На правах рукописи

Даваанням Тамир

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БАЗОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (региональные народнохозяйственные комплексы)

Автореферат
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск 2017

Работа выполнена на кафедре «Информационные системы и защита информации» ФГБОУ «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Краковский Юрий Мечеславович**

Официальные оппоненты: **Николайчук Ольга Анатольевна** доктор технических наук, доцент, ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова» СО РАН (г. Иркутск), старший научный сотрудник

Кедрин Виктор Сергеевич кандидат технических наук, доцент, кафедра «Теория вероятностей и дискретная математика» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита состоится 22 июня 2017 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 24, корпус 9, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, корпус 2, аудитория 101, (www.bgu.ru).

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан «__»_____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Т.И. Ведерникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время Улан-Баторская железная дорога (УБЖД) сохраняет ведущее положение при осуществлении грузовых перевозок Монголии. В условиях рыночных преобразований экономики страны особое значение имеет стабильность функционирования железнодорожного транспорта, который служит связуюшим звеном для всех отраслей народного хозйства Монголии. Проведенный анализ показал, что перевозочный процесс железнодорожным транспортом является сложной системой, функционирующий в условиях неопределенности и риска. Сложность перевозочного процесса определяется во многом тем, что железнодорожные объекты взаимодействуют между собой через процессы, которые они реализуют.

Отметим зарубежных и российских ученых, внесших существенный вклад в системный анализ, теорию принятия решений, статистический анализ и прогнозирование: Айвазян С.А., Андерсон Т., Афифи А., Бокс Дж., Дженкинс Г., Дрейпер Н., Кендалл М., Кульба В.В., Ларичев О.И., Моисеев Н.Н., Ногин В.Д., Перегудов Ф.И., Подиновский В.В., Саати Т., Тарасенко Ф.П., Черноруцкий И.Г. и др.

Так как перевозочный процесс осуществляется в условиях риска, то оценке величины рисков, их влиянию на принятие управленческих решений в различных предметных областях, безопасности движения на транспорте, посвящена большая литература, включая нормативные документы. Отметим российских специалистов, внесших существенный вклад в исследование и прогнозирование перевозочного процесса с позиций системного анализа в условиях неопределенности и риска: Безродный Б.Ф., Гапанович В.А., Горелик А.В., Замышляев А.М., Краковский Ю.М., Левин Д.Ю., Лапидус В.А., Морозов В.Н., Розенберг Е.Н., Шубинский И.Б. и др.

С целью создания единой базы данных и развития информационных технологии на УБЖД функционирует Центр статистического учета и информационных технологий. По мере развития этого центра создано около 800 АРМ различного назначения, функционирующих на единой системе управления базами данных. Несмотря на большое число АРМов и обслуживающих их программных комплексов, отсутствует программное обеспечение, посвященное прогнозированию базовых показателей, характеризующих перевозочный процесс железнодорожным транспортом на УБЖД.

Учитывая важность повышения эффективности управленческих решений, необходимо разработать алгоритмическое и программное обеспечение для прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса железнодорожным транспортом, в частности при перевозке грузов на УБЖД. Все это обосновывает актуальность диссертационной работы и позволяет сформулировать ее цель и задачи.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности принятия управленческих решений по перевозке грузов за счет разработки и применения алгоритмического и программного обеспечения комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса.

Реализация сформулированной цели достигается решением следующих **задач**:

1. Обоснование комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса железнодорожным транспортом на основе сравнительного анализа программно-алгоритмических средств и методов прогнозирования.

2. Создание алгоритмического обеспечения многофакторных моделей прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса, включая разработку методики их применения.

3. Выбор алгоритмов оценки параметров факторных моделей с учетом статистической и экспертной информации, применительно к комплексному прогнозированию базовых показателей.

4. Создание программного продукта по комплексному прогнозированию, реализующего разработанное алгоритмическое обеспечение, включая его апробацию по информации Улан-Баторской железной дороги.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в диссертационной работе является перевозочный процесс железнодорожным транспортом как сложная система. Предмет диссертационного исследования – алгоритмическое и программное обеспечение применительно к прогнозированию базовых показателей перевозочного процесса.

Научную новизну диссертации представляют следующие результаты, которые выносятся на защиту:

1. Формализация процедуры комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса, содержащая многофакторные регрессионные модели первого и второго порядка, факторные прогнозные модели на основе статистической и экспертной информации и технологию получения весовых коэффициентов.

2. Сценарный подход для комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса, основанный на различии экспертной информации и типов факторных моделей.

3. Специальное алгоритмическое обеспечение оценки параметров прогнозных моделей, учитывающее наличие статистической и экспертной информации, а также дополнительные методы по проверке статистических гипотез.

4. Методика комплексного прогнозирования, основанная на алгоритмическом и программном обеспечении, когда для оценки базовых показателей перевозочного процесса создаются многофакторные регрессионные модели первого и второго порядка, учитывающие значения значимых факторов.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке процедуры комплексного прогнозирования и графического отображения полученных результатов, реализованных в виде программного продукта «Комплексное прогнозирование базовых показателей», направленных на повышение эффективности управленческих решений при перевозке грузов. Созданное алгоритмическое и программное обеспечение апробировано и используется в Центре статистического учета и информационных технологий Улан-Баторской железной дороги при разработке мероприятий по совершенствованию перевозочного процесса. По результатам работы имеется акт внедрения.

Тематика работы соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 05.13.01: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления и обработки информации», п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем», п. 13 «Методы получения, анализа и обработки экспертной информации».

Методы исследования и достоверность результатов. Результаты и выводы диссертационной работы основаны на применении методов системного анализа, прогнозирования, теории вероятностей и математической статистики. Достоверность разработанного алгоритмического и программного обеспечения проверена расчетами на компьютере по экспертно-статистической информации показателей грузовых перевозок Улан-Баторской железной дороги и сравнением их с фактическими значениями.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных конференциях: 5-я международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», Иркутск, 2014; 4-я международная НПК «Безопасность регионов – основа устойчивого развития», Иркутск, 2014; 6-я международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», Иркутск, 2015; 7-я международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», Иркутск, 2016; The Fifth International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (ISMR-2016), Nanchang, China, 2016.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 9 научных работ в виде статей и докладов. Из них четыре публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, число публикаций без соавторов – три.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы из 123 наименований и приложения с актом внедрения. Общий объем работы без приложения составляет 126 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена научная и практическая новизна, представлено краткое содержание диссертационной работы по главам.

В первой главе проведен анализ перевозочного процесса железнодорожным транспортом, обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы. При этом: а) проведен анализ перевозочного процесса на Улан-Баторской железной дороге, включая функции центра статистического учета и информационных технологий; б) дана характеристика перевозочного процесса в условиях неопределенности и риска; в) проанализированы методы прогнозирования показателей эффективности; г) проведен анализ методов принятия управленческих решений.

На основании проведенного анализа сделаны следующие рекомендации:1) в качестве прогнозных факторных моделей рекомендуются линейные относительно параметров функции; 2) помимо статистической рекомендуется использовать экспертную информацию в виде точечных суждений; 3) для оценки параметров факторных и многофакторных прогнозных моделей рекомендуется метод наименьших квадратов. На основании анализа методов принятия управленческих решений предложено при прогнозировании базовых показателей перевозочного процесса использовать различные сценарии его развития. Этот факт учитывает особенность функционирования перевозочного процесса в условиях неопределенности, когда неопределенность связана со случайностью условий, в которых функционирует сложная исследуемая система.

Во второй главе описано созданное алгоритмическое и программное обеспечение комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса. При этом: а) проведена формализация процедуры комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса; б) для базовых показателей создано алгоритмическое обеспечение для многофакторных моделей первого и второго порядка, зависящих от значимых факторов; в) разработано алгоритмическое обеспечение для факторных прогнозных моделей; г) создано и описано программное обеспечение комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса; д) приведены выводы по результатам проведенных исследований. Комплексное прогнозирование основано на том, что для оценки значений базовых показателей в будущем предлагается использовать четыре вида данных, различным образом оценивающих перевозочный процесс железнодорожным транспортом: а) значение, полученное по многофакторной модели первого порядка; б) значение, полученное по многофакторной модели второго порядка; в) значение, полученное по временному ряду; г) точечное экспертное суждение группы квалифицированных специалистов.

Общая схема комплексного прогнозирования базовых показателей (грузооборота и погрузки грузов) приведена на рисунке 1. Комплексное прогнозирование основано на двух видах информации: а) статистической, которая формируется Центром статистического учета и информационных технологий УБЖД; б) экспертной, в виде точечных суждений и рангов, полученных от группы квалифицированных специалистов УБЖД.

Рис. 1. Общая схема комплексного прогнозирования базовых показателей

При отборе существенных факторов рекомендовано использовать выборочные значения парного коэффициента корреляции между *i*-м и *j*-м факторами $r_{x_i x_j}$. Если выполняется условие:

$$\left| r_{x_i x_j} \right| > (0{,}7 - 0{,}8), \qquad (1)$$

то между этими факторами имеется существенная связь. В этом случае один из факторов рекомендуется исключить, чтобы одна и та же причина не учитывалась дважды. Далее, учитывая условие (1), можно оставить только существенные факторы.

Существенные факторы рекомендуются для создания многофакторной модели первого или второго порядка (многофакторные модели (1) и (2) на рисунке 1)

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + ... + a_p \cdot x_p . \qquad (2)$$

Используя метод наименьших квадратов, а также значения основных показателей и существенных факторов, находятся значения коэффициентов модели (2) для базовых показателей, которыми являются грузооборот (y_1, млн.ткм) и погрузка грузов (y_2, тыс.т). Учитывая, что модель (2) линейна относительно параметров, необходимо на значения факторов наложить ограничения: $x_{minj} < x_j < x_{maxj}$, $j=1,\ldots,p$. (3)

Далее проводится дополнительный статистический анализ полученных моделей с проверкой значимости коэффициентов прогнозных моделей – H_0: $b_j=0$, H_1: $b_j \neq 0$, j – номер коэффициента. В качестве критерия рекомендуется использовать *t*-статистику

$$t_j = a_j / s(a_j) \rightarrow t(v_0), \; j=0,1,\ldots,p, \qquad (4)$$

где a_j – оценки коэффициентов b_j, полученные методом наименьших квадратов; $s(a_j)$ – оценки среднеквадратического отклонения коэффициентов a_j; величина (4) при известных ограничениях имеет t-распределение с числом степеней свободы $v_0=n-p-1$, где n – объем выборки, а p – число факторов в многофакторной модели. Значения (4) по модулю необходимо сравнить с критическим значением $t_{кр}\rightarrow t(n-p-1,\ a/2)$, полученным при уровне значимости a=0,05 и числе степеней свободы $n-p-1$. Тем самым по каждому базовому показателю выделяются значимые факторы.

В технологии комплексного прогнозирования по каждому фактору предлагается подбирать прогнозные функции (факторные модели на рисунке 1) на основе статистической информации в виде временных рядов с возможным дополнительным учетом экспертной информации в виде точечных суждений.

В связи с этим, по каждому базовому показателю и по каждому значимому фактору предлагается создавать по две прогнозные модели: а) на основе только статистических данных (модель временного ряда); б) на одновременном использовании статистических данных и экспертных точечных суждений на последующие годы (смешанная модель).

По полученным факторным моделям осуществляется прогнозирование на интересующий пользователя год. Полученные результаты прогноза по базовым показателям предлагается использовать при их комплексном прогнозировании. Результаты прогноза по значимым факторам предлагается использовать при вычислении базовых показателей по многофакторным моделям первого и второго порядка.

Далее эти три значения по каждому базовому показателю, а также их экспертное значение на интересующий пользователя год используются с различными весами при комплексном прогнозировании. Использование различной экспертной информации позволяет создавать различные сценарии развития перевозочного процесса в будущем. После того, как в многофакторных моделях остались лишь значимые факторы, они проверяются на адекватность по различным критериям: Фишера, пиков и др.

В работе предлагается дополнительно вычислять относительные отклонения в процентах по каждому году для расчетных по моделям (y_{rasch}) и наблюдаемым значениям (y_{nabl}) основных показателей. Эти отклонения рассчитаны по формуле (5)

$$O.O.y=\frac{|y_{nabl}-y_{rasch}|}{y_{nabl}}\cdot 100. \qquad (5)$$

Для проверки значимости разности пар, полученных по расчетным значениям многофакторных моделей первого и второго порядка, предлагается использовать t-статистику вида

$$t_p=\frac{\tilde{d}}{S_{\tilde{d}}}\rightarrow t(\upsilon_0=n-1), \qquad (6)$$

$$\tilde{d}=\frac{\sum_{j=1}^{n}d_j}{n},\ d_j=x_j-y_j,\ S_{\tilde{d}}=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}d_j^2-\frac{1}{n}\left(\sum_{j=1}^{n}d_j\right)^2}{n(n-1)}}.$$

Здесь x_j и y_j – расчетные значения грузооборота или объема погрузки грузов по модели первого и второго порядка для j-го года, $j=\overline{1,n}$, n – число лет (объем выборки). Для проверки важной предпосылки о нормальности выборочных (статистических) данных, участвующих в методе наименьших квадратов, предлагается проводить проверку нулевой гипотезы: H_0: $F_o(x)=F_e(x)$, (7)

где $F_o(x)$ – искомая функция распределения (в нашем случае нормальное распределение); $F_e(x)$ – эмпирическая функция распределения, полученная по статистическим данным. Для проверки нулевой гипотезы (7) рекомендован модифицированный критерий Колмогорова с поправкой Лиллиефорса. Критерий Колмогорова имеет вид

$$D_n = max\ (D_n^+, D_n^-), \tag{8}$$

где $D_n^+ = max_i[i/n - F_o(x_i)]$; $D_n^- = max_i[F_o(x_i) - (i-1)/n]$.

При модифицированном критерии Колмогорова с поправкой Лиллиефорса для нормального распределения нулевая гипотеза (7) принимается тогда, когда

$$D_n\ (\sqrt{n}\ -\ 0{,}01+0{,}85/\sqrt{n}\ ) < d(0{,}05)=0{,}895. \tag{9}$$

В условии (9) $d(0{,}05)$ – критическое значение при уровне значимости 0,05.

В качестве исходных были взяты данные по грузообороту (y_1, млрд.ткм) и по объему погрузки грузов (y_2, млн.тн) за 2000-2014 годы, объем выборки n=15. Далее были найдены значения критерия Колмогорова (8) для этих показателей и проверено условие (9): а) грузооборот – D_n =0,105; $D_n\ (\sqrt{n}\ - 0{,}01+0{,}85/\sqrt{n}\ )=0{,}412 < d(0{,}05)=0{,}895$;

б) погрузка грузов – D_n =0,202; $D_n\ (\sqrt{n}\ -\ 0{,}01+0{,}85/\sqrt{n}\ )=0{,}792 < d(0{,}05)=0{,}895$.

Учитывая, что условие (9) выполнилось, гипотезу о нормальности генеральной совокупности базовых показателей при уровне значимости 0,05 можно принять.

Так как временные ряды по базовым показателям и факторам достаточно короткие (с 2000 года), в качестве факторных прогнозных моделей рекомендованы четыре функции:

– полиномиальная - $y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + ... + a_n t^n$; (10)

– экспоненциальная - $y(t) = ab^t$; (11)

– в виде логарифмической параболы - $y(t) = ab^t c^{t^2}$; (12)

– логистическая - $y(t) = k/\left(1 + b \cdot e^{-at}\right)$. (13)

Параметры полиномиальной функции (10) определяются по МНК. Функции (11) и (12) логарифмированием сводятся к полиному первой и второй степени. Далее можно использовать МНК. Для функции (13) рекомендован метод Родса.

Когда дополнительно к статистическим данным добавляются точечные оценки экспертов, предполагается, что добавляются новые значения.

Введем следующие обозначения для прогнозных частных значений: z_1 – прогнозное частное значение базового показателя, полученное по многофакторной модели первого порядка; z_2 – прогнозное частное значение базового показателя, полученное по многофакторной модели второго порядка; z_3 – прогнозное частное значение базового показателя, полученное по факторной модели; z_4 – прогнозное частное значение базового показателя, полученное группой квалифицированных экспертов.

Предполагается, что прогнозные частные значения базовых показателей

$$Z=(z_1, z_2, z_3, z_4), \tag{14}$$

имеют различную относительную важность. Эта важность характеризуется весовыми коэффициентами, полученными по экспертной информации. В данной работе предполагается, что экспертиза проводится группой из L экспертов, которые являются квалифицированными специалистами в предметной области. Эксперты ранжируют частные значения с учетом их важности. При этом наименее важному, с точки зрения эксперта, частному значению присваивается ранг равный 1, а наиболее важному – m, где m – число частных значений (в нашем случае m=4). Весовые коэффициенты (w_j)

$$w_j = \sum_{l=1}^{L} r_{jl} / \sum_{j=1}^{m}\sum_{l=1}^{L} r_{jl}\ ,\ \sum_{j=1}^{m} w_j = 1, \tag{15}$$

где r_{jl} – ранг, поставленный j-у частному значению (z_j) l-м экспертом.

Весовые коэффициенты (15) рекомендуется использовать в линейной свертке для вычисления комплексного показателя: $z_c = \sum_{j=1}^{m} w_j \cdot z_j$. (16)

Значение (16) является результатом комплексного прогнозирования и рекомендуется в качестве итогового прогнозного значения. Надежность экспертизы (однородность экспертов по их квалификации) проверяется по критерию (17)

$$S = \sum_{j=1}^{m} (\sum_{l=1}^{L} r_{jl} - \frac{1}{2} L(m+1))^2 . \quad (17)$$

Если окажется, что $S>S_{кр}(L, m, q)$, то можно принять гипотезу об однородности экспертов при уровне значимости q.

Наличие различной экспертной информации, типов факторных моделей позволяет создавать различные сценарии развития перевозочного процесса с точки зрения комплексного прогнозирования базовых показателей.

Выделим основные отличия: 1) экспертная информация, влияющая на параметры факторных моделей; 2) экспертная информация, влияющая на частное значение (z_4); 3) экспертная информация, влияющая на значения весовых коэффициентов (15); 4) типы факторных моделей (10-13), участвующих в многофакторных моделях первого и второго порядка; 5) тип информации, влияющий на параметры факторных моделей, участвующих в многофакторных моделях первого и второго порядка.

При использовании сценарного подхода задача комплексного прогнозирования базовых показателей (16) имеет вид

$$z_{c,T,p}(t+k)=w_{1,p}\cdot z_{1,T,p}(t+k)+w_{2,p}\cdot z_{2,T,p}(t+k)+w_{3,p}\cdot z_{3,T,p}(t+k)+w_{4,p}\cdot z_{4,p}(t+k), \quad (18)$$

где: t – номер последнего года во временном ряде. Например, если временной ряд собран за период от 2000 года до 2014 года, то t =15; k – номер прогнозного года, k=1, 2,… Например, если прогнозный год 2015, то k=1; T – признак, характеризующий вариацию типов факторных моделей, участвующих в вычислении базовых показателей; p – признак, характеризующий вариации в экспертной информации; $z_{c,T,p}(t+k)$ – значение комплексного показателя для одного из базовых в момент времени ($t+k$) (18); $z_{1,T,p}(t+k)$ – значение одного из базовых показателей в момент времени ($t+k$), полученное по многофакторной модели первого порядка – $f_{1,T,p}(\cdot)$;

$$z_{1,T,p}(t+k)=f_{1,T,p}(A_t, X(t+k)), \quad (19)$$

где A_t – вектор параметров многофакторной модели первого порядка, полученный по исходным данным до времени t; $X(t+k)$ – значения существенных факторов на момент времени ($t+k$); $z_{2,T,p}(t+k)$ – значение одного из базовых показателей в момент времени ($t+k$), полученное по многофакторной модели второго порядка – $f_{2,T,p}(\cdot)$;

$$z_{2,T,p}(t+k)=f_{2,T,p}(B_t, X(t+k)), \quad (20)$$

где B_t – вектор параметров многофакторной модели второго порядка, полученный по исходным данным до времени t; $X(t+k)$ – значения существенных факторов на момент времени ($t+k$); $z_{3,T,p}(t+k)$ – значение одного из базовых показателей в момент времени ($t+k$), полученное по факторной модели – $f_{3,T,p}(\cdot)$;

$$z_{3,T,p}(t+k)=f_{3,T,p}(C_t, (t+k)), \quad (21)$$

где C_t – вектор параметров факторной модели, полученный по исходным данным до времени t; $z_{4,p}(t+k)$ – экспертное суждение для базовых показателей на момент времени ($t+k$), полученное группой экспертов; $w_{1,p}$, $w_{2,p}$, $w_{3,p}$, $w_{4,p}$ – весовые коэффициенты (15). Выбор наилучшего сценария предлагается определять экспертно.

Использование сценарного подхода повышает точность комплексного прогнозирования базовых показателей за счет варьирования экспертной информацией, типами информации и типами факторных моделей.

Методика комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса, использующего сценарный подход

Предложенная методика комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса, использующего сценарный подход, содержит следующие этапы:

1. Подготовка исходных данных, содержащих три вида информации: а) статистическую по показателям и влияющим факторам в виде временных рядов, б) экспертную в виде точечных оценок и рангов, в) описание сценариев развития перевозочного процесса;
2. Расчет парных коэффициентов корреляции между влияющими факторами и выбор существенных факторов на основе условия (1);
3. Создание многофакторных моделей первого и второго порядка (2) для базовых показателей, зависящих от существенных факторов;
4. Создание многофакторных моделей первого и второго порядка (2) для базовых показателей, зависящих от значимых факторов и найденных с помощью *t*-статистики (4); проверка адекватности полученных многофакторных моделей и проведение дополнительного статистического анализа;
5. Создание адекватных факторных прогнозных моделей, используя временные ряды по базовым показателям и значимым факторам, экспертные точечные суждения и виды аппроксимирующих функций (10-13);
6. Вычисление весовых коэффициентов (15) по экспертной информации в соответствии со сценариями развития перевозочного процесса;
7. Вычисление частных (19-21) и комплексных (18) значений базовых показателей в соответствии со сценариями развития перевозочного процесса;
8. Экспертный выбор наилучшего сценария с последующим анализом полученных результатов.

На основе разработанного алгоритмического обеспечения, описанного выше, создано программное обеспечение «Комплексное прогнозирование базовых показателей». Работа с программным комплексом происходит в среде *Windows*, база данных спроектирована с использованием *Interbase Server*, обработка производится с помощью надстроек *Microsoft Excel*, расчет выполняется с использованием подходящей статистической или инженерной макрофункции. Начальное окно программы приведено на рисунке 2.

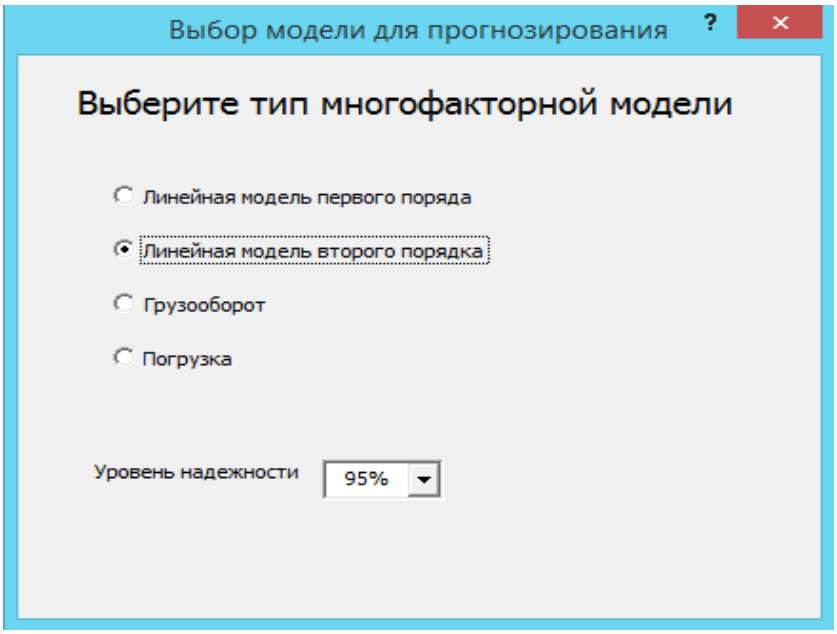

Рис. 2. Начальное окно программы

Используя его, можно выбирать тип многофакторной модели (первого или второго порядка) и тип базового показателя (грузооборот или погрузка грузов). Дополнительно выбирается значение доверительной вероятности. Другие окна приведены в диссертации.

В третьей главе проведена апробация разработанного алгоритмического и программного обеспечения комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса по реальным исходным данным. При этом: а) приведены исходные статистические и экспертные данные для апробации разработанного алгоритмического и программного обеспечения; б) созданы и апробированы многофакторные регрессионные модели первого и второго порядка по данным УБЖД; в) созданы и апробированы факторные прогнозные модели для значимых факторов и базовых показателей; г) проведено комплексное прогнозирование базовых показателей перевозочного процесса, включающих грузооборот и погрузку грузов, на основе сценарного подхода.

Статистические данные для апробации взяты на УБЖД с 2000 по 2015 год, но 2015 год используется для проверки результатов прогнозирования. Для влияющих факторов были найдены значения парных коэффициентов корреляции. Используя условие (1), были оставлены существенные факторы: ($x_1, x_2, x_4, x_9, x_{10}$). (22)

Здесь x_1 – статическая нагрузка (т); x_2 – оборот вагона (сут.); x_4 – средняя заработная плата (млн.тугр); x_9 – среднесуточный пробег локомотива (км/сут); x_{10} – эксплуатационный парк локомотивов (лок/сут). Для каждого фактора (22) выполняется условие (3). Используя метод наименьших квадратов, найдем многофакторные модели первого порядка для грузооборота и погрузки грузов:

$$y_1 = 6833.7 + 28.4 \cdot x_1 + 11.9 \cdot x_2 + 0.006 \cdot x_4 + 7.9 \cdot x_9 + 180.1 \cdot x_{10}; \quad (23)$$

$$y_2 = 11019.2 - 69.1 \cdot x_1 + 54.9 \cdot x_2 + 0.012 \cdot x_4 - 4.8 \cdot x_9 + 16 \cdot x_{10}. \quad (24)$$

Для модели (23) F-статистика равна 102,7; для модели (24) – 86,4. Далее, используя значения t-статистики (4), был получен окончательный вид моделей:

для грузооборота многофакторная модель первого порядка имеет вид

$$y_1 = -743.98 + 6.7227 \cdot x_4 + 163.6673 \cdot x_{10}; \quad (25)$$

для погрузки грузов многофакторная модель первого порядка имеет вид

$$y_2 = 7932.577 + 7.1232 \cdot x_4 - 4.0665 \cdot x_9. \quad (26)$$

Для модели (25) F-статистика равна 226,6; для модели (26) – 252,4.

Аналогично были получены многофакторные модели второго порядка:

для грузооборота модель второго порядка имеет вид

$$y_1 = -46878.95 + 166.69 \cdot x_9 + +202.3 \cdot x_{10} + 0.0052 \cdot x_4^2 - 0.150 \cdot x_9^2; \quad (27)$$

для объема погрузки грузов модель второго порядка имеет вид

$$y_2 = -49328.378 + 11.945 \cdot x_4 + +218.646 \cdot x_9 - 0.216 \cdot x_9^2; \quad (28)$$

F-статистика для модели (27) равна 133,96; F-статистика для модели (28) равна 378,03.

В таблице 1 приведены расчетные значения по многофакторным моделям первого и второго порядка, а также статистические данные по грузообороту и погрузке грузов: y_1(ст), y_2(ст) – статистические значения; $y_1(1)$, $y_1(3)$ – значения для грузооборота по моделям (25) и (27); $y_2(2)$, $y_2(4)$ – значения для погрузки грузов по моделям (26) и (28).

Используя результаты таблицы 1 и t-статистику (6), была проверена гипотеза о значимом или незначимом отличии результатов вычисления базовых показателей по модели первого и второго порядка.

В качестве аппроксимирующей функции при создании факторных прогнозных моделей использовалась функция (10) в виде прямой или параболы. Экспертная информация по базовым показателям и существенным факторам для двух вариантов (B) приведена в таб-

лице 2. Первый вариант не предполагает существенного уменьшения базовых показателей и зарплаты относительно 2014 года, а второй это предполагает и является более реалистическим с учетом экономической ситуации.

Расчетные значения по многофакторным моделям Таблица 1

Год	y_1 (ст)	$y_1(1)$	$y_1(3)$	y_2 (ст)	$y_2(2)$	$y_2(4)$
2000	4292.75	4188,049	4308,266	6783.37	6632,189	7158,831
2001	5287.27	5118,379	5606,881	7131.18	6681,360	7367,033
2002	6452.06	6917,129	6195,191	7511.82	7115,019	6961,691
2003	7254.76	7487,469	7136,096	7593.05	7308,010	7730,602
2004	8856.90	9093,534	9285,248	7986.42	7551,092	8504,080
2005	9929.09	9641,582	10259,657	9000.01	7677,317	9016,109
2006	9218.50	8491,914	9058,121	9057.08	7654,197	8760,160
2007	8360.65	7864,388	8133,056	9217.61	7850,847	9069,388
2008	8261.37	9177,169	8804,018	10455.79	8783,992	10800,539
2009	7852.10	8155,146	7843,617	10318.48	8794,948	10390,777
2010	10286.70	10031,003	9854,316	12783.98	9642,412	12131,341
2011	11418.75	11299,176	10761,051	14371.77	10670,886	13996,911
2012	12142.74	12016,825	11967,202	16221.75	11988,711	16235,571
2013	12076.53	12170,274	12323,994	16606.09	12540,746	16732,288
2014	12473.69	12495,818	12687,465	16538.38	13255,570	16885,245

Значения экспертных оценок Таблица 2

B	y_1	y_2	x_4	x_9	x_{10}
1	12500	16500	1200,0	610,0	35,0
2	11600	14900	1000,0	580,0	35,0

В таблице 3 приведены полученные в работе факторные прогнозные модели. Адекватность моделей по F-статистике и другим критериям подтвердилась.

Факторные прогнозные модели Таблица 3

Ф	СД	СД+1	СД+2
y_1	$y_1 = 508{,}18 \cdot t + 4878{,}83$	$y_1 = 496{,}96 \cdot t + 4942{,}54$	$y_1 = 447{,}08 \cdot t + 5055{,}04$
y_2	$y_2 = 765{,}01 \cdot t + 4651{,}00$	$y_2 = 756{,}44 \cdot t + 4700{,}07$	$y_2 = 721{,}14 \cdot t + 4900{,}07$
x_4	$x_4 = 68{,}689 \cdot t - 108{,}335$	$x_4 = 73{,}306 \cdot t - 134{,}499$	$x_4 = 68{,}894 \cdot t - 109{,}499$
x_9	$x_9 = 7{,}046 \cdot t + 467{,}930$	$x_9 = 7{,}6932 \cdot t + 464{,}263$	$x_9 = 7{,}031 \cdot t + 468{,}013$
x_{10}	$x_{10}=-0{,}279 \cdot t^2+4{,}374 \cdot t+26{,}25$	$x_{10}=-0{,}252 \cdot t^2+4{,}372 \cdot t+27{,}10$	$x_{10}=-0{,}252 \cdot t^2+4{,}372 \cdot t+27{,}10$

В таблице 4 приведены результаты прогноза показателей и факторов по факторным моделям (табл.3) для различных вариантов (B). Прогноз проводится на 2015 год; учитывая, что статистические данные собраны с 2000 года, его порядковый номер равен 16.

Результаты прогноза показателей и факторов Таблица 4

B	$y_1(16)$	$y_2(16)$	$x_4(16)$	$x_9(16)$	$x_{10}(16)$
СД	13009,7	16891,2	990,7	580,7	30,6
СД+1	12893,4	16803,1	1038,4	587,4	32,5
СД+2	12208,3	16438,4	992,8	580,5	32,5

Опишем обозначения вариантов, используемые в таблицах 3 и 4: СД – при создании прогнозной модели используются статистические данные до 2014 года; СД+1 – при созда-

нии прогнозной модели используются статистические данные до 2014 года и экспертная оценка на 2015 год по варианту 1 (табл. 2); СД+2 – при создании прогнозной модели используются статистические данные до 2014 года и экспертная оценка на 2015 год по варианту 2 (табл. 2). При вычислении весовых коэффициентов использовались ранги от двух групп экспертов. В первом случае участвовало 4 эксперта, а во втором 6.

Для первого случая весовые коэффициенты (15): W=(0,325; 0,200; 0,113; 0,362); (29)

для второго случая: W=(0,150; 0,367; 0,150; 0,333). (30)

Расчетное значение S-статистики (17) для случая (29) равно 63,5; критическое значение $S_{кр}(L, m, q)=S_{кр}(4, 4, 0.05)=49,5$; гипотеза об однородности экспертов принимается; аналогично подтвердилась гипотеза об однородности экспертов для случая (30).

В таблице 5 и 6 приведены сценарии развития перевозочного процесса для грузооборота и погрузки грузов.

Сценарии развития перевозочного процесса для грузооборота Таблица 5

C	z_1	z_2	z_3	z_4	W
0	СД	СД	СД	12500	(30)
1	СД+1	СД+1	СД+1	12500	(30)
2	СД+2	СД+2	СД+2	11600	(30)
3	СД+2	СД+2	СД+2	11600	(31)

Сценарии развития перевозочного процесса для погрузки грузов Таблица 6

C	z_1	z_2	z_3	z_4	W
0	СД	СД	СД	16500	(29)
1	СД+1	СД+1	СД+1	16500	(29)
2	СД+2	СД+2	СД+2	14900	(29)
3	СД+2	СД+2	СД+2	14900	(30)

В сценарии (0): а) при вычислении частных значений базовых показателей (z_1, z_2, z_3) используются только статистические данные (СД), б) для частного показателя z_4 принято значение 12500 для грузооборота или 16500 для погрузки грузов, в) весовые коэффициенты для случая (29). В сценарии (1): а) при вычислении частных значений базовых показателей (z_1, z_2, z_3) используются помимо статистических данных экспертные оценки по варианту 1 (табл. 2), б) для частного показателя z_4 принято значение 12500 для грузооборота или 16500 для погрузки грузов, в) весовые коэффициенты для случая (29). В сценарии (2): а) при вычислении частных значений базовых показателей (z_1, z_2, z_3) используются помимо статистических данных экспертные оценки по варианту 2 (табл. 2), б) для частного показателя z_4 принято значение 11600 для грузооборота или 14900 для погрузки грузов, в) весовые коэффициенты для случая (29). В сценарии (3): а) при вычислении частных значений базовых показателей (z_1, z_2, z_3) используются помимо статистических данных экспертные оценки по варианту 2 (табл. 2), б) для частного показателя z_4 принято значение 11600 для грузооборота или 14900 для погрузки грузов, в) весовые коэффициенты для случая (30).

Комплексное прогнозирование грузооборота

В таблице 7 приведены частные значения ($z_{1,T,p}(16)$; $z_{2,T,p}(16)$; $z_{3,T,p}(16)$; $z_{4,p}(16)$) и комплексные прогнозные значения ($z_{c,T,p}(16)$) для грузооборота по сценариям (табл. 5).

Частные и комплексные значения, грузооборот Таблица 7

C	$z_{1,T,p}(16)$	$z_{2,T,p}(16)$	$z_{3,T,p}(16)$	$z_{4,p}(16)$	$z_{c,T,p}(16)$
0	10924,7	10864,0	13009,7	12500	11717, 9
1	11256,1	11172,0	12893,4	12500	12043,7
2	11249,8	11037,7	12208,3	11600	11442,4
3	11249,8	11037,7	12208,3	11600	11432.3

Фактическое значение по грузообороту на УБЖД в 2015 году было 11462,6 (млн.ткм). Многофакторные модели первого и второго порядка дают заниженный результат, а факторные прогнозные модели – завышенные.

Комплексное прогнозирование (18) по всем сценариям дало удовлетворительные результаты, но наибольшей точностью обладает сценарий, когда эксперты сделали предположение о том, что показатели перевозочного процесса на 2015 год будут хуже, чем в 2014 году (сценарий 2). Отличие в весовых коэффициентах не существенно повлияло на конечный вариант (сценарии 2 и 3), но все-таки предпочтение необходимо отдать весовым коэффициентам первой группы экспертов (29).

Комплексное прогнозирование по погрузке грузов

В таблице 8 приведены частные значения ($z_{1,T,p}(16)$; $z_{2,T,p}(16)$; $z_{3,T,p}(16)$; $z_{4,p}(16)$) и комплексные прогнозные значения ($z_{c,T,p}(16)$) для погрузки грузов для четырех сценариев (табл. 6).

Частные и комплексные значения, погрузка грузов Таблица 8

C	$z_{1,T,p}(16)$	$z_{2,T,p}(16)$	$z_{3,T,p}(16)$	$z_{4,p}(16)$	$z_{c,T,p}(16)$
0	12628,0	16637,7	16891,2	16500	13865,3
1	12940,4	16981,9	16803,1	16500	12635,0
2	12643,7	16669,2	16438,4	14500	14549,5
3	12643,7	16669,2	16438,4	14500	15729,0

Фактическое значение по погрузке грузов на УБЖД в 2015 году было 14591,0 (тыс.т). Многофакторные модели первого порядка дают заниженный результат, а факторные прогнозные модели и модели второго порядка – завышенные. Комплексное прогнозирование (19) дало удовлетворительные результаты, но наибольшей точностью обладает сценарий, когда эксперты сделали предположение о том, что показатели перевозочного процесса на 2015 год будут хуже, чем в 2014 году (сценарий 2). Отличие в весовых коэффициентах существенно повлияло на конечный вариант (сценарии 2 и 3). Учитывая реальное значение по погрузке грузов, предпочтение необходимо отдать весовым коэффициентам первой группы экспертов (29).

Таким образом, использование комплексного прогнозирования с учетом сценариев развития перевозочного процесса, зависящих от экспертной информации, является научно и практически важным результатом, повышающим точность прогнозирования базовых показателей и по грузообороту и по погрузке грузов.

В заключении приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. С позиций системного анализа создана постановка и проведена формализация процедуры комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса, направленной на повышение качества принятия управленческих решений. Предлагается использовать четыре вида частных значений, оценивающих различные компоненты перевозочного процесса железнодорожным транспортом: а) значение, полученное по многофакторной модели первого порядка; б) значение, полученное по многофакторной модели второго порядка; в) значение, полученное по временному ряду; г) точечное экспертное суждение группы квалифицированных специалистов.

2. Разработано алгоритмическое и методическое обеспечение комплексного прогнозирования базовых показателей, основанного на различных видах экспертной информации, типах факторных моделей, типах используемой информации, что в свою очередь позволяет создавать различные сценарии развития перевозочного процесса железнодорожным транспортом. Предложено алгоритмическое обеспечение по созданию многофакторных моделей

первого и второго порядка для базовых показателей, включающее отбор существенных факторов с использованием коэффициентов парной корреляции и отбор значимых факторов с использованием *t*-статистики.

3. Рекомендованы четыре функции для создания факторных прогнозных моделей: полиномиальная, экспоненциальная, в виде логарифмической параболы, логистическая. В качестве комплексного базового показателя выбрана линейная свертка частных прогнозных значений. Различная относительная важность частных прогнозных значений позволяет повысить точность прогноза за счет возможности изменять весовые коэффициенты, которые определяются на основе рангов, полученных группой экспертов.

4. На основе разработанного методического и алгоритмического обеспечения, создано программное обеспечение «Комплексное прогнозирование базовых показателей». База данных спроектирована с использованием *Interbase Server*, обработка производится с помощью надстроек *Microsoft Excel*.

5. Используя статистическую информацию по показателям перевозочного процесса для УБЖД и экспертную информацию квалифицированных специалистов, подготовлены исходные данные для апробации комплексного прогнозирования базовых показателей, использующего сценарный подход. В соответствии с предложенной методикой процедуры прогнозирования, для грузооборота и погрузки грузов созданы многофакторные модели первого и второго порядка, учитывающие только значимые факторы. Для значимых факторов и базовых показателей созданы прогнозные модели, использующие и статистическую и экспертную информацию.

6. Проведена апробация методики комплексного прогнозирования, использующая сценарии развития перевозочного процесса, различные варианты весовых коэффициентов частных значений, типы факторных моделей. Для грузооборота многофакторные модели первого и второго порядка дают заниженный результат, а факторные прогнозные модели – завышенные. Комплексное прогнозирование по всем сценариям дало удовлетворительные результаты, но наибольшей точностью обладает сценарий, когда эксперты сделали предположение о том, что показатели перевозочного процесса на 2015 год будут хуже, чем в 2014 году. Для погрузки грузов многофакторные модели первого порядка дают заниженный результат, а факторные прогнозные модели и модели второго порядка – завышенные. Комплексное прогнозирование дало удовлетворительные результаты, но наибольшей точностью обладает сценарий, когда эксперты сделали предположение о том, что показатели перевозочного процесса на 2015 год будут хуже, чем в 2014 году.

7. Использование комплексного прогнозирования с учетом сценариев развития перевозочного процесса, зависящих от экспертной информации, является важным результатом, повышающим точность прогнозирования и по грузообороту и по погрузке грузов. Получен акт внедрения результатов диссертационной работы на УБЖД.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Даваaням, Тамир. Разработка многофакторных моделей прогнозирования грузооборота и объема погрузки грузов / Ю.М. Краковский, Т. Даваaням // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – №4(44). – С. 110-113.

2. Даваaням, Тамир. Модели многофакторного оценивания основных показателей перевозки грузов / Т. Даваaням, Е.А. Михайлова, А.С. Яхина // Вестник ЧГУ. – 2015. – №12. – С. 80-86.

3. Даваaням, Тамир. Многофакторное оценивание показателей перевозочного процесса на основе моделей второго порядка/ Ю.М. Краковский, Т. Даваaням, А.С. Яхина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №2(50). – С. 82-85.

4. Дава́аням, Тамир. Комплексное прогнозирование базовых показателей перевозочного процесса / Ю.М. Краковский, Т. Дава́аням // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №3(51). – С. 179-184.

В других изданиях:

5. Дава́аням, Тамир. Создание модели многофакторного прогнозирования основных показателей УБЖД / Т. Дава́аням // Материалы пятой международной НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2014. – Том 1. – С. 408-413.

6. Дава́аням, Тамир. Модели многофакторного прогнозирования грузооборота и объема погрузки грузов / Т. Дава́аням // Материалы 4-й международной НПК «Безопасность регионов – основа устойчивого развития». Иркутск: – 2014. .– С. 97-100.

7. Дава́аням, Тамир. Сравнение моделей многофакторного оценивания грузооборота и объема погрузки грузов / Т. Дава́аням // Материалы шестой международной НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2015.– С. 422-425.

8. Дава́аням, Тамир. Программное обеспечение комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса / Т. Дава́аням, Е.А. Михайлова // Материалы седьмой международной НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2016. – Том 1. – С. 371-374.

9. Krakovskiy Yuri, Davaanyam Tamir, Luzgin Aleksandr. The Scenario Approach for Prediction of Indicators Transportation Process // The Fifth International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (ISMR-2016). Nanchang, China, October 20-21, 2016. P. 620-623.

Подписано в печать 19.04.2017. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 3067.

Отпечатано в типографии ИрГУПС
Адрес: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.