

УДК 656.212

Р. В. ВЕРНИГОРА^{1*}, В. В. МАЛАШКИН^{2*}

^{1*} Каф. «Станции и узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 373-15-12, эл. почта romav1@yandex.ua, ORCID 0000-0001-7618-4617

^{2*} Каф. «Станции и узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 371-51-03, эл. почта malaxa79@mail.ru, .ORCID 0000-0002-5650-1571

МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

В статье приведена методика оценки и определения эффективных вариантов проектных решений, направленных на совершенствование технических и технологических параметров железнодорожных станций. Указанную задачу предлагается решать как задачу векторной оптимизации.

При совершенствовании технико-технологических параметров железнодорожных станций разрабатываются возможные варианты соответствующих организационно-технических мероприятий. Каждый вариант может быть охарактеризован двумя интегральными показателями: количественным (например, затратами на реализацию варианта) и качественным (например, перерабатывающая способность станции). Задача состоит в определении таких вариантов проектных решений, реализация которых обеспечивала бы наибольшую эффективность (оптимальное значение качественного показателя) при определенном (заданном) значении количественного показателя (объемах расходов).

Качественные и количественные показатели, оценивающие каждый из проектов усовершенствования станции, предлагается определять с использованием разработанной авторами эргатической функциональной модели станции.

Задача векторной оптимизации решается с помощью функции Лагранжа. При этом на основе исходного множества вариантов проектных решений формируется множество эффективных вариантов, каждый из которых обеспечивает улучшение значения качественного показателя (перерабатывающей способности станции) при увеличении значения количественного показателя (расходов на реализацию варианта).

Апробация предложенной методики выполнена при определении эффективного комплекса мер, направленных на совершенствование работы парка прибытия одной из крупных сортировочных станций Украины. С этой целью были разработаны 48 вариантов возможных организационно-технических мероприятий. Для определения показателей эффективности каждого варианта выполнено серию экспериментов с эргатической моделью станции. На основе решения задачи векторной оптимизации было определено множество эффективных проектных решений, обеспечивающих максимальную перерабатывающую способность парка прибытия станции в зависимости от выделенных средств.

Ключевые слова: железнодорожная станция, оценка проектных решений, функциональное моделирование, векторная оптимизация, функция Лагранжа, эффективность использования ресурсов.

Введение

Современный рынок транспортных услуг Украины характеризуется жесткой конкуренцией между перевозчиками. В этих условиях для железнодорожного транспорта особую актуальность приобретает задача снижения себестоимости перевозочного процесса.

Как показывает анализ статистических данных, за период 2005-2014 г. величина оборота грузового вагона выросла в 2 раза (с 4,34 сут. до 8,66 сут.) [1]; этот тренд наблюдается и в 2015-2016 г. Следует также отметить, что в структуре оборота вагона собственно «чистое» время в движении составляет всего около 12 %, а остальное время – это простой на станциях:

под грузовыми операциями (43 %), на технических станциях (43 %) и на промежуточных станциях (2 %) [2]. В этой связи одним из основных направлений обеспечения высокой эффективности эксплуатационной работы железных дорог является минимизация времени нахождения вагонов на станциях. С этой целью, с одной стороны, станции должны обладать достаточным резервом пропускной и перерабатывающей способности для погашения пиковых нагрузок; с другой – необходимо минимизировать собственные расходы станций, сокращая избыточный технический потенциал. Приведение параметров станций к экономически рациональному уровню требует эффективных

подходов к оценке соответствующих проектных решений. Получение подобной оценки невозможно без использования современного математического аппарата.

Анализ литературных источников и постановка задачи исследования

Получение достоверной оценки планируемых организационно-технических мероприятий (ОТМ), направленных на повышение эффективности работы станций является одной из задач системы технико-экономического управления, которая в последние годы внедряется на железнодорожном транспорте Украины.

Для решения задач технико-экономического управления на железнодорожном транспорте разрабатываются и внедряются современные системы поддержки принятия решений (СППР), которые на основе анализа имеющейся информации об объекте управления (станции, диспетчерском участке и т.д.) предлагают рациональный (в большинстве случаев наиболее экономически выгодный) вариант действий по управлению данным объектом [3-7]. Одной из основных проблем, возникающих при разработке такого рода систем, является прогнозирование технико-эксплуатационных показателей функционирования объекта при реализации того или иного управленческого решения. Так, в работах [3, 4] рассматривается методика построения СППР для оптимизации распределения материально-технических и финансовых ресурсов между подразделениями железнодорожной сети. При этом проблема прогнозирования результатов работы отдельных подразделений железной дороги решается с использованием аппарата нечеткой логики.

В [5, 6] рассмотрены СППР, позволяющие прогнозировать работу станций в тех или иных условиях и на основании этого принимать обоснованные решения по управлению их функционированием. В основе каждой из предложенных СППР лежит имитационная модель станции, использующая при моделировании данные о технико-технологических параметрах станции, а также информацию о прогнозируемых условиях работы.

Заслуживает также внимания опыт железных дорог Германии [7]. Здесь разработан моделирующий имитационный комплекс RailSys, который используется для оценки эффективности капиталовложений в развитие инфраструктуры железнодорожных станций и участков. В комплекс RailSys входят имитационные модели различных станций и участков сети. Каждая

модель отражает техническое оснащение и технологию работы определенного объекта. Предусмотрены специальные средства редактирования моделей, которые позволяют внести в них изменения в соответствии с ОТМ, планируемыми при модернизации объекта.

Одной из основных проблем, возникающих при создании функциональных моделей железнодорожных станций (ФМС), является имитация действующих систем управления, основным звеном которых является человек-диспетчер. Очевидно, что без адекватного моделирования указанных систем невозможно получение достоверной количественной оценки показателей функционирования станций. В этой связи при разработке СППР, предназначенных для исследования и оптимизации работы железнодорожных станций, целесообразно использовать эргатические модели, в функционировании которых человек принимает непосредственное участие, выполняя функции диспетчера [8, 9]. Такие модели наиболее точно учитывают факторы, связанные с поведением человека, и позволяют в процессе моделирования имитировать процессы принятия управленческих решений. Одной из задач, которые могут решаться с помощью эргатических имитационных моделей железнодорожных станций, является исследование и технико-экономическая оценка различных ОТМ, направленных на совершенствование технического оснащения и технологии работы станций. Для этих целей после построения и идентификации модели выполняются серия экспериментов при различных вариантах технического оснащения и технологии работы станции. ФМС позволяет по результатам моделирования установить значения технико-эксплуатационных показателей, которые используются для анализа работы станции, а также для технико-экономического сравнения и выбора вариантов совершенствования конструкции и технологии ее работы [10, 11].

Однако при этом возникает задача выбора наиболее эффективных вариантов ОТМ из множества возможных к реализации. В данной статье рассмотрена методика такого выбора, которая основана на принципах теории векторной оптимизации.

Постановка задачи векторной оптимизации параметров станций

С помощью ФМС железнодорожной станции можно получить количественные значения параметров, характеризующих каждый из воз-

можных вариантов ОТМ, направленных на совершенствование конструкции и технологии ее работы. Каждый вариант можно укрупненно охарактеризовать двумя интегральными показателями: количественным (например, затраты на реализацию варианта) и качественным (например, простой вагонов на станции; перерабатывающая способность станции). В большинстве случаев на реализацию комплекса ОТМ выделяется определенный лимит ресурсов (денежных, материальных, трудовых и т.д.). При этом возникает проблема выбора варианта, на который следует направить выделенные средства для получения максимального эффекта. Для решения указанной задачи разработана методика, основанная на принципах векторной оптимизации.

Следует отметить, что методы векторной оптимизации в настоящее время достаточно широко применяются при решении задач, связанных с определением рациональных вариантов организации работы объектов железнодорожного транспорта. Так, в работе [12] методами векторной оптимизации решается задача формирования вариантов рациональной сети линий высокоскоростного движения поездов в Украине. В [13, 14] на основе векторной оптимизации разработаны методики определения дополнительных тарифных ставок за ускорение доставки грузов, позволяющие строить экономически обоснованные отношения между грузоотправителями и железной дорогой. В [15] этими методами предлагается определять рациональные параметры поездопотоков, а в [16] на основе векторной оптимизации рассчитываются рациональные параметры процесса доставки грузов железнодорожным транспортом. В фундаментальной работе [17] методы векторной оптимизации используются для структурного анализа транспортных систем.

При формализации задачи векторной оптимизации станция или ее отдельная подсистема рассматривается как сложная система, состоящая из множества элементов, к которым можно отнести путевое развитие, систему обслуживания, систему управления и др. Комплекс мероприятий γ_i , направленных на повышение эффективности функционирования станции, в общем случае предусматривает проведение работ на каждом таком элементе:

$$\gamma_i = \{\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_j, \dots, \Theta_n\}, \quad (1)$$

где Θ_j – множество возможных мероприятий на j -м элементе станции (реконструкция горловин;

изменение числа путей, количества исполнительных технологических операций и др.);

n – общее количество элементов станции, для которых планируется модернизация.

На реализацию каждого из мероприятий Θ_{ij} комплекса γ_i требуются определенные затраты средств $Z(\Theta_{ij})$. С другой стороны, реализация мероприятия Θ_{ij} позволяет получить определенное значение показателя его эффективности $\Psi(\Theta_{ij})$. Конкретные значения указанных показателей могут быть определены по результатам моделирования работы станции. Таким образом, суммарные затраты средств по соответствующему варианту γ_i определяются как

$$Z(\gamma_i) = \sum Z(\Theta_{ij}), \quad \Theta_{ij} \in \gamma_i. \quad (2)$$

Значение показателя эффективности каждого варианта составит:

$$\Psi(\gamma_i) = \sum \Psi(\Theta_{ij}), \quad \Theta_{ij} \in \gamma_i. \quad (3)$$

Набор возможных вариантов составляет множество $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k\}$. Решением задачи является подмножество $\Gamma^* = \{\gamma_1^*, \gamma_2^*, \dots, \gamma_m^*\}$, для каждого из элементов которого выполняется условие

$$\begin{pmatrix} Z(\gamma^*) \\ \Psi(\gamma^*) \end{pmatrix} \rightarrow \min. \quad (4)$$

Указанная задача в изложенной постановке является задачей векторной оптимизации и может быть решена с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа [17, 18]. Результатом решения является подмножество точек, каждая из которых при заданной величине затрат $Z(\gamma^*)$ определяет рациональный комплекс мероприятий γ^* . При этом полученное подмножество точек Γ^* включает лишь так называемые эффективные решения, каждое из которых предусматривает улучшение значения качественного показателя при увеличении затрат.

При постановке задачи определения рационального комплекса мероприятий, направленных на совершенствование конструкции и технологии работы железнодорожной станции, каждый вариант планируемых ОТМ может быть оценен по двум показателям: $Z(\gamma_i)$ – дополнительные годовые приведенные (модифицированные) затраты ΔL_i при реализации данного комплекса мероприятий, тыс. у.е./год; $\Psi(\gamma_i)$ – увеличение перерабатывающей способности станции (ее отдельного парка) ΔN_i , которое может быть достигнуто при реализации ва-

рианта γ_i , вагонов/сутки. При этом задача (4) представляется в виде:

$$\begin{pmatrix} \Delta P(\gamma) \\ -\Delta N(\gamma) \end{pmatrix} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Учитывая тот факт, что каждый из элементов $\gamma_i \in \Gamma$ представляет собой множество возможных мероприятий (1), то функции $\Delta P(\gamma)$ и $\Delta N(\gamma)$ являются функциями множеств, а с учетом их определений (2) и (3) они однородны и аддитивны.

Методика решения задачи векторной оптимизации

Сформулируем понятие решения задачи (5). Вариант ОТМ $\gamma^* \in \Gamma$ будем называть эффективным, если любое отклонение от него приводит к ухудшению хотя бы одного из показателей, т.е. к увеличению затрат или уменьшению переработки вагонов. Под решением задачи (5) будем понимать некоторый набор вариантов $\Gamma^* \in \Gamma$, в котором любой вариант является эффективным. Основным свойством множества Γ^* является то, что любые два варианта γ_q^* и γ_r^* данного множества между собой являются несравнимыми по Парето [19], т.е. для них имеет место соотношение

$$\begin{cases} \Delta P(\gamma_q^*) > \Delta P(\gamma_r^*), \\ \Delta N(\gamma_q^*) > \Delta N(\gamma_r^*). \end{cases} \quad (6)$$

Качественный характер решения задачи (5) иллюстрирует рис. 1.

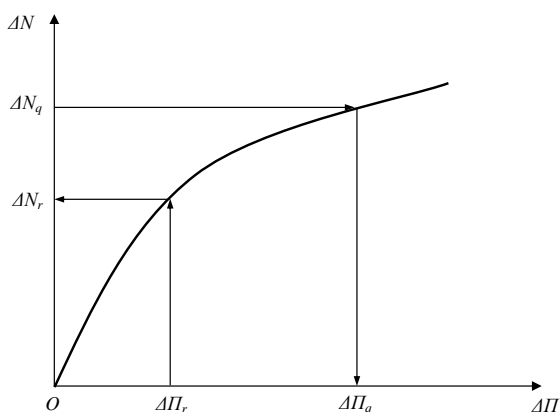


Рис. 1. Геометрическая интерпретация задачи векторной оптимизации

Данная зависимость определяет уровень эффективности затрат, которые выделяются на реализацию комплекса ОТМ. Так, если необходимо увеличить перерабатывающую способность станции на величину ΔN_q , то для реализации комплекса ОТМ γ_q^* потребуется допол-

нительное выделение средств в размере ΔP_q . В случае, если планируемые затраты на модернизацию станции ограничены величиной ΔP_r , то с помощью данной зависимости можно определить рациональный вариант ОТМ γ_r^* , реализация которого позволит максимально увеличить перерабатывающую способность станции на величину ΔN_r при заданном уровне финансирования проекта. Точка O на рис. 1 соответствует существующему уровню технического оснащения и технологии работы, которые обеспечивают перерабатывающую способность N_0 при годовых приведенных затратах P_0 .

Следует отметить, что вследствие дискретности множеств Γ и Γ^* решение задачи (5) в геометрической интерпретации представляет собой совокупность точек в n -мерном пространстве (1), каждая из которых является точкой перелома огибающей кривой и соответствует определенному варианту ОТМ $\gamma^* \in \Gamma^*$.

Если исходное множество Γ содержит незначительное количество вариантов γ_i , то построение подмножества Γ^* можно выполнить простым перебором вариантов, используя правило отбора (6). Однако при решении реальных задач, связанных с планированием ОТМ на транспортных объектах, такой подход является неэффективным. Для получения аналитического решения задачи векторной оптимизации воспользуемся методикой, изложенной в [17]. При этом решение задачи (5) сводится к решению задачи на условный экстремум:

$$\begin{cases} \Delta P(\gamma) \rightarrow \min, \\ \Delta N(\gamma) \geq N^*, \gamma \in \Gamma, \end{cases} \quad (7)$$

где N^* – заданная величина увеличения перерабатывающей способности станции.

Для решения задачи (7) используется функция Лагранжа [18]:

$$L(\gamma, \mu) = \Delta P(\gamma) - \mu \Delta N(\gamma), \quad (8)$$

где μ – неопределенный множитель Лагранжа.

Решением задачи (7) при фиксированном μ будет множество $\gamma^*(\mu)$, которое обеспечивает минимум функции Лагранжа, т.е.:

$$L(\gamma^*, \mu) \rightarrow \min, \gamma^* \in \Gamma.$$

Неопределенный множитель Лагранжа определяется из неравенства

$$\Delta N[\gamma^*(\mu)] \geq N^*.$$

Для решения исходной задачи векторной оптимизации сформируем множество $\tilde{\Gamma}^*$, которое есть выпуклая комбинация множества Γ^* :

$$\tilde{\Gamma}^* = \{\gamma^*(\mu) : \mu \geq 0, L(\gamma^*(\mu), \mu) = \min_{\gamma \in \Gamma} L(\gamma, \mu)\} \quad (9)$$

На плоскости с координатами L и μ функция Лагранжа, как функция от μ , представляет собой прямую, причем количество таких прямых конечно в силу конечности множества Γ . Если в функцию Лагранжа вместо γ подставить $\gamma^*(\mu)$, то получим кусочно-линейную кривую, огибающую снизу указанные прямые.

Пусть $\mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_m$ представляют собой точки перелома огибающей кривой, тогда $\gamma^*(\mu_1), \gamma^*(\mu_2), \dots, \gamma^*(\mu_m)$ являются элементами множества $\tilde{\Gamma}^*$. Используя соотношения (2) и (3) функцию Лагранжа (8) можно записать как

$$L(\gamma, \mu) = \sum [\Delta\Pi(\Theta_j) - \mu\Delta N(\Theta_j)], \Theta_j \in \gamma \quad (10)$$

Таким образом, при построении множества $\gamma^*(\mu)$ в него следует включать только такие элементы Θ_j , которые бы минимизировали выражение: $\Delta\Pi(\Theta_j) - \mu\Delta N(\Theta_j)$, что в итоге приведет к минимуму функции (10). С этой целью для каждого элемента (мероприятия) Θ_j необходимо определить значение множителя μ_j , который, вследствие линейности функции Лагранжа по μ , может быть получен из выражения $\Delta\Pi(\Theta_j)/\Delta N(\Theta_j)$. Это выражение показывает величину затрат при увеличении перерабатывающей способности на один вагон в сутки. После упорядочивания полученных значений μ_j по возрастанию поочередно формируются множества $\gamma(\mu_j)$. При этом каждое последующее множество $\gamma(\mu_j)$ формируется на базе предыдущего путем добавления одного из элементов Θ_j . Порядок добавления элементов Θ_j определяется в зависимости от соответствующих значений μ_j . Из множеств $\gamma(\mu_j)$ с учетом условия (6) отбираются множества $\gamma^*(\mu_j)$, на базе которых формируется $\tilde{\Gamma}^*$ (9), представляющее собой решение задачи (7).

Однако, как показывают исследования [12, 17], при решении задачи векторной оптимизации с помощью изложенной методики полученное множество $\tilde{\Gamma}^*$ включает не все варианты из множества Γ^* . В этой связи в [17] предложен метод, который позволяет определить недостающие варианты.

Вначале формируется исходное множество γ_0 , в которое включаются все возможные элементы Θ_j . Каждое последующее множество γ формируется на базе предыдущего путем исключения одного из элементов Θ_j . При этом исключается такой элемент Θ_j , для которого множитель Лагранжа (10) будет минимальным:

$$\mu_j = \frac{\Delta\Pi(\gamma) - \Delta\Pi(\Theta_j)}{\Delta N(\gamma) - \Delta N(\Theta_j)} \rightarrow \min \quad (11)$$

Среди полученных таким образом множеств отбираются варианты γ^* , несравнимые по Парето (6), которые включаются в множество $\bar{\Gamma}^*$. Конечным решением задачи векторной оптимизации (5) является множество Γ^* , которое получается в результате объединения множеств $\tilde{\Gamma}^*$ и $\bar{\Gamma}^*$, т.е. $\Gamma^* = \tilde{\Gamma}^* \cup \bar{\Gamma}^*$.

Совершенствование технико-технологических параметров станции

Апробация изложенной выше методики выполнена при определении комплекса рациональных технико-технологических параметров подсистемы расформирования сортировочной станции Н. С этой целью было выполнено комплексное обследование парка приема станции (рис. 2), по результатам которого построена соответствующая функциональная эргатическая модель [8, 9].

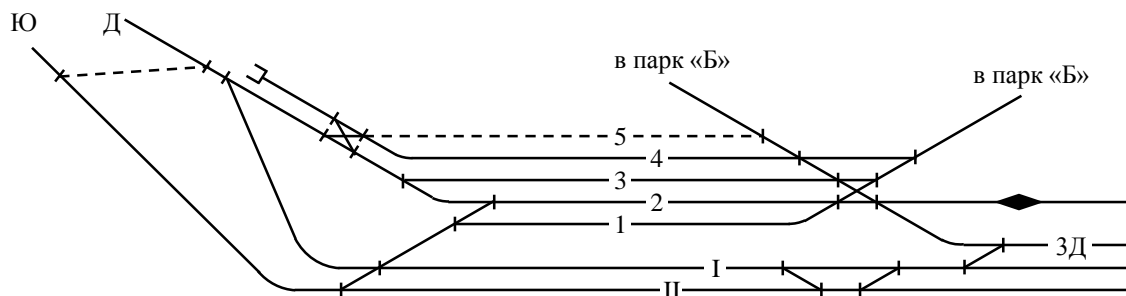


Рис. 2. Схема путевого развития парка приема станции с вариантами реконструкции

Анализ конструкции путевого развития парка приема (ПП) и технологии его работы позволил выявить определенные недостатки. Так, входная горловина предусматривает возможность приема поездов из Ю только на два пути

(№ 1 и 2), что вызывает их задержки при увеличении поездопотока с этого направления. Кроме того, в условиях постепенного увеличения объемов перевозок возникла необходи-

мость восстановления пути № 5, который ранее был закрыт и разобран.

Технический осмотр составов в ПП выполняет одна бригада ПТО, включающая 2 группы осмотрщиков вагонов, а расформирование на горке выполняет один горочный локомотив. Как показал анализ, входной поездопоток станции Н характеризуется существенной неравномерностью, которая при таком оснащении может вызывать значительную загрузку технических средств ПП в период сгущенного прибытия поездов. Это, в свою очередь, приводит к снижению перерабатывающей способности станции в целом. В этой связи была поставлена задача исследования и выбора рациональных технико-технологических параметров ПП сортировочной станции для повышения эффективности его функционирования.

Для решения этой задачи рассмотрен ряд возможных реконструкционных и организационных мероприятий, каждое из которых может быть представлено множеством W_k . Каждое такое множество включает набор возможных параметров одного из элементов ПП, на котором планируется выполнение ОТМ:

- 1) число путей в ПП $W_1 = \{4; 5\}$;
- 2) варианты конструкции входной горловины для приема поездов из Ю $W_2 = \{0; 1\}$; здесь вариант $W_2 = 0$ соответствует существующей горловине, $W_2 = 1$ – предусматривает ее реконструкцию для обеспечения приема поездов из Ю на все пути ПП;
- 3) число горочных локомотивов $W_3 = \{1; 2\}$;
- 4) число бригад ПТО: $W_4 = \{1; 2\}$;
- 5) число групп осмотрщиков вагонов в каждой бригаде ПТО $W_5 = \{2; 3; 4\}$.

Таким образом, было получено 48 множеств γ_i , каждое из которых представляет собой комбинацию указанных выше мероприятий W_k .

Для получения технико-эксплуатационных показателей, которые характеризуют функционирование ПП по каждому из намеченных вариантов, было выполнено моделирование работы парка с использованием разработанной эргатической модели ПП станции. Для каждого варианта при одинаковых начальных условиях была выполнена серия экспериментов, по результатам которых были определены средние значения показателей функционирования ПП, в т.ч.: средний простой составов в парке $T_{п.}$, средний простой поездов на соседних станциях $T_{зп.}$, число расформированных поездов N_p , загрузка исполнителей технологических операций.

Как уже отмечалось, каждый из рассматриваемых вариантов ОТМ γ_i оценивался по двум

интегральным показателям: годовые приведенные затраты на реализацию данного комплекса мероприятий L_i (тыс. у.е./год.) и максимальная перерабатывающая способность парка приема N_i (вагонов/сутки), которая может быть достигнута при реализации варианта γ_i

При определении затрат на реализацию каждого варианта учитывались строительные затраты на сооружение дополнительного путевого развития и приобретение маневровых локомотивов, эксплуатационные расходы, связанные с содержанием технических средств и оплатой труда, а также расходы, пропорциональные размерам движения (связанные с простоем поездов на подходах к станции и с простоем грузовых вагонов на станции)

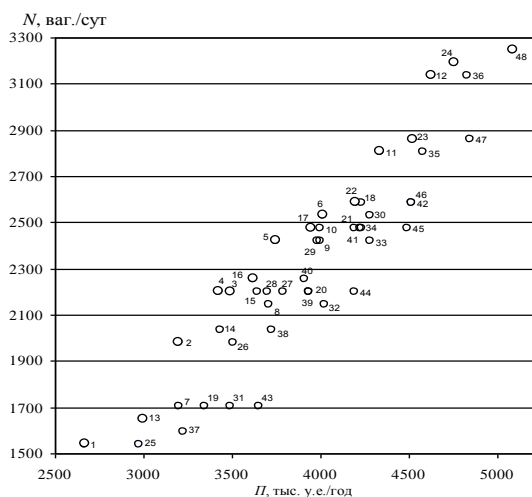
Для определения эксплуатационных расходов необходимо установить простои поездов и вагонов в каждом из вариантов ОТМ. В данном исследовании указанные значения простоев определялись по результатам моделирования работы парка приема с использованием его эргатической функциональной модели.

Для определения значения величины перерабатывающей способности N_i , которая может быть достигнута при реализации каждого из рассматриваемых вариантов ОТМ γ_i , эксперименты с моделью выполнялись при различной интенсивности λ входящего поездопотока. При этом максимально возможное значение перерабатывающей способности N_i определялось по эксперименту с пороговым значением λ^* , при котором был достигнут критический уровень насыщения системы обслуживания парка приема [20]. Пороговое значение интенсивности λ^* фиксировалось, когда при его дальнейшем увеличении суточное число обслуженных поездов в парке не изменялось.

В результате моделирования работы парка приема станции Н при различных вариантах технического оснащения и организации технологического процесса было получено исходное множество вариантов $\Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{48}\}$, которое приведено в табл. 1. Существующий набор технико-технологических параметров парка приема в табл. 5.1 характеризует вариант № 1: $\gamma_1 = \{4, 0, 1, 1, 2\}$. При этом при величине приведенных годовых эксплуатационных расходов $L_1 = 2\,671,2$ тыс.у.е./год обеспечивается перерабатывающая способность $N_1 = 1\,540$ вагонов/сутки. Геометрической интерпретацией множества Γ является поле точек, которое представлено на рис. 3.

Результаты моделирования работы парка приема станции

№ п/п	Множество γ_i					Показатели		№ п/п	Множество γ_i					Показатели	
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	Π_i	N_i		W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	Π_i	N_i
1	4	0	1	1	2	2 671,2	1 540	25	4	1	1	1	2	2 973,7	1 540
2	4	0	1	1	3	3 204,0	1 980	26	4	1	1	1	3	3 510,1	1 980
3	4	0	1	1	4	3 490,0	2 200	27	4	1	1	1	4	3 790,3	2 200
4	4	0	1	2	2	3 425,8	2 200	28	4	1	1	2	2	3 703,5	2 200
5	4	0	1	2	3	3 749,0	2 420	29	4	1	1	2	3	3 979,0	2 420
6	4	0	1	2	4	4 016,4	2 530	30	4	1	1	2	4	4 281,6	2 530
7	4	0	2	1	2	3 199,0	1 705	31	4	1	2	1	2	3 494,9	1 705
8	4	0	2	1	3	3 705,7	2 145	32	4	1	2	1	3	4 023,0	2 145
9	4	0	2	1	4	4 002,9	2 420	33	4	1	2	1	4	4 281,9	2 420
10	4	0	2	2	2	4 000,2	2 475	34	4	1	2	2	2	4 231,6	2 475
11	4	0	2	2	3	4 337,2	2 805	35	4	1	2	2	3	4 582,1	2 805
12	4	0	2	2	4	4 625,5	3 135	36	4	1	2	2	4	4 832,0	3 135
13	5	0	1	1	2	2 996,1	1 650	37	5	1	1	1	2	3 222,6	1 595
14	5	0	1	1	3	3 434,4	2 035	38	5	1	1	1	3	3 727,5	2 035
15	5	0	1	1	4	3 643,5	2 200	39	5	1	1	1	4	3 932,9	2 200
16	5	0	1	2	2	3 623,3	2 255	40	5	1	1	2	2	3 908,0	2 255
17	5	0	1	2	3	3 950,7	2 475	41	5	1	1	2	3	4 225,5	2 475
18	5	0	1	2	4	4 230,7	2 585	42	5	1	1	2	4	4 513,8	2 585
19	5	0	2	1	2	3 346,6	1 705	43	5	1	2	1	2	3 654,2	1 705
20	5	0	2	1	3	3 934,3	2 200	44	5	1	2	1	3	4 191,6	2 200
21	5	0	2	1	4	4 188,6	2 475	45	5	1	2	1	4	4 492,6	2 475
22	5	0	2	2	2	4 203,6	2 585	46	5	1	2	2	2	4 513,3	2 585
23	5	0	2	2	3	4 523,0	2 860	47	5	1	2	2	3	4 841,9	2 860
24	5	0	2	2	4	4 756,6	3 190	48	5	1	2	2	4	5 090,6	3 245

Рис. 3. Геометрическая интерпретация множества Γ в виде поля точек

Для определения рациональных вариантов ОТМ, обеспечивающих максимальную эффективность работы ПП станции в зависимости от объемов финансирования проекта, поставленная задача совершенствования технико-технологических параметров ПП была решена как задача векторной оптимизации (5) с помо-

щью изложенной методики. Конечной целью решения указанной задачи является выделение из исходного множества Γ , полученного по результатам моделирования работы ПП, подмножества Γ^* , которое включает только эффективные варианты ОТМ.

При решении задачи (5) рассмотренные множества W_k возможных мероприятий были представлены в виде множеств Θ_j (1):

1) Θ_1 – комплекс мероприятий, предусматривающих открытие 5-го пути;

2) Θ_2 – комплекс ОТМ, предусматривающий реконструкцию входной горловины, для обеспечения возможности приема поездов из Ю на все пути парка;

3) Θ_3 – приобретение дополнительного маневрового локомотива;

4) Θ_4 – мероприятия, связанные с увеличением числа бригад ПТО $S_{бр}$ и числа групп осмотровиков вагонов в бригаде $K_{гр}$. При этом были выделены следующие мероприятия: $\Theta_{41} - K_{гр}=3$ при $S_{бр}=1$; $\Theta_{42} - K_{гр}=4$ при $S_{бр}=1$; $\Theta_{43} - K_{гр}=2$ при $S_{бр}=2$; $\Theta_{44} - K_{гр}=3$ при $S_{бр}=2$; $\Theta_{45} - K_{гр}=4$ при $S_{бр}=2$.

Множество эффективных вариантов Γ^*

№п/п	№ варианта	Вариант ОТМ γ^*	$\Delta\Pi(\gamma^*)$, тыс. у.е.	$\Delta N(\gamma^*)$, ваг.
1	2	Θ_{41}	439,0	446,9
2	4	Θ_{43}	591,4	810,4
3	6	Θ_{45}	748,7	910,2
4	16	$\Theta_{1, \Theta_{43}}$	801,2	920,4
5	5	Θ_{44}	853,5	1 005,5
6	17	$\Theta_{1, \Theta_{44}}$	958,5	1 020,2
7	11	$\Theta_{3, \Theta_{44}}$	1 284,1	1 225,4
8	9	$\Theta_{1, \Theta_{3, \Theta_{43}}}$	1 336,6	1 235,6
9	12	$\Theta_{3, \Theta_{45}}$	1 388,9	1 320,7
10	23	$\Theta_{1, \Theta_{3, \Theta_{44}}}$	1 493,9	1 335,4
11	24	$\Theta_{1, \Theta_{3, \Theta_{45}}}$	1 598,7	1 430,7
12	48	$\Theta_{1, \Theta_{2, \Theta_{3, \Theta_{45}}}}$	1 879,6	1 485,7

Таким образом, было получено 8 возможных комплексов ОТМ Θ_j , направленных на совершенствование технического оснащения и технологии работы ПП. Следует отметить, что мероприятия Θ_{41} , Θ_{42} , Θ_{43} , Θ_{44} и Θ_{45} являются несовместными и, соответственно, не могут быть включены в один и тот же комплекс γ_i . Реализация каждого мероприятия Θ_j позволяет увеличить на некоторую величину $\Delta N(\Theta_j)$, но в то же время приводит к увеличению годовых приведенных расходов на величину $\Delta\Pi(\Theta_j)$. Для установления значений $\Delta N(\Theta_j)$ и $\Delta\Pi(\Theta_j)$ был выполнен анализ результатов моделирования работы ПП при реализации различных вариантов ОТМ, на основании чего получены значения указанных оценок для каждого из рассмотренных мероприятий Θ_j . Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения оценок $\Delta\Pi(\Theta_j)$, $\Delta N(\Theta_j)$ и множителей Лагранжа μ_j для планируемых мероприятий

Мероприятие Θ_j	$\Delta\Pi(\Theta_j)$, тыс. у.е./год	$\Delta N(\Theta_j)$, ваг./сут.	μ_j
Θ_1	209,8	110,0	1,907
Θ_2	280,9	55,0	5,107
Θ_3	535,4	315,2	1,699
Θ_{41}	439,0	446,9	0,982
Θ_{42}	618,0	680,6	0,908
Θ_{43}	591,4	810,4	0,730
Θ_{44}	748,7	910,2	0,823
Θ_{45}	853,5	1 005,5	0,849

После упорядочивания полученных значений множителей Лагранжа μ_j по возрастанию были получены множества $\gamma(\mu)$ путем последовательного включения в них Θ_j . Из совокупности полученных множеств $\gamma(\mu)$ с учетом условия (6) были отобраны эффективные множества (варианты ОТМ) $\gamma^*(\mu)$, несравнимые по Парето. На базе этих вариантов построено в соответствии с изложенной методикой получены множества $\tilde{\Gamma}^*$ и $\bar{\Gamma}^*$. В результате объединения этих множеств получено множество Γ^* , которое является решением поставленной оптимизационной задачи. Элементы множества Γ^* представлены в табл. 3.

Таким образом, с помощью методов векторной оптимизации в исходном множестве Γ (см. табл. 1) было выделено подмножество Γ^* (см. табл. 3), которое включает лишь эффективные варианты γ^* . На основании данных об элементах множества Γ^* была построена кусочно-линейная кривая, точками перелома которой являются эффективные варианты ОТМ (рис. 4).

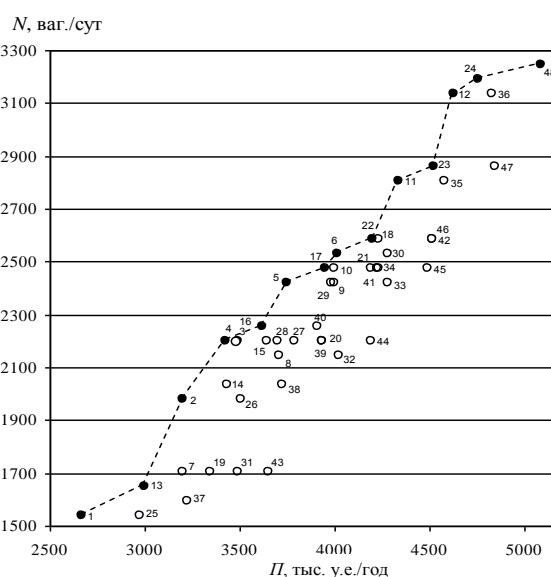


Рис. 4. Геометрическая интерпретация решения задачи совершенствования параметров парка приема станции

Выводы

Полученное решение позволяет осуществлять выбор рационального комплекса мероприятий, обеспечивающих максимальную эффективность работы парка приема, в зависимости от объемов финансирования проекта. Так, при допустимых годовых приведенных расходах Π_i 4 млн у.е. эффективным является вариант № 6, который предполагает увеличение количества бригад ПТО в парке до двух и наличие в каждой бригаде четырех групп осмотрщиков вагонов; при этом сохраняется существующее техническое оснащение ПП (конструкция путевого развития парка и 1 маневровый локомотив). Реализация данного варианта обеспечивает перерабатывающую способность парка 2 530 вагонов/сутки. Для сравнения вариант № 32 при

таких же расходах позволяет переработать только 2 145 вагонов. Анализ полученного решения показал, что применение разработанной методики позволяет повысить эффективность планируемых на станции мероприятий в среднем на 15 %.

Подобные решения могут быть получены для всех технических станций участка железной дороги, что позволит руководству дороги определить наиболее эффективный вариант распределения ресурсов при модернизации станций участка, обеспечивающий требуемую пропускную способность станций и всего участка при минимуме затрат.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Довідник основних показників роботи залізниць України (2004-2014 роки). – Київ: Укрзалізниця, 2015. – 59 с.
2. Бутько, Т. В. Удосконалення управління процесом просування поїздо-потоків на основі стабілізації обігу вантажного вагону / Т. В. Бутько, О. В. Лаврухін, Ю. В. Доценко // Зб. наук. праць. ДонІЗТ. – Донецьк: ДонІЗТ, 2010. – Вип. 22. – С. 18-26.
3. Ломотько, Д. В. Формування нечіткої бази знань та системи підтримки прийняття рішення у підрозділах залізниць / Д.В. Ломотько // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – № 2. – С. 52-58.
4. Ломотько, Д. В. Використання апарату нечіткої логіки для оптимізації розподілу обмеженого ресурсу на залізничному полігоні / Д. В. Ломотько // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – № 4. – С. 10-14.
5. Кутах, А. П. Система имитационного моделирования оценки эффективности новых технологий и организации перевозок на железнодорожном транспорте / А. П. Кутах, Т. И. Фурсова // Кибернетика и системный анализ, 2003. – № 6 – с.156-166.
6. Гончарук, С. М. Автоматизированная система технико-экономического выбора варианта технологического процесса работы станции / С. М. Гончарук и др. // Повышение эффективности работы ж.д. тр-та Сибири и Дальнего Востока : сб. трудов науч.-практ. конф. – Хабаровск: ДВГУПС – 1999. – С. 60-61.
7. Warninghoff, C. Nutzung von Simulationen zur Unterstutzung der betrieblichen Infrastrukturplanung [Текст] / C. Warninghoff, C. Ferchland // ETR: Eisenbahntechn, 2004. – № 7-8. – P. 490-498.
8. Бобровский, В. И. Эргатические модели железнодорожных станций / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // Транспортні системи і технології : зб. наук. праць КУЕТТ: – Київ: КУЕТТ, 2004. – С. 80-86.
9. Bobrovskiy, V. I. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata / V. I. Bobrovskiy, D. N. Kozachenko, R. V. Vernigora // Transport problems = Problemy transportu. – 2014. – Vol. 9, is. 3. – P. 57-65.
10. Бобровский, В. И. Количественная оценка технико-технологических параметров железнодорожных станций на основе эргатических моделей / В. И. Бобровский, Р. В. Вернигора, В.В. Малашкин // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2007. – № 16. – С.50-57.
11. Бобровский, В. И. Техничко-економическое управление железнодорожными станциями на основе эргатических моделей. / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 6. – С. 17-21.
12. Босов, А. А. Формирование вариантов рациональной сети линий высокоскоростного движения поездов в Украине : монография / А. А. Босов, Г. Н. Кирпа. – Дніпропетровськ: ДНУЖТ, 2004 – 144 с.
13. Левицький, І. Ю. Удосконалення технології прискореної доставки вантажів на залізницях України в умовах ринку транспортних послуг : автореф. дис ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Левицький Ілля Юхимович. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2004. – 20 с.
14. Бех, П. В. Удосконалення системи контейнерних перевезень на залізницях України : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.22.20 / Бех Петро Вікторович. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2006. – 20 с.
15. Мозолевич, Г. Я. Підвищення ефективності процесу перевезень за рахунок визначення раціональних параметрів поїздопотоків : автореф. дис... канд. техн. наук :05.22.01 / Мозолевич Григорій Якович. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011. – 24 с.
16. Харченко, О. И. Векторная оптимизация в задаче моделирования технологии доставки груза / О. И. Харченко// Транспортні системи і технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Дніпропетровськ, 2011. – Вип. 1. – С. 99-101.
17. Босов, А. А. Підвищення ефективності роботи транспортної системи на основі структурного аналізу : монографія / А. А. Босов, Н. А. Мухіна, Б. П. Піх. – Д., 2005. – 200 с.
18. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В. Д. Ногин. – Москва: Физматлит, 2002. – 144 с.
19. Макаров, И. Т. Теория выбора и принятия решений / И.Т. Макаров – Москва: Наука, 1982. – 327 с.
20. Тишкин, Е. М. Закономерности насыщения устройств сортировочных станций вагонами / Е. М. Тишкин, В. С. Климанов // Вестник ВНИИЖТа, 1980. – № 2. – С.6-9.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Бобровским В.И. (Украина)

Поступила в редколлегию 01.06.2016.
Принята к печати 02.06.2016.

МЕТОДИКА ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ

У статті наведено методику оцінки та визначення ефективних варіантів проектних рішень, спрямованих на удосконалення технічних та технологічних параметрів залізничних станцій. Вказану задачу пропонується вирішувати як задачу векторної оптимізації.

При удосконаленні техніко-технологічних параметрів залізничних станцій розробляються можливі варіанти відповідних організаційно-технічних заходів. Кожний варіант може бути охарактеризований двома інтегральними показниками: кількісним (наприклад, витратами на реалізацію варіанту) та якісним (наприклад, переробна спроможність станції). Задача полягає у визначенні таких варіантів проектних рішень, реалізація яких забезпечувала б найбільшу ефективність (оптимальне значення якісного показника) при певному (заданому) значенні кількісного показника (обсягах витрат).

Якісні та кількісні показники, що оцінюють кожний з проектів удосконалення станції, пропонується визначати з використанням розробленої авторами ергатичної функціональної моделі станції.

Задача векторної оптимізації вирішується з використанням функції Лагранжа. При цьому на основі вихідної множини варіантів проектних рішень формується множина ефективних варіантів, кожне з яких забезпечує покращення значення якісного показника (переробної спроможності станції) при збільшенні значення кількісного показника (витрат на реалізацію варіанта).

Апробація запропонованої методики виконана при визначенні ефективного комплексу заходів, спрямованих на удосконалення парку прибуття однієї з великих сортувальних станцій України. З цією метою було розроблено 48 варіантів можливих організаційно-технічних заходів. Для визначення показників ефективності кожного варіанту виконано серію експериментів з ергатичною моделлю станції. На основі вирішення задачі векторної оптимізації було визначено множину ефективних проектних рішень, що забезпечують максимальну переробну спроможність парку прибуття станції в залежності від виділених коштів.

Ключові слова: залізнична станція, оцінка проектних рішень, функціональне моделювання, векторна оптимізація, функція Лагранжа, ефективність використання ресурсів.

R. VERNIGORA, V. MALASHKIN

METHOD FOR TECHNICAL AND OPERATIONAL ASSESSMENT OF DESIGN SOLUTIONS TO IMPROVE PARAMETERS OF RAILWAY STATIONS

The article describes the method of estimation and definition of effective variants of design solutions aimed at improving the technical and technological parameters of railway stations. Said task is proposed to solve both the problem of vector optimization.

The improvement of technical and technological parameters of railway stations are being developed options for appropriate organizational and technical measures. Each option can be characterized by two integral indicators: quantitative (eg, cost of implementation options) and qualitative (eg, processing station's capacity). The challenge is to identify such variants of design solutions, the implementation of which would provide the greatest efficiency (the optimum value of qualitative indicator) at a certain (given) the value of quantitative indicator (cost).

Qualitative and quantitative indicators that evaluate each project station improvements, it is proposed to determine, using the ergatic functional model of railway station.

Vector optimization problem is solved by the Lagrange function. At the same time, based on the initial set of options for the design decisions formed many effective options, each of which provides improved quality index values (processing capacity of the station) at increasing the value of quantitative indicator (the cost of implementation options).

Testing of the proposed method is made in the determination of an effective set of measures aimed at improving the work of the arrival park one of the largest marshalling stations in Ukraine. To this end, 48 options of possible organizational and technical measures have been developed. To determine the performance of each variant performed a series of experiments with ergatic model of station. On the basis of solving the problem of vector optimization was defined set of effective design solutions to ensure maximum handling capacity of the arrival park depending on the allocated funds.

Keywords: train station, assessment of design solutions, functional modeling, vector optimization, Lagrange function, resource efficiency.