

УДК 656.2:004.032.26

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В. Я. НЕГРЕЙ, С. А. ПОЖИДАЕВ

УО «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Н. А. АЗЯВЧИКОВ

ГП «Институт «Белжелдорпроект», г. Минск, Республика Беларусь

Целью исследования является совершенствование подходов и методов прогнозирования основных показателей работы транспортных систем в современных условиях с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) и оценка точности моделей ИНС в сравнении с традиционными. Верификация и оценка точности моделей ИНС наряду с другими показателями процесса прогнозирования, например трудоемкостью, требованиями к качественной и количественной информации для прогнозирования, доступностью программного обеспечения, уровнем квалификации персонала и др., позволяет сделать важные выводы о возможности практического применения ИНС для поставленной цели.

В настоящее время уровень требований к прогнозным расчетам и получаемым на их основе оценкам возрастает в связи с увеличением неопределенности в экономической сфере, на которую в значительной степени влияют внешнеполитическая нестабильность и флуктуации, рыночные конъюнктурные факторы и санкционные ограничения, пандемии, «локдауны», природные катаклизмы и другие события и связанные с ними риски принятия решений в системе управления. Это же в полной мере относится и к транспортным системам, в частности к железнодорожному транспорту.

В транспортных системах в условиях возрастающей неопределенности планы работы по освоению предполагаемых объемов перевозок фактически трансформируются в планы-прогнозы, а прогнозы разрабатываются на меньший период упреждения (глубину прогнозирования), вынужденно сокращая прогнозный горизонт. Так, профильная служба Белорусской железной дороги определяет прогнозы изменения размеров грузопотоков на основе данных клиентуры и их бизнес-планов лишь на 3 года перспективы. В то же время, известно, что в инфраструктурных проектах согласно требованиям ТНПА глубина прогнозирования должна достигать 10, а в отдельных случаях для крупных железнодорожных станций и узлов – 15–25 лет; при строительстве двухпутных вставок и дополнительных главных путей – 15 лет; электрификации железнодорожных участков и линий – 10 лет; строительстве или реконструкции сортировочных горок – 10 лет; сооружении локомотивных предприятий – 12–14 лет; вагонных предприятий – 7–9 лет; дистанций ПЧ, ШЧ – 7–8 лет [1].

В таких условиях проектным организациям приходится либо опираться только на прогнозные данные заказчика проектов, которые трудно верифицируемы и в значительной степени отражают лишь экономические интересы субъектов, либо ориентироваться на средне- и долгосрочные экономические прогнозы динамики изменения ВВП страны (стратегии развития транспорта, программы и подпрограммы), распределяя ее по видам транспорта и затем детализируя по отдельным участкам и станциям или другим объектам железнодорожной инфраструктуры. При таком подходе, во-первых, на первый план выходит оценка рисков реализации прогнозов с учетом воздействия неблагоприятных факторов в различном сочетании и определение на их основе чувствительности инфраструктурных проектов, а во-вторых, задача совершенствования методов прогнозирования для повышения точности и адекватности прогнозов в динамично изменяющейся ситуации.

В данной связи в исследовании выполнено прогнозирование изменения одного из ключевых показателей работы железнодорожного транспорта – общего грузооборота на основе двух подходов:

1) с использованием методов и динамических моделей Бокса – Дженкинса (АРПСС) в сочетании с «гладкими» функциями;

2) при применении моделей ИНС. Для разработки и анализа прогнозов использовались фактические значения грузооборота Белорусской железной дороги с 1990 по 2020 год.

Автокорреляционный анализ исходных данных за период 1991–2019 гг. показал, что временной ряд грузооборота содержит как сильную трендовую или систематическую (регулярную) составляющую процесса, так и циклическую. Соответственно, обе эти составляющие должны быть учтены в прогнозной модели изменения грузооборота. В соответствии с моделью поведения данных в первом случае была построена комбинированная тренд-циклическая прогнозная модель, конгруэнтная модели, описанной в [2], и представляющая собой S-образную трендовую «гладкую» модель с наложенными на неё циклическими составляющими, полученными с помощью авторегрессионной модели АРПСС (2,0,0) с константой.

Параметры тренд-циклической модели прогнозирования грузооборота на период до 2030 г. представлены в таблице 1, а ее графическое представление – на рисунке 1. Несмотря на то, что модель разработана в 2019 г., с ее помощью удалось предвидеть снижение объемов перевозок в 2020 г. с учетом действия ограничительных факторов в экономике, связанных, как оказалось, в основном с пандемией коронавируса, рост объемов транспортной работы в 2021 г. (фактический рост составил + 4,9 %), прогнозируется некоторый спад размеров перевозок грузов в 2022 и 2023 годах (непрерывная утолщенная линия на рисунке 1).

Таблица 1 – Основные параметры модели прогнозирования общего грузооборота и критерии качества

Модель	Компоненты модели и критерии их качества										
	трендовая S-кривая $\Gamma = e^{(61,892-102973/t)} + \varepsilon$						циклическая АРПСС (2, 0, 0) const параметры: AP(1) = 1,50027; AP(2) = -0,69486; константа = 8121,09				
	<i>r</i>	<i>R</i> ²	\tilde{R}^2	<i>t</i>	<i>F</i>	<i>DW</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>MAPE</i>	<i>ME</i>	<i>MPE</i>
Тренд-циклическая	-0,87	0,76	0,75	-8,61	74,18	0,54	3921,5*	3027,7*	7,9	-318,2*	1,15

* В млн т·км

Как видно из таблицы 1, модель демонстрирует высокие показатели качества (для трендовой модели коэффициент корреляции $r = -0,87$, детерминации $R^2 = 0,76$ (скорректированная величина $\tilde{R}^2 = 0,75$), *F*-статистика на уровне $F = t^2 = 74,18$, что превышает критическое значение, циклическая модель имеет наименьшее значение среднеквадратической ошибки $RMSE = 3921,5$ млн т·км).

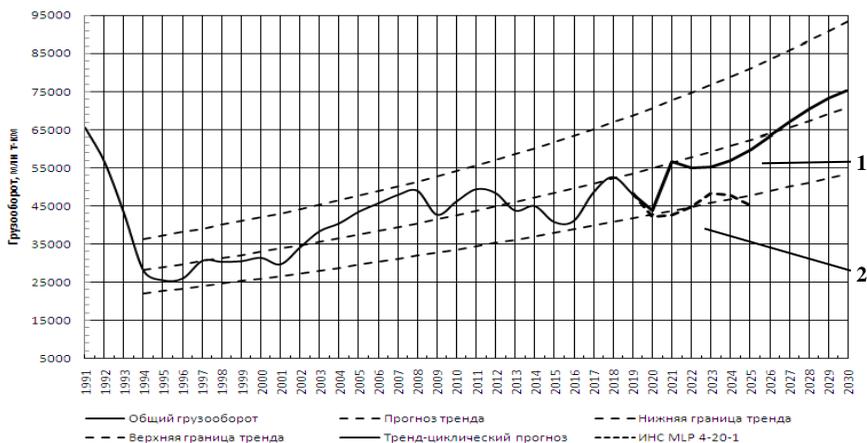


Рисунок 1 – Графическое представление прогнозных моделей грузооборота

Белорусской железной дороги на период:

1 – до 2030 г. (тренд-циклическая модель); 2 – до 2025 г. (модель ИНС MLP 4-20-1)

В соответствии с рисунком 1 в целом общий грузооборот Белорусской железной дороги имеет «гладкую» тенденцию к увеличению (крайние штриховые линии обозначают верхнюю и нижнюю границы прогноза, а средняя линия – базовый (целевой) или рабочий прогноз в соответствии с S-кривой тренда), однако в течение рассматриваемого периода до 2030 г. возможны циклические спады и подъемы объемов работы (непрерывная утолщенная линия, не выходящая за пределы границ прогноза и представляющая тренд-циклический прогноз грузооборота).

Одно из несомненных преимуществ рассматриваемой модели – возможность прогнозирования на долгосрочный период (до 10 лет), т. к. используется трендовая составляющая грузооборота. Однако если в целом модель адекватна сложившимся в течение длительного периода тенденциям (ориентировочно с 1994 г.), то в краткосрочных периодах возможны чувствительные отклонения прогнозных значений от фактических. Особенно это может быть заметно в ближайшие 3–5 лет, т. е. в 2020–2025 гг., пока не произойдет стабилизация протекающих процессов. Так, если в 2020 г. ошибка прогноза составила +4 % (прогнозное значение грузооборота – 43884,3 млн т·км, фактическое – 42200 млн т·км), то в 2021 г. – уже +27,5 % (соответственно, 56687,9 и 44478 млн т·км), что является неприемлемым.

К рискам существенного отклонения прогнозной траектории (рисунок 1) от фактической при недостаточном противодействии возникающим негативным факторам относятся: снижение объемов перевозок грузов (главным образом, калийных удобрений, нефти и нефтепродуктов, контейнерных транзитных грузов) и грузооборота в 2022 г. на 20–25 % с переходом к плавному росту или незначительному снижению в 2023–2024 гг. и последующим выходом на положительную динамику в соответствии с рисунком 1. Росту будет способствовать планомерное наращивание экспортных перевозок за счет переориентации транспортных потоков в Китай с транспортировкой грузов по территории России, порты на Черном и Каспийском морях, строительство новых портовых терминалов на Балтийском море для перевалки калийных удобрений, реализация инфраструктурных проектов Белорусской железной дорогой (сооружение новых контейнерных площадок и др.). Таким образом, вероятно повторение кризисной ситуации, возникшей в 1991–1995 гг. (резкое ступенькообразное снижение грузооборота на ≈ 70 % по сравнению с 1990 г.), хотя и в меньших масштабах (см. рисунок 1). В этих условиях требуется поиск новых подходов.

Одним из возможных решений является применение нейросетевых моделей и интеллектуальных систем прогнозирования, которые должны соответствовать требованиям, изложенным в [3, 4]. Целесообразность данного выбора для трудно прогнозируемых показателей на основе временного динамического ряда неравномерного нелинейно меняющегося характера обосновывается следующим [5, 6]: способность ИНС к обобщению и выделению скрытых зависимостей между входными и выходными данными; применение ИНС оправдано в тех случаях, когда решение задач прогнозирования затруднено большими объемами входной информации либо данные неполны или избыточны, «зашумлены» и частично противоречивы; показатели работы имеют скачкообразный нелинейный характер; традиционные методы прогнозирования надежны в условиях сложившихся экономических связей и определенных горизонтов их непрерывного развития; ИНС – это мощный и гибкий механизм прогнозирования и один из лучших методов аппроксимации функций. Проблемные вопросы применения ИНС связаны с непрерывно изменяющимся поведением (характером) данных, представленных временными рядами, поэтому нельзя сказать, что нейросеть будет обладать полной информацией.

Так, в исследовании выполнен анализ нескольких десятков ИНС различной архитектуры в программной среде *Statistica* и отобраны для сравнения две лучшие модели, параметры которых приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительные параметры ИНС прогнозирования грузооборота

Но- мер	ИНС	Производительность на последовательности		Алгоритм обучения и номер итерации остановки расчета	Функция ошибки	Функция активации нейронных слоев		MAPE
		обучающей	контрольной			скрытого	выходного	
1	<i>MLP 4-1-1</i>	0,90	0,67	BFGS22	МНК	Логистическая	Тождественная	0,084
2	<i>MLP 4-20-1</i>	0,94	0,93 (тест)	BFGS 55	МНК	Логистическая	Экспонента	0,045

Лучшей по точности является ИНС *MLP 4-20-1* (многослойный перцептрон), включающая 4 входных нейрона, 20 нейронов во внутреннем (скрытом) слое и 1 нейрон в выходном слое. Точность модели по средней абсолютной процентной ошибке (*MAPE*) составляет 4,5 % на контрольной последовательности. Из всех значений временного ряда грузооборота с 1991 по 2021 гг. 70 % используется для обучения ИНС, 15 % – в качестве тестовой и 15 % – контрольной последовательности. Обучение сети производилось в течение 55 эпох в соответствии с алгоритмом *BFGS*. Несмотря на то, что модель построена в конце 2021 г., ее поведение не так оптимистично по сравнению с тренд-циклической моделью (см. рисунок 1). Кривая модели (утолщенная штриховая линия с № 2 на рисунке 1) огибает нижнюю границу прогноза тренда грузооборота (консервативный прогнозный сценарий). Ошибка прогноза ИНС в 2021 г. составила 4,2 % (–1846,93 млн т·км), что по сравнению с ошибкой тренд-циклической модели (+27,5 %) значительно улучшает точность прогнозирования. В целом в период 2021–2025 гг. с помощью ИНС можно прогнозировать ступенькообразное снижение объемов транспортной работы по сравнению с наилучшим периодом (2018 г. – 52600 млн т·км) до среднего уровня 45000 млн т·км.

Таким образом, полученные результаты показывают целесообразность применения ИНС в современных нестабильных экономических условиях.

На основе выполненного исследования можно сделать следующие основные выводы:

1 В стабильных экономических условиях для целей прогнозирования изменения показателей работы транспортных систем применяют

различные традиционные методы, в т. ч. корреляционно-регрессионные, основанные на экстраполяции тенденций, и которые достаточно хорошо себя зарекомендовали.

2 В период неустойчивости экономических процессов, вызванной воздействием негативных факторов, определяющих прогнозный фон, высокой неопределенности среды целесообразно для целей прогнозирования использовать интеллектуальные технологии и прогнозирующие системы, ИНС для повышения адаптивности и точности кратко- и среднесрочных прогнозов.

3 При разработке прогнозов динамики изменения транспортных потоков для инфраструктурных проектов, особенно в период бифуркаций, необходимо оценивать риски реализации прогнозных сценариев и их влияние на экономические показатели проектов для поддержки принятия решений.

Список литературы

1 **Правдин, Н. В.** Прогнозирование грузовых потоков / Н. В. Правдин, М. Л. Дыканюк, В. Я. Негрей. – М. : Транспорт, 1987. – 248 с.

2 **Пожидаев, С. А.** Прогнозирование развития транспортно-экспедиционных и логистических предприятий и центров / С. А. Пожидаев, Н. А. Пожидаева, А. А. Хилькевич // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2015. – № 2 (31). – С. 96–100.

3 **Негрей, В. Я.** Некоторые задачи развития интеллектуальных транспортных систем / В. Я. Негрей, С. А. Пожидаев // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 11–12 окт. 2018 г. / Беларус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2018. – С. 104–105.

4 **Негрей, В. Я.** Интеллектуальные технологии в управлении на транспорте / В. Я. Негрей, С. А. Пожидаев // Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., Днепр, 16–17 дек. 2018 г. / ДНУЖТ. – Днепр, 2018. – С. 142.

5 **Якупов, Д. Т.** Перспективы применения искусственных нейронных сетей для прогнозирования объемов грузоперевозок в транспортных системах / Д. Т. Якупов, О. Н. Рожко // Статистика и экономика. – 2017. – № 5. – С. 49–60.

6 **Любимова, Т. В.** Решение задачи прогнозирования с помощью нейронных сетей / Т. В. Любимова, А. В. Горелова // Инновационная наука. – 2015. – № 4. – С. 40–42.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

- **Негрей Виктор Яковлевич**, г. Гомель, УО «Белорусский государственный университет транспорта», д-р техн. наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой и охрана труда», ueg@bsut.by;
- **Пожидаев Сергей Александрович**, г. Гомель, УО «Белорусский государственный университет транспорта», канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой и охрана труда», ueg@bsut.by;
- **Азвячиков Николай Александрович**, г. Минск, ГП «Институт «Белжелдорпроект», главный специалист отдела технико-экономического обоснования проектов, brtp@brtp.by.