

Принятие решений в условиях частичной неопределенности исходной информации при введении скоростного движения на существующих линиях

Т. А. Дубровская¹, В. С. Миронов² ✉

¹ Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь

² Российский университет транспорта РУТ(МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

✉ vsm46@mail.ru

Резюме

В условиях частичной неопределенности принять окончательное решение об итоге какого-то события не представляется возможным. В данном случае лицо, принимающее решение, руководствуется либо собственными предпочтениями, рискуя принять неверное решение, либо использует критерий выбора из конкурентоспособных вариантов. В различных ситуациях варианты могут быть заданы с какой-либо долей вероятности осуществления. Это, в свою очередь, дает возможность проанализировать каждое решение и выбрать наиболее эффективное с минимальными потерями. Реконструктивные мероприятия для повышения скоростей движения на железной дороге должны проектироваться так, чтобы были обеспечены безопасность и бесперебойность движения поездов, сократилось время пассажиров в пути при обеспечении потребных размеров перевозок и наименьших строительно-эксплуатационных расходах. Теория принятия решений помогает выбрать оптимальный вариант реконструкции участка железной дороги. Необходимость принимать решения, для которых не полностью учтены предопределяющие их условия, а также последующее их влияние, встречаются во всех областях техники, в частности при введении скоростного движения на железных дорогах. Методику выбора технических параметров реконструкции при повышении скоростей движения в условиях неопределенности исходной информации можно проводить согласно алгоритму, предложенному в статье, суть которого заключается в установлении множества расчетных условий и назначении различных вариантов, способных сформировать матрицу показателей частных критериев. Следующим этапом является уже принятие решения в условиях неопределенности с помощью различных критериев: минимаксный критерий (ММ-критерий, критерий Вальда), критерий Севиджа (S-критерий, критерий минимального риска), критерий Гермейера, критерий произведений (Р-критерий) и др. Каждый из критериев может дать лицу, принимающему решение, конкретный алгоритм действий.

Ключевые слова

железная дорога, реконструкция, принятие решений, неопределенность, минимаксный критерий, критерий Севиджа, критерий Геймейера, критерий произведений, алгоритм действий

Для цитирования

Дубровская Т.А. Принятие решений в условиях частичной неопределенности исходной информации при введении скоростного движения на существующих линиях / Т.А. Дубровская, В.С. Миронов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 126–133. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).126-133

Информация о статье

поступила в редакцию: 15.06.2020, поступила после рецензирования: 14.07.2020, принята к публикации: 13.08.2020

Decision-making in the conditions of partial uncertainty of background information when introducing speed traffic on existing lines

T. A. Dubrovskaya¹, V. S. Mironov² ✉

¹ Belarusian State University of Transport, Gomel, the Republic of Belarus

² Russian University of Transport RTH (MIIT), Moscow, the Russian Federation

✉ and_kryukov@mail.ru

Abstract

Decision making under uncertainty is based on the fact that the probabilities of different scenarios are unknown. In this case the subject is guided, on the one hand, by his risk preference, and on the other hand, by the criterion of selection from all alternatives according to the compiled "decision matrix". Decision making under risk conditions is based on the fact that each situation can be given the probability of its realization. This allows you to weigh each of the efficiency values and choose the situation with the lowest risk level for implementation. Reconstructive measures to increase the speeds on the railway should be designed to provide the safety and uninterrupted operation of trains, reduce the time of passengers on the way, while ensuring the required volume of transportation and the lowest construction and operating costs. The solution of the tasks of designing the reconstruction of the railway is carried out on the basis of decision theory methods. The need to make decisions for which their predetermining conditions are not fully taken into account, as well as their subsequent influence, are encountered in all areas of technology, in particular, with the introduction of

high-speed traffic on railways. The technique of selecting technical parameters of reconstruction with increasing speeds in conditions of uncertainty of the initial information can be carried out according to the algorithm proposed in the article, the essence of which is to establish a set of design conditions and assign various options that can form a matrix of indicators of particular criteria. The next step is to make a decision under conditions of uncertainty using various criteria: minimax criterion (MM-criterion, Wald's criterion), Savage's criterion (S-criterion, minimum risk criterion), Hermeyer's criterion, production criterion (P-criterion) and others. Each of the criteria can give the decision-maker a specific algorithm of actions.

Keywords

railway, reconstruction, decision making, uncertainty, minimax criterion, Savage's criterion, Hermeyer's criterion, production criterion, algorithm of actions.

For citation

Dubrovskaya T. A., Mironov V. S. Prinyatie reshenii v usloviyakh chastichnoi neopredelennosti iskhodnoi informatsii pri vvedenii skorostnogo dvizheniya na sushchestvuyushchikh liniyakh [Decision-making in the conditions of partial uncertainty of background information when introducing speed traffic on existing lines]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, No. 3(67), pp. 126–133. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).126-133

Article Info

Received: 15.06.2020, Revised: 14.07.2020, Accepted: 13.08.2020

Введение

В Республике Беларусь одной из основных задач на Белорусской железной дороге является повышение скоростей движения. Ближайшая перспектива 160 км/ч [1]. Повышение скоростей движения на существующих линиях можно осуществлять за счет реконструкции инфраструктуры железной дороги [2].

При проектировании железных дорог из-за сложности и многообразия строительных и эксплуатационных условий объекта во многих случаях приходится рассматривать большое число вариантов и выбирать из них наиболее рациональный по принятому критерию при заданных ограничениях.

Основной причиной возникновения проблемы принятия решений является поиск варианта с оптимальным критерием, помимо которого в процессе принятия решений должны учитываться и другие факторы, понять и оценить которые позволяет теория принятия решений [3, 4].

Основные положения этой теории [5]:

1. Множество целей. В задачах принятия решений обычно имеется несколько целей, как правило, противоречивых, причем не обязательно эти цели имеют формальный характер, как в многокритериальных задачах.

2. Неопределенность. В момент принятия решения (выбора варианта) можно только прогнозировать (утверждать с некоторой вероятностью) обстановку, которая сложится в будущем, например, размеры перевозок, как в недетерминированных задачах.

3. Будущие последствия принятия решения. Если решение задачи не исчерпывает проблемы, и спустя несколько лет придется принимать очередное решение, то необходимо учитывать, какие возможности могут открыться (или закрыться) в будущем вследствие принятия сегодняшнего решения.

4. Неформализуемые понятия. Исторические ценности, эстетические представления, комфортабельность, престиж, настроение и т. д. являются примерами

ми неформализуемых понятий, которые необходимо учитывать, но которые и усложняют задачу.

5. Проведение аналогий и сравнений. Сопоставление вариантов с отечественными и зарубежными аналогами и установление соответствия их лучшим мировым образцам являются необходимым элементом процедуры принятия решений.

6. Социальные, экологические и стратегические аспекты. В процессе принятия решений при проектировании железных дорог возникают два вида проблем: формальные и неформальные.

Эффективность методов оптимизации и объективность получаемых результатов при решении проектных задач зависят от правильной постановки задачи, ее формализации и выбора соответствующей стратегии поиска.

Недостоверность информации при принятии проектных решений по реконструкции железной дороги для скоростного движения обусловлены различными факторами, которые подлежат анализу с учетом индивидуальных особенностей каждого проекта [6].

В данном исследовании принятие решения заключается в выборе одного из возможных вариантов реконструкции железной дороги под высокие скорости. Необходимость реконструкции железной дороги при введении скоростного движения поездов обусловлена рядом причин.

Пассажирское движение снимает часть грузовых поездов, что особенно ощутимо в условиях возрастания скоростей движения пассажирских поездов. Основным показателем здесь является коэффициент съема, величина которого зависит от скоростей движения грузовых и пассажирских поездов, длин перегонов и их неидентичности, путевого развития станций, расчетного межпоездного интервала и ряда других факторов. В этой связи может возникнуть необходимость усиления мощности дороги – увеличения ее пропускной и провозной способности.

При скоростном движении для обеспечения комфортабельности пассажиров предъявляются более жесткие требования к плану линии. Кривые малых радиусов необходимо увеличивать, длины прямых вставок и переходных кривых – увеличивать для стабилизации подвижного состава на концах круговых кривых.

Для обеспечения безопасности и бесперебойности движения поездов пересечения с автодорогами необходимо осуществлять в разных уровнях. Требуется замена стрелочных переводов, переустройство пассажирских платформ.

Кроме того, должны быть модернизированы устройства СЦБ и связи, усилена контактная сеть и тяговые подстанции, а также приняты меры по защите окружающей среды.

Реконструктивные мероприятия для повышения скоростей движения на железной дороге должны проектироваться так, чтобы были обеспечены безопасность и бесперебойность движения поездов, сократилось время пассажиров в пути при обеспечении потребных размеров перевозок и наименьших строительно-эксплуатационных затратах.

Вопросы проектирования реконструкции железной дороги в условиях частичной неопределенности основываются на методах принятых решений и теории игр.

Процедура принятия решений состоит из следующих этапов: [7].

1. Содержательная постановка задачи – это словесное ее описание.

2. Формализация задачи позволяет привести задачу с помощью математических символов.

3. Выбор критерия. Критерий – это показатель, с помощью которого производится оценка вариантов.

4. Математическая постановка задачи. Множество параметров, участвующих в задаче, можно разделить на три группы: параметры цели (размеры перевозок) – x_1, x_2, \dots ; параметры системы (железнодорожной) – y_1, y_2, \dots ; критерий W .

Располагая параметрами и критерием, можно сформулировать математическую постановку задачи, т. е. найти такую совокупность удовлетворяющих ограничениям параметров $y_1, y_2 \dots$ системы (железнодорожной), при которой обеспечивались бы параметры цели $x_1, x_2 \dots$ (размеры перевозок) при минимальном (максимальном) критерии (денежных затратах) W .

5. Формирование множества возможных вариантов. Любая проектная задача имеет множество решений (вариантов).

6. Выделение множества допустимых вариантов. Варианты, входящие в множество возможных, но не удовлетворяющие ограничениям, накладываемым на параметры железной дороги, исключаются из рассмотрения. Остальные варианты образуют множество допустимых решений.

7. Выбор метода и решение задачи. Выбор метода заключается в установлении наиболее подходя-

щей математической процедуры для решения задачи, учитывающей ее формализованную модель, структуру критерия и ограничений.

Общий алгоритм принятия решения

На основе информации, получаемой в результате применения математического аппарата, а также анализа всех показателей вариантов, учитывающих взаимодействие подсистем, а также взаимодействие системы с окружающей средой и надсистемой, принимается решение [8, 9].

Методика выбора технических параметров реконструкции в условиях неопределенности исходной информации согласно данному алгоритму (рис. 1) происходит в установленном порядке.

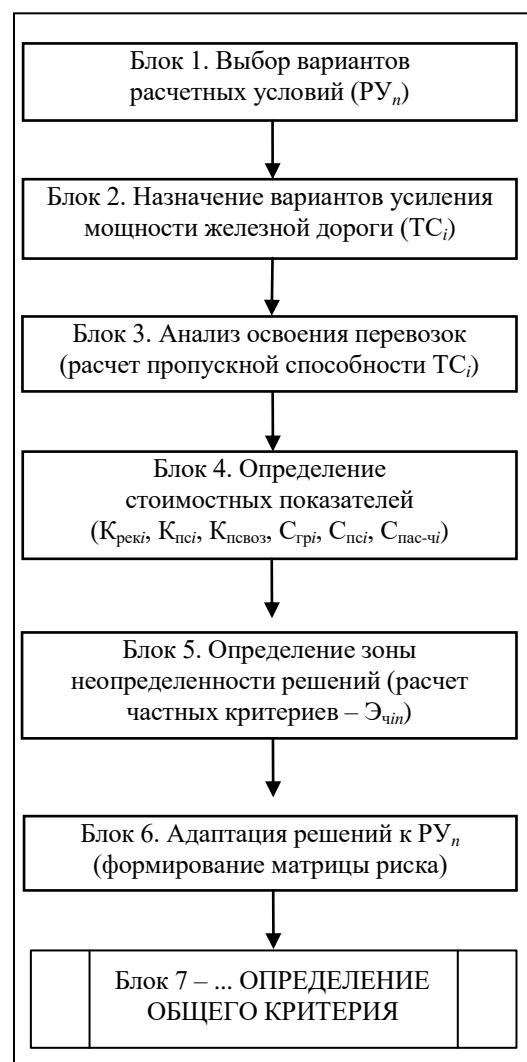


Рис. 1. Блок-схема алгоритма выбора технических параметров реконструкции для скоростного движения в условиях неопределенности

Fig. 1. Block diagram of the algorithm of selecting the technical parameters of the reconstruction for high-speed traffic in uncertainty conditions

В блоке 1 должны быть определены варианты расчетных условий (PY_n – сценариев, в которых будет осуществляться эксплуатация дороги) [11].

Необходимо выделить те факторы неопределенности, которые для данного проектного случая наиболее значимы. Кроме того, нужно определить варианты значения факторов неопределенности. Возможные сочетания вариантов значений факторов неопределенности определяют различные сценарии развития условий реализации проекта. Максимальное число вариантов составляет

$$N = \prod_{\phi=1}^{\Phi} R_{\phi},$$

где Φ – число факторов неопределенности $1 \dots \phi \dots \Phi$; R_{ϕ} – количество вариантов значений каждого фактора ϕ .

При установлении факторов неопределенности следует иметь в виду, что железнодорожная линия – это сложная техническая система большого линейного протяжения, расположенная в различных природных и техногенных условиях. Эти условия влияют на строительно-эксплуатационные показатели железной дороги, ее пропускную и провозную способности и должны быть изучены в процессе разработки проекта. Полученные данные могут быть неполными или содержать ошибки. Поэтому обоснованность выбранных для реконструкции железных дорог технических параметров зависит от учета в методах расчета условий неопределенности. При этом под неопределенностью понимается не полное отсутствие информации о тех или иных данных, а только то, что эти данные неточные, и возможно их изменение с течением времени. Например, капитальные затраты напрямую зависят от цен на материалы, стоимости работ, объемов выполняемых работ и других показателей [12]. Эксплуатационные расходы также имеют в своей структуре ряд составляющих, которые нельзя точно определить на перспективу. Коэффициент дисконтирования зависит от нормы дисконта E , которая также может изменяться с течением времени. Также могут существенно отличаться от прогнозируемых значений проектные грузо- и пассажиропотоки на расчетные годы эксплуатации [13].

Далее (блок 2) производится назначение возможных вариантов комплекса технических параметров и средств технического оснащения для усиления мощности реконструируемой железной дороги, определяющих ее техническое состояние после реконструкции (ТС_г).

Как правило, железные дороги, реконструируемые для скоростного движения пассажирских поездов, относятся к магистральным двухпутным лини-

ям с электрической тягой. Поэтому набор вариантов усиления мощности ограничен.

В состав мероприятий по увеличению пропускной способности следует включить реконструкцию постоянных устройств в неудовлетворительном состоянии для отмены временных ограничений скоростей, модернизацию устройств СЦБ для уменьшения межпоездного и станционных интервалов и др.

Возможно также увеличение массы грузовых поездов за счет усиления мощности тяговых средств или удлинения приемо-отправочных путей.

В некоторых случаях следует рассмотреть устройство дополнительного главного пути, а также перераспределение перевозок с использованием параллельных направлений или других видов транспорта.

В блоке 3 предполагается выполнить анализ освоения перевозок. Необходимо сделать тяговые расчеты и определить возможную пропускную способность намеченных технических состояний и, сопоставив их с потребной пропускной способностью, выявить их соотношение. Надо исключить состояния в некоторых расчетных условиях, если они не справляются с заданными размерами перевозок или предусмотреть возможность дополнительных мероприятий, позволяющих адаптировать линию к данным внешним расчетным условиям.

В блоке 4 выполняются расчеты по определению стоимости переустройства магистрали, обусловленной необходимостью усиления мощности линии и реконструктивными мероприятиями, связанными с реализацией высоких скоростей движения пассажирских поездов.

В этом же блоке нужно определить эксплуатационные расходы и стоимость времени нахождения пассажиров в пути. Кроме того, установить затраты на приобретение подвижного состава и найти величину возврата за счет реализации существующих вагонов и локомотивов.

На следующем этапе (блок 5) устанавливаются показатели частных критериев для всех назначенных технических состояний в каждом из расчетных случаев внешних условий, принятых к рассмотрению. Критерий, как правило, денежный, включает в себя составляющие, анализ которых выполнен в п. 3. При этом могут рассматриваться как одноэтапные, так и многоэтапные затраты в период эксплуатации дороги, принятый для сравнения. При использовании многоэтапных затрат, когда анализу подлежит этапное наращивание мощности линии, необходимо оптимизировать схему освоения перевозок при фиксированном начальном состоянии [14].

В результате должна быть сформирована матрица частных критериев, характеризующая назначенные технические состояния в каждом из вариантов расчетных условий (табл. 1) [15].

Таблица 1. Матрица показателей частных критериев проектных решений в различных расчетных условиях

Table 1. Matrix of indicators of particular criteria of design solutions in various design conditions

Решения i \ Расчетные условия n	1	...	n	...	N
1	$\mathcal{E}_{ч11}$	...	$\mathcal{E}_{ч1n}$	...	$\mathcal{E}_{ч1N}$
...
i	$\mathcal{E}_{чи1}$	...	$\mathcal{E}_{чин}$	...	$\mathcal{E}_{чиN}$
...
I	$\mathcal{E}_{чI1}$	...	$\mathcal{E}_{чIn}$	...	$\mathcal{E}_{чIN}$

Совокупность решений, охватывающая все расчетные внешние условия, составляет зону неопределенности для рассматриваемой задачи.

В блоке 6 необходимо рассмотреть варианты, удовлетворяющие поставленной задаче – обеспечение заданных размеров перевозок. В этом случае надо адаптировать решение к расчетным условиям – предусмотреть мероприятия по усилению пропускной и провозной способности или разгрузке линии за счет параллельных направлений.

На основании приведенных данных (см. табл. 1) формируется матрица рисков (табл. 2) по условию

$$r_{in} = \mathcal{E}_{чин} - \min \mathcal{E}_{чин},$$

где $\mathcal{E}_{чин}$ – показатель частного критерия для i -го проектного решения в n -х расчетных условиях; $\min \mathcal{E}_{чин}$ – показатель критерия для наиболее рационального проектного решения в расчетных условиях n .

Матрица рисков показывает дополнительные затраты для решения i по сравнению с наиболее рациональным решением в рассматриваемых расчетных условиях n .

Таблица 2. Матрица рисков
Table 2. Risk matrix

Решения i \ Расчетные условия	1	...	n	...	N
1	r_{11}	...	r_{1n}	...	r_{1N}
...
i	r_{i1}	...	r_{in}	...	r_{iN}
...
I	r_{I1}	...	r_{In}	...	r_{IN}

В блоках 7 – ... необходимо выбрать метод оценки решения в условиях неопределенности, определить общий критерий принятия решения и установить наиболее рациональное проектное решение с учетом всех расчетных условий.

Достоверность выбора технических параметров в проекте железнодорожной линии во многом зависит от

корректно принятого метода сравнения, а также критерия оптимальности решения.

После установления множества расчетных условий и назначения вариантов усиления мощности линии необходимо сформировать матрицу показателей частных критериев $\mathcal{E}_{чин}$.

В качестве критерия принимается минимум суммы приведенных строительно-эксплуатационных затрат и стоимости времени нахождения пассажиров в пути на расчетный год эксплуатации:

$$\mathcal{E}_ч = (K_{рек} + K_{пс} - K_{пс(возв)}) \cdot E \pm C_t + C'_{п-ч}.$$

К единовременным затратам, включенным в показатель критерия, отнесены капитальные вложения на реконструкцию дороги ($K_{рек}$) и приобретение подвижного состава ($K_{пс}$). Принят электропоезд «Ласточка», имеющий в допуске величину непогашенного ускорения $a_{пш} = 0,9 \text{ м/с}^2$.

Учтена возвратная стоимость за счет высвобождения используемых пассажирских вагонов и локомотивов ($K_{пс(возв)}$). Норма дисконта (E) взята равной 0,1.

Стоимость времени нахождения пассажиров в пути ($C'_{п-ч}$) определена с учетом ускорения движения.

Далее приведены результаты расчетов показателей критерия для принятых вариантов устройства в различных расчетных условиях:

- удлинение прямо-отправочных путей $l_{по}$;
- строительство III пути;
- удлинение прямо-отправочных путей $l_{по}$ совместно со строительством III пути (табл. 3).

На базе этих данных получается матрица рисков, показывающая дополнительные приведенные затраты (потери) по отношению к наиболее рациональному решению в каждом из расчетных условий. В каждом столбце матрицы находят минимальное значение $\min_i \mathcal{E}_{чин}$ и вычисляют разности по формуле

$$r_{in} = \mathcal{E}_{чин} - \min_i \mathcal{E}_{чин}.$$

Таблица 3. Матрица показателей частных критериев решений в различных расчетных условиях
Table 3. Matrix of indicators of partial decision criteria in various design conditions

Проектные решения i	Расчетные условия n					
	$n_{пс}=10 \text{ п.п.}$ $e_{п-ч}=3,3 \text{ у.е.}$	$n_{пс}=20 \text{ п.п.}$ $e_{п-ч}=3,3 \text{ у.е.}$	$n_{пс}=30 \text{ п.п.}$ $e_{п-ч}=3,3 \text{ у.е.}$	$n_{пс}=10 \text{ п.п.}$ $e_{п-ч}=6,6 \text{ у.е.}$	$n_{пс}=20 \text{ п.п.}$ $e_{п-ч}=6,6 \text{ у.е.}$	$n_{пс}=30 \text{ п.п.}$ $e_{п-ч}=6,6 \text{ у.е.}$
	1	2	3	4	5	6
Удл. $l_{по}$	0	0	4,008	0	0	4,008
II путь	5,824	15,843	1,281	5,824	15,843	1,281
Удл. $l_{по}$ + III путь	10,020	27,810	0	10,02	27,810	0

Расчет производится с помощью математических методов, помогающих лицу, принимающему решение, выбрать оптимальный вариант [16].

Минимаксный критерий (ММ-критерий, критерий Вальда)

Этот критерий использует оценочную функцию, соответствующую позиции крайнего пессимизма:

$$z_{MM} = \max_i e_{ir} = \max_i (\min_j e_{ij}),$$

т. е. множество оптимальных решений E_0 определяется соотношением

$$E_0 = \{E_{io} | E_{io} \in E \wedge e_{io} = \max_i (\min_j e_{ij})\}.$$

Выбранные таким образом варианты полностью исключают риск. Однако это достоинство стоит некоторых потерь. Применение ММ-критерия бывает оправдано, если ситуация характеризуется параметрами, когда о возможности появления состояний F_j ничего не известно; решение реализуется один или очень малое число раз; необходимо исключить какой бы то ни было риск.

Критерий Севиджа (S-критерий, критерий минимального риска)

Оценочная функция критерия Севиджа имеет вид

$$z_s = \min_i e_{ir} = \min_i (\max_j (\max_i e_{ij} - e_{ij})),$$

и множество оптимальных вариантов решения строится следующим образом:

$$E_0 = \{E_{io} | E_{io} \in E \wedge e_{io} = \min_i e_{ir}\}.$$

Величина $a_{ij} = \max_i e_{ij} - e_{ij}$ понимается как дополнительный выигрыш, если вместо варианта E_i в состоянии F_j выбрать другой, оптимальный для этого состояния результат.

Применяется критерий Севиджа, когда о возможности появления состояний F_j ничего не известно; решение реализуется один или очень малое число раз; допускается незначительный риск [17].

Кроме классических критериев для принятия решений в условиях неопределенности и риска используются расширенный минимаксный критерий, критерий произведений (Р-критерий), составной BL(ММ)-критерий, производные критерии Ходжа – Лемана (НЛ-критерий), Гурвица (НВ-критерий) и Гермейера (G-критерий) и др.

Критерий произведений (Р-критерий)

Данный критерий применяется при принятии решений в условиях неопределенности. Это более нейтральный критерий по сравнению с принципом максимина и критерием азартного игрока. Критерий произведений производит некое «выравнивание» между большими и малыми значениями Δ_{ij}

$$\min_i \prod_{j=1}^n \Delta_{ij}.$$

Критерий Ходжа – Лемана

Привносит фактор определенной субъективности при принятии решения. Решение принимается в условиях риска. Однако у ЛПР есть некое недоверие к распределению вероятностей состояний окружающей среды. Поэтому ЛПР вводит некий «коэффициент доверия» λ к вероятностям состояний окружающей среды ($j = 0 \div j = 1$), чтобы сильно не рисковать, обычно таким коэффициентом принимается 0,4. Этот коэффициент еще называется уровнем оптимизма.

Показатель эффективности стратегии A_i по критерию Ходжа – Лемана находится по формуле:

$$\min_i \left[\nu \sum_{j=1}^n p_j \cdot e_{i,j} + (1 - \nu) \max_j e_{i,j} \right].$$

Критерий Гурвица

Суть критерия заключается в том, показатель эффективности стратегии находится где-то между точками зрения крайнего оптимизма (критерий азартного игрока) и крайнего пессимизма (критерий максимина). Для этого вводят некий коэффициент λ – уровень пессимизма. Выбор уровня пессимизма – процесс субъективный. Чаще всего его выбирают равным либо 0,6, либо 0,5. После этого показатель эффективности стратегии A_i по критерию Гурвица находится по формуле:

$$\min_i \left[\lambda \max_j e_{i,j} + (1 - \lambda) \min_j e_{i,j} \right].$$

Критерий Гермейера

Этот критерий применяется в основном для решения задач выбора с целью оптимизации величины потерь или затрат [18]. Матрица потерь, задаваемая в условии, будет содержать отрицательные элементы (потери выражаются отрицательными величинами):

$$\min_i \max_j p_j \cdot e_{i,j},$$

где p_j – вероятности внешних состояний F_j , ($j = 1, 2, \dots, n$), $\sum_{j=1}^n p_j = 1$.

Выполнив расчет матрицы рисков по каждому из критериев, имеем итоговую таблицу со значением потерь для каждого из критериев (табл. 4).

Заключение

Таким образом, согласно критериям Байеса – Лапласа, Севиджа, критериям произведений, Ходжа – Лемана, Гурвица и Гермейера в качестве оптимального решения следует рекомендовать при реконструкции железной дороги под скоростное движение пассажирских поездов усилить ее мощность за счет удлинения приемо-отправочных путей, что позволит увеличить весовую норму и уменьшить потребное количество грузовых поездов.

Таблица 4. Матрица рисков по различным критериям
Table 4. Risk matrix by various criteria

Проектные решения i	Критерии					
	ММ-критерий	S-критерий	P-критерий	Ходжа – Лемана	Гурвица	Гермейера
	1	2	3	4	5	6
Удл. I _{по}	263,80	4,01	4,03E+13	220,31	173,41	-74,01
II путь	261,07	15,84	5,05E+13	223,01	176,67	-67,69
Удл. I _{по} + III путь	259,79	27,81	5,95E+13	225,48	179,17	-52,70

По критерию Вальда в качестве оптимального решения надо рекомендовать строительство третьего главного пути с удлинением прямо-отправочных путей. При этом возрастет возможная пропускная способность линии и сократится потребное число грузовых поездов.

Список литературы

1. Руденко Т.А. Оценка эффективности внедрения скоростного движения в Республике Беларусь // Наука МИИТа – транспорту : материалы междунар. науч.-практ. конф. М., 2013. С. II-14–II-15.
2. Ерофеев А.А., Ковтун П.В., Дубровская Т.А. Проблемы повышения скорости движения поездов на существующих железнодорожных линиях // Вестник БелГУТа. 2018. № 181. С. 57–60.
3. Миронов В.С., Ворончихин К.Ю. Выбор технических параметров железных дорог при проектировании с учетом условий неопределенности // Актуальные проблемы развития сети железных дорог региона. 2004. № 1. С. 45–47.
4. Миронов В.С., Ворончихин К.Ю. Поддержка принятия решения по выбору технических параметров железных дорог в условиях неопределенности // Актуальные проблемы развития сети железных дорог региона. Хабаровск. 2004. № 1. С. 75–86.
5. Кравченя И.Н., Руденко Т.А. Определение оптимальных скоростей движения поездов в кривых при введении скоростного движения // Транспорт и транспортная логистика : бюл. науч. работ Брянск. филиала МИИТ. 2013. № 2 (4). С. 15–17.
6. Гавриленков А.В. Теоретические основы проектирования скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей: монография. Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2004. 213 с.
7. Кравченя И.Н., Дубровская Т.А. Определение параметров реконструкции железной дороги для скоростного движения с учетом неопределенности // Транспорт и транспортная логистика : бюл. науч. работ Брянск. филиала МИИТ. 2015. № 1 (7). С. 24–29.
8. Халина В.Г. Теория принятия решений : учебник. М. : Юрайт, 2016. 250 с.
9. Лемешко В.Г. В интересах всех участников транспортного рынка // Железнодорожный транспорт. 2011. № 8. С. 16–21.
10. Кравченя И.Н., Бурдук Е.Л., Алымова Т.В. Математическое моделирование. Линейное и нелинейное программирование, сетевое планирование и управление. Гомель : БелГУТ, 2014. 112 с.
11. Оценка основных параметров железнодорожных кривых при установлении их максимальных скоростей / И.П. Корженевич, Д.Н. Курган и др. // Строительство. 2002. № 10. С. 28–34.
12. Принятие решений в условиях неопределенности: учебник / Л.А. Демидова, В.В. Кираковский и др. М. : Горячая линия-Телеком, 2015. 284 с.
13. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике. Полный курс. М. : Айрис Пресс, 2017. 212 с.
14. Теория вероятностей и математическая статистика / П.С. Геворкян, А.В. Потемкин и др. М. : Физматлит, 2016. 176 с.
15. Дубровская Т.А. Обоснование параметров реконструкции железной дороги для введения скоростного движения с учетом неопределенности исходной информации // Изв. Транссиба. 2019. № 1 (37). С. 122–129.
16. Жогаль С.П., Каморникова Т.Я. Методы принятия решения и экспертного выбора: тексты лекций. Гомель : Изд-во ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. 79 с.
17. Thibaut Limon, Yves Crozet Risk analysis and high speed rail projects in France: introducing economic slowdown into appraisal methodologies // Transportation Research Procedia. 2017. С. 2828–2846. URL: https://www.researchgate.net/publication/317423463_Risk_analysis_and_high_speed_rail_projects_in_France_introducing_economic_slowdown_into_appraisal_methodologies (Дата обращения 08.07.2020).
18. Бродецкий Г.Л., Гусев Д.А. Особенности реализации алгоритмов оптимизации стратегии управления запасами в условиях неопределенности // Логистика и управление цепями поставок. 2007. № 1. С. 74–93.

References

1. Rudenko T.A. Otsenka effektivnosti vnedreniya skorostnogo dvizheniya v Respublike Belarus' [Evaluation of the effectiveness of the introduction of high-speed traffic in the Republic of Belarus]. *Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Nauka*

МИИТа – транспорт” [Materials of the Intern. scientific-practical conf. “Science of MIIT is for transport”]. Moscow, 2013, pp. II – 14 – II – 15.

2. Erofeev A.A., Kovtun P.V., Dubrovskaya T.A. Problemy povysheniya skorosti dvizheniya poezdov na sushchestvuyushchikh liniyakh [Problems of increasing the speed of trains on existing railway lines]. *Vestnik BelGUTA [Bulletin of BSUT]*, 2018. No. 2 (37). Pp. 57–59.

3. Mironov V.C., Voronchikhin K.Yu. Vybor tekhnicheskikh parametrov zheleznykh dorog pri proyektirovani s uchedom uslovii neopredelennosti [The choice of technical parameters of railways in the design, taking into account the conditions of uncertainty]. *Aktual'nye problemy razvitiya seti zheleznykh dorog regiona – collection of works [Actual problems of development of the regional railway network]*, 2004. No. 1. Pp. 45–47.

4. Mironov V.S., Voronchikhin K.Yu. Podderzhka prinyatiya resheniya po vyboru tekhnicheskikh parametrov zheleznykh dorog v usloviyakh neopredelennosti [Decision support for the choice of technical parameters of railways in conditions of uncertainty]. *Aktual'nye problemy razvitiya seti zheleznykh dorog region [Actual problems of development of the regional railway network]*, 2004. No. 1. Pp. 75–86.

5. Kravchenya I.N., Rudenko T.A. Opredeleniye optimal'nykh skorostei dvizheniya poezdov v krivykh pri vvedenii skorostnogo dvizheniya [Determination of optimal train speeds in curves with the introduction of high-speed traffic]. *Transport I transportnaya logistika : Byulleten' nauchnykh rabot Bryanskogo filiala MIIT [Transport and transport logistics: Bulletin of scientific works of the Bryansk branch of MIIT]*. Moscow, 2013. No. 2 (4). Pp. 15–17.

6. Gavrilentsov A.V. Teoreticheskie osnovy proyektirovaniya skorostnykh i vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralей [Theoretical foundations of designing speeding and high-speed railway lines]. Khabarovsk: DVGUPS Publ., 2004, 213 p.

7. Kravchenya I.N., Rudenko T.A. Opredeleniye parametrov rekonstruktsii zheleznoi dorogi dlya skorostnogo dvizheniya s uchedom neopredelennosti [Determination of the parameters of the reconstruction of the railway for high-speed traffic, taking into account the uncertainty]. *Transport I transportnaya logistika : Byulleten' nauchnykh rabot Bryanskogo filiala MIIT [Transport and transport logistics: Bulletin of scientific works of the Bryansk branch of MIIT]*. Moscow, 2015. No. 1 (7). Pp. 24–29.

8. Khalina V.G. *Teoriya prinyatiya reshenii* [Decision making theory]. Moscow: Yurait Publ., 2016, 250 p.

9. Lemesenko V.G. V interesakh vseh uchastnikov transportnogo rynka [In the interests of all participants in the transport market]. *Zheleznodorozhnyi transport [Railway Transport]*, 2011. No. 8. Pp. 24–26.

10. Kravchenya I.N., Burduk E.L., Alymova T.V. Matematicheskoe modelirovanie. Lineinoe i nelineinoe programmirovaniye, setevoye planirovanie i upravlenie [Mathematical modeling. Linear and nonlinear programming, network planning and management]. Gomel: BelSUT Publ., 2014, 112 p.

11. Korzhenevich I.P., Kurgan D.N., Kurgan N.B., Rengach N.G. Otsenka osnovnykh parametrov zheleznodorozhnykh krivykh pri ustanovlenii ikh maksimal'nykh skorostei [Evaluation of the main parameters of railway curves when establishing their maximum speeds]. *Stroitel'stvo [Construction]*, 2002. No. 1 (17). Pp. 28–34.

12. Demidova L.A., Kirakovskii V.V., Pyl'kin A.N. *Prinyatiye reshenii v usloviyakh neopredelennosti* [Decision making in the conditions of uncertainty]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2015, 284 p.

13. Pis'mennyi D.T. *Konspekt lektsii po vysshei matematike. Polnyi kurs* [Lecture notes in higher mathematics. Full course]. Moscow: Ayris Press Publ., 2017, 212 p.

14. Gevorkyan P.S., Potemkin A.V. et al. *Teoriya veroyatnostoni i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics: a textbook]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2016, 176 p.

15. Dubrovskaya T.A. Obosnovaniye parametrov rekonstruktsii zheleznoi dorogi dlya vvedeniya skorostnogo dvizheniya s uchedom neopredelennosti iskhodnoi informatsii [Justification of the parameters of the reconstruction of the railway for the introduction of high-speed traffic, taking into account the uncertainty of the initial information]. *Izvestia Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, Omsk, 2019. No. 1 (37). Pp. 122–129.

16. Zhogal' S.P., Kamornikova T.Ya. *Metody prinyatiya resheniya i ekspertnogo vybora : teksty lektsii* [Methods of decision making and expert choice: texts of lectures]. Gomel: Skorina GSU Publ., 2009, 79 p.

17. Limon T., Crozet Y. Risk analysis and high speed rail projects in France: introducing economic slowdown into appraisal methodologies. *Transportation Research Procedia*, 2017. Pp. 2828–2846. URL: (https://www.researchgate.net/publication/317423463_Risk_analysis_and_high_speed_rail_projects_in_France_introducing_economic_slowdown_into_appraisal_methodologies).

18. Brodetskii G.L., Gusev D.A. Osobennosti realizatsii algoritmov optimizatsii strategii upravleniya zapasami v usloviyakh neopredelennosti [Features of the implementation of algorithms for optimizing the strategy of asset management in conditions of uncertainty]. *Logistika i upravleniye tsepyami postavok [Logistics and Supply Chain Management]*, 2002. No. 1.

Информация об авторах

Дубровская Татьяна Алексеевна – старший преподаватель кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, e-mail: rt-555@yandex.ru

Миронов Виктор Степанович – к. т. н., профессор кафедры проектирования и строительства железных дорог, Российский университет транспорта, г. Москва, e-mail: vsm46@mail.ru

Information about the authors

Tat'yana A. Dubrovskaya – Senior Lecturer of the Subdepartment of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State University of Transport, Gomel, e-mail: rt-555@yandex.ru

Viktor S. Mironov – Ph.D. in Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Design and Construction of Railways, Russian University of Transport, Moscow, e-mail: vsm46@mail.ru