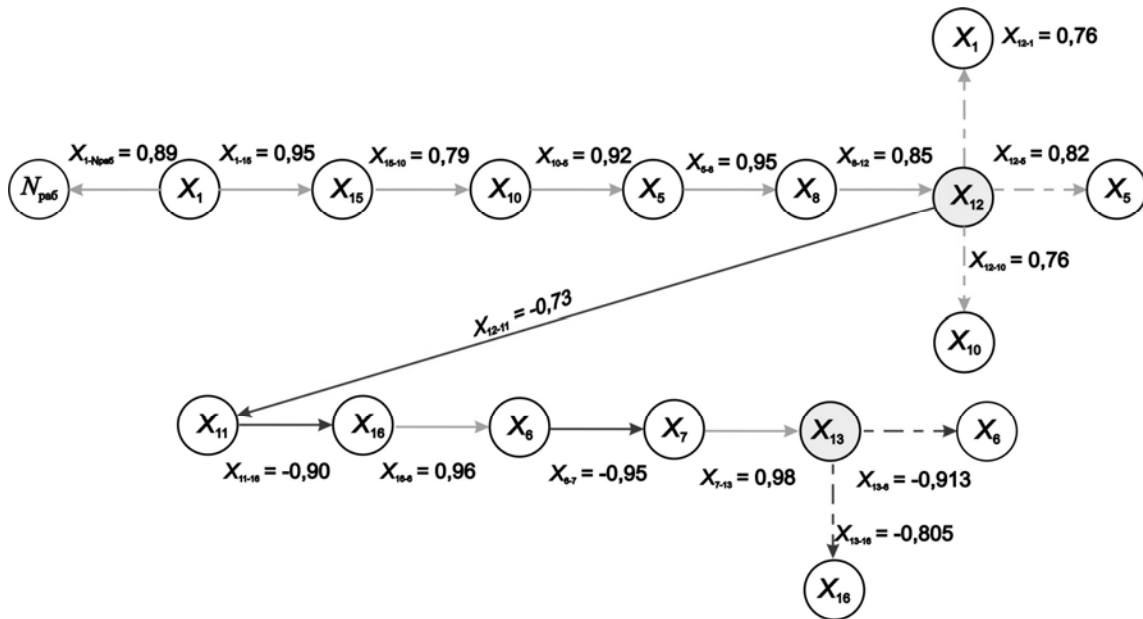


Рис. 1. Графическая модель системообразующих факторов в модели прогноза вагонного парка $X_1 \rightarrow X_i$

Для определения оптимальности сформированной модели использовались два критерия – совокупный коэффициент корреляции R и остаточная дисперсия линии регрессии $S_{ост}^2$.

Формирование модели начинается с получения зависимости

$$Y_i = f(X_{\min}), \quad (3)$$

где X_{\min} – фактор, имеющий минимальную сумму баллов.

Для этой функции определена остаточная дисперсия. Дальнейшее усложнение модели произведено включением в нее факторов в зависимости от количества присвоенных баллов при ранжировании. Усложнение (по количеству факторов, включенных в модель) заканчивалось тогда, когда выполняется условие

$$R \geq 0,95, \quad S_{ост_n}^2 - S_{ост_{n+1}}^2 \leq 5\%.$$

Выполненные ранее шаги исследования позволили получить многофакторные модели линейного, экспоненциального и степенного видов. Наиболее приемлемой для расчета принята та зависимость, величина остаточной дисперсии которой минимальна, т.е. модель наилучшим образом описывает процесс. Установлены факторы, которые были включены для формирования многофакторной корреляционно-регрессионной модели оптимальной сложности: X_1 – грузооборот; X_2 – техническая скорость; X_3 – оборот вагона; X_4 – статическая нагрузка; X_5 – динамическая нагрузка.

Усложнение модели, согласно алгоритму формирования модели, произведено по следующей схеме:

$$\begin{aligned} y &= f(X_1) \rightarrow y = f(X_1 + X_3) \rightarrow \\ &\rightarrow y = f(X_1 + X_3 + X_4) \rightarrow \\ &\rightarrow y = f(X_1 + X_3 + X_4 + X_2) \rightarrow \\ &\rightarrow y = f(X_1 + X_3 + X_4 + X_2 + X_5). \end{aligned}$$

Выполненные оптимизационные расчеты позволили установить аналитические 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. Данная трехфакторная модель оптимальной сложности выглядит следующим образом [5]

$$N_p = 10710,72 e^{2,8973 \cdot 10^{-5} X_1 + 0,2758 X_3 - 0,02871 X_4}$$

Для оценки адекватности модели временные ряды факторов были разбиты на несколько выборок: 1994–1998, 1994–1999, 1994–2000, 1994–2001, 1994–2002, 1994–2003, 1994–2004, 1994–2005 гг. – контрольные выборки и 1996–2005 гг. – обучающая выборка. Затем они анализировались по сходимости расчетных и фактических значений рабочего парка, находящихся в пределах изучаемых выборок. В целом сравнение значений показало высокую сходимость исследуемых величин. Процент расхождения по обучающей выборке $\bar{\%} = 6,6$, а также остаточная дисперсия $S_{\text{ост}}^2 = 21724$ достаточно хорошо согласуются с показателями контрольных выборок ($\bar{\%} = 6,5$ и $S_{\text{ост}}^2 = 22620$), что доказывает целесообразность применения таких моделей для прогнозирования парка грузовых вагонов. По результатам выполненных исследований получены расчетные значения рабочего парка грузовых вагонов за рассматриваемый период, а также прогнозные значения на период до 2012 года.

Таким образом, полученные результаты исследований позволяют плано-финансовым

службам Белорусской железной дороги определить приоритеты в распределении финансов, направляемых на повышение эффективности использования грузового подвижного состава в перевозочном процессе, а также на развитие собственной базы ремонта и производства новых вагонов, что в конечном итоге приведет к повышению надежности грузовых вагонов и обеспечит высокий уровень безопасности движения. Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждена актом внедрения на Белорусской железной дороге.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование динамики изменения парка грузовых вагонов за период 1995–2004 годы и расчет прогнозных показателей на период 2006–2010 годы: отчет о НИР 3931 (заключ.) [Текст] / Белорусский гос. ун-т трансп.; рук. В. И. Сенько – Гомель, 2005. – 30 с. – № ГР 20053427.
2. Разработка стратегии обеспечения перевозочного процесса грузовыми и пассажирскими вагонами: отчет о НИР 3026 (заключ.) [Текст] / Белорусский гос. ун-т трансп.; рук. В. И. Сенько. – Гомель, 2005. – 61 с. – № ГР 20031684.
3. Сенько, В. И. Совершенствование организации технического обслуживания и текущего ремонта грузовых вагонов [Текст] / В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2002. – 178 с.
4. Правдин, Н. В. Прогнозирование грузовых потоков [Текст] / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М.: Транспорт, 1987. – 247 с.
5. Гурский, Е. П. Многофакторная модель расчета потребного парка грузовых вагонов [Текст] / Е. П. Гурский // Вестник БелГУТа. – 2007. – № 1-2. – С. 90-94.

Поступила в редколлегию 23.06.2008.