

Комплексная оптимизация эксплуатации пассажирских поездов на базе автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок

Г. Л. ВЕНЕДИКТОВ, В. М. КОЧЕТКОВ

Общество с ограниченной ответственностью «Экспресс-Л» (ООО «Экспресс-Л»), Санкт-Петербург, 194291, Россия

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной для пассажирского комплекса задачи оптимизации тарифной политики при наиболее рациональном использовании подвижного состава. Излагаются принципы экономико-математического моделирования с целью определения оптимального количества вагонов в составах пассажирских поездов и цен на проезд в едином расчетном процессе, названном комплексной оптимизацией. Разработанные модели позволяют формировать оптимальные схемы составов в соответствии с прогнозируемым спросом, уравновешивая спрос и предложение на перевозки, что, в свою очередь, радикально повышает их экономическую эффективность. Одновременно с нахождением оптимальных схем методом комплексной оптимизации определяются такие цены на проезд, при которых баланс спроса и предложения достигается при максимально возможном экономическом эффекте. В статье рассматриваются аналитические модели пассажирского спроса, принципы реализации процедуры комплексной оптимизации, проблемы прогнозирования пассажирского спроса и особенности расчетов прогноза спроса на примере поезда № 17/18 «Карелия» на направлении Петрозаводск—Москва, а также предлагается решение задачи определения оптимальных цен и схем составов. На примере реальных данных эксплуатации этого поезда произведена оценка эффективности автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок, созданной на базе алгоритмов комплексной оптимизации. Показано, что разработанные аналитические модели пассажирского спроса позволяют решать оптимизационные задачи, повышающие эффективность автоматизированных систем управления экономическими показателями перевозочного процесса, а мультимодельная система прогнозирования обеспечивает удовлетворительную точность при высоком уровне детализации прогнозов. В связи с тем, что уровень расходов на рейсы поездов радикально влияет на результат оптимизации перевозочного процесса при переменных схемах составов, принятый критерий оптимизации учитывает как доходы, так и расходы на перевозку. Приведены данные расчетов, показывающих, что процедура комплексной оптимизации для поезда «Карелия» могла бы дать значительный дополнительный финансовый результат.

Ключевые слова: пассажирские железнодорожные перевозки; спрос; экономико-математическое моделирование; комплексная оптимизация; прогнозирование; управление рентабельностью; автоматизированная система; АСУРПП

Введение. Пассажирский комплекс железных дорог России начиная с 2013 г. применяет динамическое

ценообразование на перевозки в системе управления доходностью. Эта система исторически строилась так, что ее эффективная работа возможна только при постоянном объеме предложения [1]. Применительно к пассажирским железнодорожным перевозкам предложение постоянного объема мест в поездах означает их эксплуатацию с постоянными схемами составов. В то же время маневр количеством вагонов по классам в зависимости от спроса является важнейшим преимуществом, повышающим эффективность пассажирских перевозок [2].

Так как спрос и предложение оказываются сбалансированными лишь при определенных ценах на проезд, востребованными являются принципы моделирования, позволяющие определять потребные количества вагонов в составах и цены в едином расчетном процессе. Авторами настоящей статьи разработаны и опубликованы теоретические основы моделирования пассажирского спроса и созданы алгоритмы такого процесса, названного комплексной оптимизацией (КО) [2–4].

Важным этапом КО является выбор критерия оптимизации. При изменении схем составов меняются расходы на их рейсы. Поскольку в этом случае использование в качестве критерия только дохода приводит к грубым ошибкам, оптимизация должна производиться по финансовому результату от перевозок, учитывающему как доходы D , так и расходы R по каждому рейсу. Особо отметим, что эффективность КО обусловлена созданной аналитической моделью спроса на пассажирские перевозки [2, 3].

На разработанных теоретических принципах реализован программный комплекс OPTIMUM-T [2, 5, 6], составивший основу автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок (АСУРПП). В соответствии с требованиями производственных процессов по перевозке пассажиров АСУРПП включает в себя системы мониторинга (непрерывного контроля параметров перевозок), прогнозирования, комплексной оптимизации и технико-экономического анализа.

■ E-mail: gennady@konsalt.net (Г.Л. Венедиктов)

Целью настоящей статьи стала оценка эффективности АСУРПП применительно к конкретному пассажирскому направлению, имеющему существенный спрос на перевозки как в регулируемом, так и дерегулируемом секторе при достаточно большом числе остановочных пунктов. Алгоритм КО позволяет оптимизировать процесс эксплуатации групп поездов. Так как при этом результаты расчетов имеют большой объем, в настоящей работе для наглядности приведен пример КО только одного поезда № 17/18 «Карелия» сообщением Петрозаводск—Москва.

Аналитические модели пассажирского спроса. Представленные оптимизационные задачи решаются методами экономико-математического моделирования [2, 3, 7, 8], причем основной является модель, задающая зависимость спроса от цены. При построении ценовой модели пассажирского спроса приняты во внимание два очевидных постулата: 1) с увеличением стоимости билета спрос падает, а с уменьшением — растет; 2) число предлагаемых к продаже мест ограничено предельным количеством мест в вагонах.

Здесь и далее под пассажирским спросом S понимается количество пассажиров в некотором классе поезда. Это количество либо определяется по истории продаж, либо приближенно находится по алгоритмам прогноза спроса. Следует, однако, иметь в виду, что пассажирский спрос является, по сути, случайным процессом с довольно высокой дисперсией. Поэтому приводимые далее ценовые зависимости описывают влияние цены на средний спрос с некоторым приближением.

Если в поезде имеется M мест в определенном классе, то при низкой цене зависимость спроса S от цены p находится в зоне насыщения ($S=M$), но, начиная от некоторой граничной цены $p_{гр}$, спрос снижается с ее увеличением. При достижении предельной цены $p_{пр}$ спрос фактически обнуляется. На практике граничную и предельную цены можно определить: 1) по динамике истории продаж, если цена варьируется в заметных пределах; 2) по анкетным опросам пассажиров — в этом случае ценовые предпочтения пассажиров могут определяться по методу Вестендорпа [5, 9].

Практические расчеты показали, что наиболее удачными являются модели на основе степенной и экспоненциальной аппроксимаций [2–4], определяемые соответственно формулами (1) и (2):

$$S(p) = \begin{cases} M, & p \leq p_{гр}; \\ M \left[1 - \left(\frac{p - p_{гр}}{p_{пр} - p_{гр}} \right)^\alpha \right], & p_{гр} < p < p_{пр}; \\ 0, & p \geq p_{пр}, \end{cases} \quad (1)$$

где M — количество мест; p — цена; $p_{гр}$ — граничная цена; $p_{пр}$ — предельная цена.

$$S(p) = M \exp \left(- \left[\frac{p}{p_0} \right]^q \right), \quad (2)$$

где p_0 — параметр, определяемый по формуле (3).

Параметр α в формуле (1), задающий скорость спада спроса с ростом цены, как правило, находится в пределах $1,8 \leq \alpha \leq 2$.

В формуле (2) спрос задается параметрами p_0 и q , которые находятся, если определены граничная $p_{гр}$ и предельная $p_{пр}$ цены. Здесь для граничной цены разумно принять значение $p = p_{гр}$, при котором спрос $S(p)$ равен $S_{гр} = 0,99 M$, а для предельной цены — $S_{пр} = 0,05 M$.

Тогда параметры q и p_0 находятся по формулам

$$q = \ln \left[\frac{\ln(S_{пр} / M)}{\ln(S_{гр} / M)} \right] \left[\ln \left(\frac{p_{пр}}{p_{гр}} \right) \right]^{-1}; \quad p_0 = p^* \left[\ln \left(\frac{M}{S^*} \right) \right]^{-1/q}, \quad (3)$$

где $S_{пр}$ — предельный спрос; $S_{гр}$ — граничный спрос.

Величинам p^* и S^* в выражении для параметра p_0 отвечают согласованные между собой цена и спрос, которые могут находиться по истории продаж.

С учетом принятых выше выражений для параметров $S_{пр}$ и $S_{гр}$ формула для величины q может быть записана в виде

$$q = 5,697 / \ln(\beta), \quad (4)$$

где β — принимаемое модельное отношение предельной цены к граничной.

Обе ценовые модели — степенная и экспоненциальная — представлены на рис. 1. На оси абсцисс отмечены граничная и предельная цены. Применимость обеих моделей подтверждена на значительном объеме практических расчетов.

На рис. 2 помимо ценовой зависимости спроса показана штрихпунктирной линией зависимость от цены величины дохода $D = pS(p)$. Доход D , как видно из рис. 2, достигает максимума при некоторой оптимальной цене $p_{опт}$. Для модели (2) она выражается через параметры p_0 и q

$$p_{опт} = p_0 \left(\frac{1}{q} \right)^{1/q}. \quad (5)$$

Из рис. 2 видно также, что при оптимальной цене коэффициент использования вместимости S/M , для краткости далее называемый населенностью, становится менее единицы и на практике составляет $0,87-0,90$.

Принципы реализации процедуры КО. При выполнении расчетов, связанных с процедурой КО, более удобно использовать экспоненциальную модель (2).

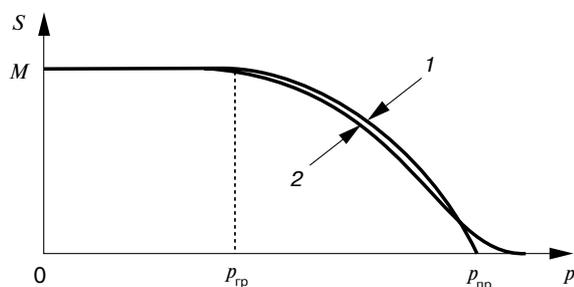


Рис. 1. Модели ценовой зависимости спроса S от цены p : 1 – степенная (1); 2 – экспоненциальная (2); M – количество мест; $p_{гр}$ – граничная цена; $p_{пр}$ – предельная цена
 Fig. 1. Models of price dependence of demand S on price p : 1 – power (1); 2 – exponential (2); M – number of seats; $p_{гр}$ – boundary price; $p_{пр}$ – marginal price

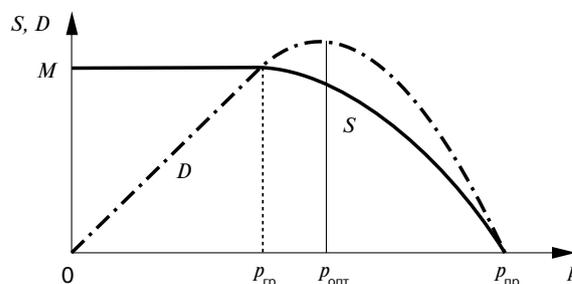


Рис. 2. Зависимость спроса S и дохода D от цены p : $p_{опт}$ – оптимальная цена
 Fig. 2. Dependence of demand S and income D on price p : $p_{опт}$ – optimal price

Процедура КО выполняется в следующем порядке. Исходя из истории продаж, применительно к каждому рейсу на соответствующую дату определяют прогнозные значения спроса S и базовые цены p для всех классов обслуживания. Далее находят соответствующее спросу S число вагонов каждого класса и, таким образом, определяют исходные населенности S/M .

После этого по величинам S/M и p находят модельные параметры p_0 и q , а затем осуществляют перебор возможного количества вагонов v_i для всех классов и рассчитывают по формуле (5) оптимальные цены применительно к каждому возможному варианту. В итоге находят такое оптимальное соотношение количества вагонов по классам и цены на проезд, которое дает наибольшую величину финансового результата $D-R$. Отметим, что величина расходов R представляет собой ту часть, которая относится непосредственно на рейсы вагонов. Постоянная составляющая расходов, которая не зависит от того, находится ли вагон в рейсе или в отстое, в данный расчет не принимается.

На рис. 3 проиллюстрирован один из шагов такого расчетного процесса, когда осуществляется проверка, может ли увеличиться финансовый результат, если к трем вагонам какого-то класса добавить четвертый.

Получаемые результаты имеют особенно наглядную форму, если ввести систему относительных единиц. В качестве единиц измерения спроса, цен и дохода примем величины, относящиеся к исходному варианту. Для данного случая исходное число вагонов равно трем. При этом в качестве ценовой единицы для абсциссы выберем граничную цену $p_{гр3}$, а спрос и доход вдоль ординаты будем измерять соответственно в единицах спроса $S_{гр3}$ и дохода $D_{гр3}$, имеющих место при граничной цене $p_{гр3}$. Относительные величины цены, спроса и дохода для трех вагонов при этой граничной цене принимают единичное значение.

На рис. 3 кривая S_3 отображает ценовую зависимость спроса (2) при трех вагонах, а S_4 – при четы-

рех. Ценовые зависимости доходов D_3 и D_4 обозначены пунктирными линиями. Оптимальные цены, для которых эти доходы максимальны, обозначены вдоль абсциссы соответственно как $p_{опт3}$ и $p_{опт4}$. Там же символами $p_{гр3}$ и $p_{гр4}$ обозначены соответствующие граничные цены. Как видно из рис. 3, при увеличении предложения с трех вагонов до четырех оптимальная и граничная цены уменьшаются для поддержания реализуемого пассажирского спроса на необходимом уровне.

В отношении расчетного способа перехода от трех вагонов к четырем, демонстрируемого на рис. 3, отметим следующее.

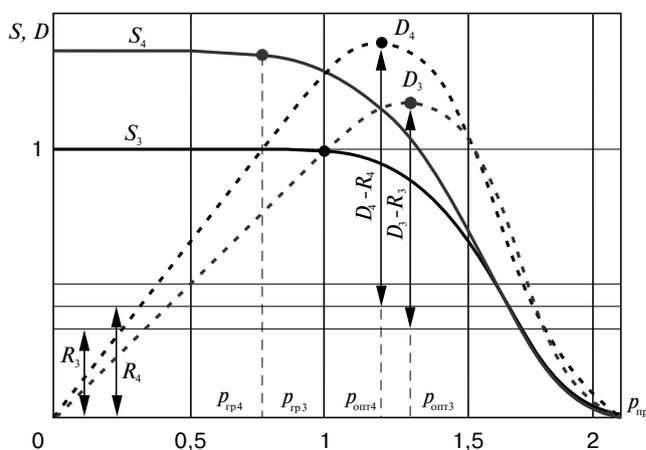


Рис. 3. Сравнение финансовых результатов в относительных величинах при изменении числа вагонов в составе: S_3, S_4 – кривые спроса при трех и четырех вагонах соответственно; D_3, D_4 – величины доходов; R_3, R_4 – величины расходов; $p_{гр3}, p_{гр4}$ – граничные цены; $p_{опт3}, p_{опт4}$ – оптимальные цены; D_3-R_3, D_4-R_4 – финансовые результаты
 Fig. 3. Comparison of financial results in relative terms when changing the number of cars in the scheme: S_3, S_4 – demand curves for three and four cars, respectively; D_3, D_4 – income values; R_3, R_4 – cost values; $p_{гр3}, p_{гр4}$ – boundary prices; $p_{опт3}, p_{опт4}$ – optimal prices; D_3-R_3, D_4-R_4 – financial results

Очевидно, что в окрестности предельно высоких цен пассажирский спрос является малым вне зависимости от числа предлагаемых вагонов. Этот факт должен учитываться при перестроении ценовой модели, т. е. при переходе на рис. 3 от кривой спроса S_3 к линии S_4 . В силу сказанного при таком перестроении следует использовать автотельный подход, для которого при высокой цене спрос, оставаясь низким, практически не зависит от выбираемой составности. Одним из удобных автотельных преобразований такого рода является привязка обеих кривых на рис. 3 к точке перегиба для модели (2) — т. е. к ценовой координате, для которой вторая производная спроса по цене равна нулю. Совмещение точек перегиба для обоих чисел вагонов и задание суммарного числа мест в вагонах для измененной составности однозначно определяет ценовую зависимость спроса при новом количестве вагонов — с надлежащим изменением граничной и оптимальной цен.

Основания для выбора оптимальной схемы путем сравнения значений финансовых результатов $D_4 - R_4$ и $D_3 - R_3$ наглядно демонстрирует рис. 3. Доход D_4 выше дохода D_3 , однако при переходе к четырем вагонам пропорционально возрастают расходы $R_4 = (4/3)R_3$. При относительно низких расходах, показанных на рисунке, $D_4 - R_4 > D_3 - R_3$, и по этой причине увеличение числа вагонов в данном случае экономически целесообразно. Очевидно также, что уровень расходов влияет на принятие решения об изменении числа вагонов, и при больших расходах на вагон за рейс добавление вагона становится невыгодным.

Описанные выше сравнительные оценки выполняются для всех классов. В итоге находят схему состава и набор оптимальных цен, обеспечивающих наибольший финансовый результат. Если рассматривается группа поездов, то в расчет берется суммарный доход от всех рассматриваемых составов.

Следует, однако, отметить, что при числе поездов 4–5 и более количество возможных комбинаций чисел вагонов для всей совокупности поездов превышает величину 10^{12} и такое количество комбинаций делает практически невозможным выполнение сравнительных оценок. С целью сокращения объемов расчетов в АСУРПП для подобных случаев применяются алгоритмы на базе выпуклого программирования и градиентного поиска максимума целевой функции [3]. Это позволило радикально уменьшить число итераций, сделав расчет доступным для персональных компьютеров.

Проблемы прогнозирования пассажирского спроса и особенности расчетов прогноза спроса для поезда «Карелия». Высокая точность прогнозов является необходимым условием эффективности КО. Однако временные ряды пассажирского спроса на железнодорожном транспорте обладают характерными

свойствами, затрудняющими достижение удовлетворительной точности. К таким свойствам относятся: слабая автокорреляция, выраженные сезонные изменения и внутринедельные колебания, аномалии спроса в праздничные и каникулярные периоды, высокий уровень дисперсии вследствие действия случайных факторов, влияние макроэкономической и конкурентной сред.

По указанной причине авторами был предварительно выполнен значительный объем пробных расчетов с целью отбора методов прогнозирования, дающих наилучшую точность применительно к условиям пассажирского железнодорожного сообщения. Эти расчеты позволили выявить ряд методов, обеспечивающих наименьшую среднюю ошибку прогноза, а именно:

- экспоненциального сглаживания (Хольта—Винтерса);
- декомпозиции;
- авторегрессии и скользящего среднего (ARIMA, ARIMAX — AutoRegressive Integrated Moving Average).

Вследствие перечисленных выше особенностей временных рядов была произведена существенная модификация этих алгоритмов при интеграции их в АСУРПП.

Точность прогноза, реализуемая каждым из указанных методов, может зависеть от свойств конкретного временного ряда [10–14]. Поэтому в АСУРПП реализован алгоритм мультимодельного прогнозирования, при котором по анализу имеющихся статистических свойств временного ряда наиболее точный метод выбирается автоматически.

Мультимодельная система обеспечивает удовлетворительную точность при высокой детализации прогнозов, вплоть до отдельных рейсов поездов. Это дает возможность осуществлять прогнозирование «снизу вверх», т. е. от прогнозов объемов перевозок отдельными поездами до агрегированных по направлениям и филиалам [4]. Именно наличие детализированного прогноза позволяет разрабатывать практические мероприятия по формированию оптимального предложения.

Проблемам прогнозирования пассажирского спроса посвящена опубликованная авторами работа [4], поэтому в настоящей статье подробный анализ и методы решения этих проблем не приводятся. Применительно к поезду «Карелия» система прогнозирования АСУРПП обеспечила хороший уровень точности. Абсолютная средняя ошибка (MAPE) при различных уровнях детализации составила: месяц $\leq 7\%$, неделя $\leq 13\%$, сутки $\leq 23\%$.

Определение оптимальных цен и схем составов для поезда «Карелия». Маршрут курсирования поезда на направлении Петрозаводск—Москва длиной 922 км

имеет 9 промежуточных станций. В составы включаются 4 класса вагонов: мягкие М (люкс), спальные Л, купейные К и плацкартные П. Комплексная оптимизация в полном объеме выполнялась для вагонов классов К, Л и М. Класс П относится к регулируемому сектору с фиксированной ценой, поэтому здесь оптимизировалось только количество вагонов.

Изменение схем составов по ходу движения является экстремальной ситуацией, поэтому находится неизменная по пути следования схема состава. В качестве исходной для расчета принимаются средневзвешенные значения населенности по классам вагонов. Такие значения рассчитываются как сумма произведений населенностей на перегонах на длину каждого перегона, поделенная на длину всего маршрута.

Используя историю продаж, содержащую данные о пассажирском спросе по некоторую дату d_1 включительно, для последующего временного интервала $[d_1 + 1, d_2]$ АСУРПП выполняет прогнозный расчет спроса, а затем методами КО рассчитывает оптимальные цены для каждого класса и наиболее экономичные варианты схем составов на каждый рейс.

Результаты расчетов годового технико-экономического эффекта от КО за 2018 г. представлены в табл. 1 и 2 — соответственно для коэффициентов расхода 0,6 и 0,3. Под коэффициентом расхода понимается уровень расходов на рейс, выраженный в относительных единицах. В столбцах «Результат КО» приведена разность данных между «После КО» и «До КО».

Применительно к табл. 1 и 2 предполагалось, что составы переформируются по обоим концам маршрута. Однако в большинстве случаев изменение схем составов осуществляется лишь на станциях формирования поездов. Тогда схемы следует оптимизировать по показателям, усредненным за рейсы туда и обратно, финансовый результат при этом несколько снижается. В приведенном примере это снижение составило 5,6%. В подавляющем большинстве случаев для достаточно длительного периода снижение не превышает 10%. Суммарный экономический эффект от КО остается высоким.

В табл. 3 дан практический пример оптимального формирования схем составов поезда «Карелия» как при формировании составов на каждый рейс, так и при одинаковых схемах туда и обратно. Именно такие детальные рекомендации позволяют оптимизировать эксплуатацию подвижного состава линейными предприятиями.

Подчеркнем, что методом КО на годовой период предварительно определяются оптимальные схемы составов и базовые цены на каждый рейс. Система технико-экономического анализа в реальном времени регистрирует результаты перевозок и передает их в систему мониторинга. В случае отклонения реаль-

Таблица 1

Комплексная оптимизация поезда «Карелия». Коэффициент расходов $\lambda = 0,6$

Table 1

Complex optimization of the Karelia train. Cost coefficient $\lambda = 0,6$

Наименование показателей	Значение показателей		
	До КО	После КО	Результат КО
Доходы, тыс. руб.	877 856	906 280	28 424 (3,14 %)
Расходы, тыс. руб.	789 445	589 409	-200 036 (-25,34 %)
Финансовый результат, тыс. руб.	91 417	317 870	226 453 (35,07 %)
Финансовый результат, в % от дохода до КО	10,38	36, 21	25,80
Объемы перевозок, чел.	216 087	216 355	268 (0,12 %)
Населенность, %	62	89	27 (43,55 %)
Средняя составность поезда, вагонов/состав/рейс	12,05	8,99	-3,06 (-25,39 %)

Таблица 2

Комплексная оптимизация поезда «Карелия». Коэффициент расходов $\lambda = 0,3$

Table 2

Complex optimization of the Karelia train. Cost coefficient $\lambda = 0,3$

Наименование показателей	Значение показателей		
	До КО	После КО	Результат КО
Доходы, тыс. руб.	877 856	1 202 572	324 716 (36,99 %)
Расходы, тыс. руб.	394 723	489 344	94 621 (23,97 %)
Финансовый результат, тыс. руб.	483 133	713 229	230 096 (47,63 %)
Финансовый результат, в % от дохода до КО	55,04	81,25	26,21
Объемы перевозок, чел.	216 087	312 601	96 514 (44,66 %)
Населенность, %	62	84	22 (35,48 %)
Средняя составность поезда, вагонов/состав/рейс	12,05	14,94	2,89 (23,98 %)

ных данных от прогнозных АСУРПП корректирует прогнозы на краткосрочный период, соответствующий глубине продаж. При этом на всю глубину продаж на каждую дату схемы составов остаются неизменными, хотя эти схемы различны для разных дат. Таким образом, сохраняется как возможность маневра объемом предложения в зависимости от спроса, так и постоянство предложения в процессе продаж, что значительно повышает эффективность систем динамического ценообразования.

Таблица 3

Оптимальное формирование схем составов поезда № 17/18 при коэффициенте расходов $\lambda = 0,6$ (2018 г.)

Table 3

Optimal formation of train schemes for train No. 17/18 with cost coefficient $\lambda = 0.6$ (2018)

Число, месяц	Исходные схемы								КО для пары поездов				КО отдельно по рейсам туда и обратно							
	17				18				17/18				17				18			
	К	Л	М	П	К	Л	М	П	К	Л	М	П	К	Л	М	П	К	Л	М	П
19.07–20.07	5	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	5	3	1	1	5	4	2	1	5
20.07–21.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	5	3	1	1	5	4	2	1	5
21.07–22.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	6	3	1	1	4	5	2	1	6
22.07–23.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	7	4	1	1	5	6	1	1	7
23.07–24.07	6	1	1	6	6	1	1	6	4	2	2	6	4	2	1	5	5	2	2	6
24.07–25.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	6	3	2	2	5	5	1	1	6
25.07–26.07	6	1	1	7	6	1	1	7	4	1	1	6	4	1	1	6	4	1	1	5

Заключение. Представленные в настоящей статье принципы комплексной оптимизации, заложенные в основу построения автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок, и результаты оптимизации эксплуатации поезда «Карелия» посредством АСУРПП позволяют сформулировать следующее:

1. Пассажирский спрос на железнодорожном транспорте, а также технология перевозок обладают рядом особенностей, не позволяющих применять методы оптимизации перевозочного процесса, принятые для других видов транспорта.

2. Разработанные аналитические модели пассажирского спроса позволяют решать оптимизационные задачи, повышающие эффективность автоматизированных систем управления экономическими показателями перевозочного процесса.

3. Динамика пассажирского спроса на железнодорожном транспорте отличается особыми свойствами. С учетом этих свойств мультимодельная система прогнозирования АСУРПП на основе оценок характеристик соответствующих временных рядов автоматически осуществляет выбор наиболее подходящего метода прогноза, обеспечивая удовлетворительную точность при высоком уровне детализации прогнозов.

4. Уровень расходов на рейсы поездов радикально влияет на результат оптимизации перевозочного процесса при переменных схемах составов, поэтому критерий оптимизации в алгоритме КО учитывает как доходы, так и расходы на перевозку.

5. При относительно высоких расходах на рейсы оптимизация приводит к сокращению средней составности поездов и объемов перевозок при некотором повышении цен. Снижение расходов при тех же

исходных данных приводит к увеличению средней составности, снижению цен и росту объемов перевозок.

6. КО позволяет планировать формирование составов по оптимальным схемам на заданные периоды времени вплоть до года. Схемы составов остаются неизменными для каждой даты на всю глубину продажи, хотя для различных и даже соседних дат они могут отличаться в зависимости от прогнозного спроса. Это позволяет повысить эффективность динамического ценообразования в системе управления доходностью, которая удовлетворительно работает только при постоянном объеме предложения.

7. Прогнозирование вместе с последующей процедурой КО для поезда № 17/18 «Карелия» могло бы дать дополнительный финансовый результат за 2018-й год в размере свыше 200 млн руб., что составляет около 25 % от валового дохода, полученного без применения КО.

8. Возможный дополнительный финансовый результат по дерегулируемому сектору ОАО «ФПК» составляет не менее 10 млрд руб. в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Talluri K.T., van Ryzin G.J. The Theory and Practice of Revenue Management. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004. 713 p.
2. Венедиктов Г.Л., Кочетков В.М. Повышение рентабельности пассажирских железнодорожных перевозок методом комплексной оптимизации // Экономика железных дорог. 2013. № 11. С. 12–24.
3. Венедиктов Г.Л., Кочетков В.М. Экономические модели повышения доходности при жестком ограничении предложения // Экономика и математические методы. 2012. Т. 48. № 1. С. 111–118.
4. Венедиктов Г.Л., Кочетков В.М. Эффективные методы прогнозирования пассажирского спроса на железнодорожном транспорте // Экономика железных дорог. 2016. № 6. С. 36–45.

5. Реализация экономико-математических моделей в автоматизированных системах управления рентабельностью пассажирских перевозок / О.Ф. Мирошниченко [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 4. С. 33–39.

6. Повышение эффективности железнодорожных перевозок на базе автоматизированной системы управления рентабельностью / О.Ф. Мирошниченко [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2011. № 12. С. 56–60.

7. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. М.: Юнити, 1998. 1022 с.

8. Ефимов С.М. Методика анализа факторов, определяющих спрос на пассажирские перевозки // Мир транспорта. 2015. Т. 13. № 2. С. 114–120.

9. Van Westendorp P. NSS-Price Sensitivity Meter (PSM) – A new approach to study consumer perception of price // Proceedings of the ESOMAR Congress (Venice, 5–9 September 1976). Venice, 1976. P. 139–167.

10. Time Series Analysis: Forecasting and Control / G. Box [et al.]. Fifth edition. New York: Wiley, 2015. 712 p.

11. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to Time Series and Forecasting. New York: Springer, 2002. 434 p.

12. Канторович Г.Г. Анализ временных рядов // Экономический журнал Высшей школы экономики. 2002. Т. 6. № 2. С. 251–269.

13. Diebold F.X. Elements of Forecasting. [S. l.]: South-Western College Pub, 2007. P. 129–384.

14. Минашкин В.Г., Садовникова Н.А., Шмойлова Р.А. Оценка точности и надежности прогнозов [Электронный ресурс] // Бизнес-статистика и прогнозирование: учеб.-практ. пособие / Московский гос. ун-т экономики, статистики и информатики. М., 2008. Гл. 16. URL: <https://studfiles.net/preview/3490105/page:44> (дата обращения: 06.02.2020 г.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ВЕНЕДИКТОВ Геннадий Львович,

канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Экспресс-Л»

КОЧЕТКОВ Валерий Михайлович,

канд. физ.-мат. наук, руководитель проекта, ООО «Экспресс-Л»

Статья поступила в редакцию 29.07.2020 г., принята к публикации 21.09.2020 г.

Для цитирования: Венедиктов Г.Л., Кочетков В.М. Комплексная оптимизация эксплуатации пассажирских поездов на базе автоматизированной системы управления рентабельностью пассажирских перевозок // Вестник ВНИИЖТ. 2020. Т. 79. № 6. С. 343–350. DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-343-350>.

Comprehensive optimization of passenger trains operation based on an automated system for managing the profitability of passenger traffic

G. L. VENEDIKTOV, V. M. KOCHETKOV

Limited Liability Company “Ekspress-L” (LLC “Ekspress-L”), St. Petersburg, 194291, Russia

Abstract. The article is devoted to solving the problem of optimizing the tariff policy, which is relevant for the passenger complex, with the most rational use of the rolling stock. Principles of economic and mathematical modeling are presented in order to determine the optimal number of cars in passenger trains and prices for travel in a single calculation process called complex optimization. Developed models make it possible to form optimal train schemes in accordance with the predicted demand, balancing supply and demand for transportation, which, in turn, radically increases its economic efficiency. Simultaneously with finding the optimal schemes by the method of complex optimization, such fares are determined at which the balance of supply and demand is achieved with the maximum possible economic effect. The article discusses the analytical models of passenger demand, the principles of implementation of the complex optimization procedure, the problems of forecasting passenger demand and the features of calculating the forecast of demand for the example of train No. 17/18 “Karelia” on the Petrozavodsk—Moscow route, and also offers a solution to the problem of determining the optimal prices and train schemes. On the example of real data of the operation of this train, the effectiveness of the automated system for managing the profitability of passenger traffic, created on the basis of complex optimization algorithms, was evaluated. It is shown that the developed analytical models of passenger demand allow solving optimization problems that increase the efficiency of automated control systems for the economic indicators of the transportation process, and the multi-model forecasting system provides satisfactory accuracy with a high level of forecast detail. Due to the fact that the level of expenses for train jour-

neys radically affects the result of optimization of the transportation process with variable train schemes, the adopted optimization criterion takes into account both income and transportation costs. The results of calculations are presented showing that the complex optimization procedure for the “Karelia” train could give a significant additional financial result.

Keywords: passenger railway transportation; demand; economic and mathematical modeling; complex optimization; forecasting; profitability management; automated system; automated system for managing the profitability of passenger traffic (ASURPP)

DOI: <https://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-343-350>

REFERENCES

1. Talluri K.T., van Ryzin G.J. *The Theory and Practice of Revenue Management*. Boston, Kluwer Academic Publishers, 2004, 713 p.

2. Venediktov G.L., Kochetkov V.M. *Povyshenie rentabel'nosti passazhirskikh zheleznodorozhnykh perevozok metodom kompleksnoy optimizatsii* [Increasing the profitability of passenger railway transportation by the method of complex optimization]. Railway Economy, 2013, no. 11, pp. 12–24.

3. Venediktov G.L., Kochetkov V.M. *Ekonomicheskie modeli povysheniya dokhodnosti pri zhestkom ogranichenii predlozheniya* [Economic models of increasing profitability under strict supply constraints]. Economics and Mathematical Methods, 2012, Vol. 48, no. 1, pp. 111–118.

4. Venediktov G.L., Kochetkov V.M. *Effektivnyye metody prognozirovaniya passazhirskogo sprosа na zheleznodorozhnom*

transporte [Effective methods of forecasting passenger demand on railway transport]. *Railway Economy*, 2016, no. 6, pp. 36–45.

5. Miroshnichenko O. F., Venediktov G. L., Kochetkov V. M., Pastukhov S. S. *Realizatsiya ekonomiko-matematicheskikh modeley v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya rentabel'nost'yu passazhirskikh perevozok* [Implementation of economic and mathematical models in automated control systems for the profitability of passenger traffic]. *Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute]*, 2011, no. 4, pp. 33–39.

6. Miroshnichenko O. F., Venediktov G. L., Popov E. V. *Povyshenie effektivnosti zheleznodorozhnykh perevozok na baze avtomatizirovannoy sistemy upravleniya rentabel'nost'yu* [Improving the efficiency of railway transportation on the basis of automated profitability management system]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2011, no. 12, pp. 56–60.

7. Ayvazyan S. A., Mkhitarian V. S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki* [Applied statistics and foundations of econometrics]. Moscow, Uniti Publ., 1998, 1022 p.

8. Efimov S. M. *Metodika analiza faktorov, opredelyayushchikh spros na passazhirskie perevozki* [Method of analysis of factors determining the demand for passenger transportation]. *World of Transport and Transportation*, 2015, Vol. 13, no. 2, pp. 114–120.

9. Van Westendorp P. *NSS-Price Sensitivity Meter (PSM) — A new approach to study consumer perception of price*. Proceedings of the ESOMAR Congress (Venice, September 5–9, 1976). Venice, 1976, pp. 139–167.

10. Box G., Jenkins G., Reinsel G., Lyung G. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Fifth edition. New York, Wiley Publ., 2015. 712 p.

11. Brockwell P. J., Davis R. A. *Introduction to Time Series and Forecasting*. New York, Springer Publ., 2002, 434 p.

12. Kantorovich G. G. *Analiz vremennykh ryadov* [Analysis of time ranges]. *Higher schools of Economics economic journal*, 2002, Vol. 6, no. 2, pp. 251–269.

13. Diebold F. X. *Elements of Forecasting*. [S. l.], South-Western College Pub, 2007, pp. 129–384.

14. Minashkin V. G., Sadovnikova N. A., Shmoylova R. A. *Otsenka tochnosti i nadezhnosti prognozov* [Assessment of the accuracy and reliability of forecasts]. *Biznes-statistika i prognozirovaniye: ucheb.-prakt. posobie* [Business statistics and forecasting: educational and practical manual]. *Moskovskiy gos. un-t ekonomiki, statistiki i informatiki* [Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics]. Moscow, 2008, chapter 16. URL: <https://studfiles.net/preview/3490105/page:44> (retrieved on 06.02.2020) (in Russ.).

ABOUT THE AUTHORS

Gennadiy L. VENEDIKTOV,
Cand. Sci. (Eng.), General Director of LLC “Ekspress-L”

Valeriy M. KOCHETKOV,
Cand. Sci. (Phys.-Math.), Project Manager, LLC “Ekspress-L”

Received 29.07.2020

Accepted 21.09.2020

■ E-mail: gennady@konsalt.net (G. L. Venediktov)

For citation: Venediktov G. L., Kochetkov V. M. Comprehensive optimization of passenger trains operation based on an automated system for managing the profitability of passenger traffic // *VNIIZHT Scientific Journal*. 2020. 79 (6): 343–350 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2020-79-6-343-350>.

ПОДПИСКА

«Вестник ВНИИЖТ» ГДЕ подписаться?

Подписку на научно-технический журнал «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ») можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ и др.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (495) 602-80-37, факс: +7 (499) 262-00-70, E-mail: journal@vniizht.ru. Информация о подписке размещена на сайте журнала www.journal-vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут оформить подписку на журнал «Вестник ВНИИЖТ» в агентстве «Урал-Пресс» (Ural-Press, export@ural-press.ru).