

УДК 656.02

## Повышение эффективности функционирования малоинтенсивных линий: постановка задачи и математические модели

К. Е. Ковалёв, А. В. Новичихин

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Ковалёв К. Е., Новичихин А. В. Повышение эффективности функционирования малоинтенсивных линий: постановка задачи и математические модели // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 1. — С. 28–39. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-28-39

### Аннотация

**Цель:** В статье предложено решение проблемы функционирования малоинтенсивных линий. Рассмотрены положения стратегий развития железнодорожного транспорта на различные горизонты планирования в контексте повышения эффективности функционирования малоинтенсивных линий. Определен механизм оценки по набору показателей и этапам жизненного цикла линий. Сформированы сценарии устойчивого развития малоинтенсивных линий в зависимости от фазы жизненного цикла. Разработан механизм оценки и текущего стимулирования малоинтенсивных линий для поддержания оптимальных значений ключевых параметров. Определены особенности функционирования малоинтенсивных линий на Российских железных дорогах, в части высокой социальной значимости для населения и стратегического значения для государства и корреляции размеров перевозок в регионах и его экономического развития. Предложена математическая постановка задачи эффективного функционирования малоинтенсивных линий на основе ее декомпозиции для определения этапов жизненного цикла. Совершенствована модель управления взаимодействием интенсивных и малоинтенсивных линий посредством методов нечеткого когнитивного моделирования. Представлена укрупненная нечеткая когнитивная карта управления интенсивными и малоинтенсивными линиями. Определены управляющие концепты, оказывающие существенное влияние на объект управления. **Методы:** Применяются методы анализа и синтеза, теория систем, математического моделирования. **Результаты:** Предложено решение проблемы повышения эффективности функционирования малоинтенсивных линий в современных условиях с позиций слабоструктурированных систем. **Практическая значимость:** Представлена математическая постановка задачи функционирования малоинтенсивных линий, которая решается определением этапов жизненного цикла и моделью управления взаимодействием интенсивных и малоинтенсивных линий на основе нечеткого когнитивного моделирования, для применения на практике к существующим малоинтенсивным линиям.

**Ключевые слова:** Железнодорожный транспорт, подход к управлению, малоинтенсивные линии, управление процессами перевозок, управление перевозками, нечеткие когнитивные карты.

### Введение

Проблема убыточности и низкой эффективности работы малоинтенсивными линиями (МИЛ) выделена в стратегиях развития железнодорожного транспорта на разные горизонты планирования (до 2015, 2025, 2030 гг.) [1–4].

Существующие отечественные и зарубежные научные исследования по повышению эффективности работы МИЛ направлены на снижение затрат на ее функционирование за счет использования более универсальных систем контроля местоположения подвижного состава, систем автоматизации и телемеха-

ники и снижение затрат на содержание пути в зависимости от тонно-километров выполненной поездной работы на участке [5–9].

Проблема управления малоинтенсивными линиями (МИЛ), с одной стороны, рассматривается в контексте систем автоматики и телемеханики, где в основном используется жезловая система или полуавтоблокировка — технический аспект. Также рассматривается возможность снижения расходов на эксплуатацию в части перехода на радиотехнические системы управления и радиокоординирование контроля места положения поезда. Технически системы разработаны, но их внедрение связано со значительными затратами на убыточных и низкодоходных МИЛ.

С другой стороны, под управлением МИЛ можно понимать распределение (перераспределение) транспортных потоков на сети с целью оптимального использования существующих железнодорожных линий и повышения их доходности за счет снижения неравномерности и затруднений движения на интенсивных линиях (ИЛ), а также создание устойчивой программы развития транспортной сети — аспект стратегического и инновационного развития. Данное направление недостаточно рассмотрено в научной литературе, поэтому в настоящей работе решаются задачи по повышению эффективности работы МИЛ, а также конкретизации разработанного инструментария для снижения неравномерности перевозочного процесса и увеличения грузопотока на них.

Под МИЛ на основании современных нормативных документов [5] понимается линия с размерами движения не более 8 пар поездов в сутки и грузонапряженность не более 5 млн т-км брутто/км.

Такое определение не в полной мере отображает характер работы, необходимо его конкретизировать в части рентабельности функционирования МИЛ и возможной их клиентоориентированности.

Оценка перспективности использования МИЛ при экономическом росте региона и переходных состояний из МИЛ в ИЛ и другие категории. Управление МИЛ в современных условиях имеет ряд особенно-

стей: 1) социальная потребность и значимость в перевозках у населения, проживающего рядом с МИЛ; 2) стратегическое значение МИЛ; 3) недостаточная эффективность и убыточность МИЛ; 4) корреляция размеров перевозок и экономическое развитие в регионе; 5) балансирование между интересами ОАО «РЖД» и местных органов исполнительной власти.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка алгоритмического обеспечения и моделей функционирования МИЛ для повышения эффективности их эксплуатации и рентабельности. Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач: 1) постановка задачи эффективного функционирования МИЛ; 2) определение механизма оценки по набору показателей и этапам жизненного цикла МИЛ; 3) разработка инструментария для формирования сценариев эффективного функционирования и программы развития МИЛ.

Задачу эффективного функционирования МИЛ можно сформулировать в виде поэтапной многофакторной математической постановки.

## 1. Математическая постановка задачи эффективного функционирования МИЛ

Необходимо разработать траекторию устойчивого развития и функционирования МИЛ с возможностью их использования для снижения неравномерности перевозок на ИЛ.

Дано: Пусть  $I$  набор сценариев функционирования  $z$  множества МИЛ, имеющих начальные характеристики показателей на текущем горизонте планирования:

$$I = \{I_z, z \in [1, Z]\}.$$

Развитие МИЛ определяется набором целевые характеристик:

$$F(S) = \{f_k(I), k \in [1, K]\},$$

где  $k$  — количество критериев ( $K = 3$ ).

Критериями оптимальности сценариев развития являются:

1. Технологические показатели (скорость, грузонапряженность) —  $N_{n,i}(0), n \in N, i \in I$ , где  $N$  — множество технических показателей.

2. Качественные показатели (густота сети в регионе, реализованность транспортной сети) —  $Q_{q,i}(0), q \in Q, i \in I$ , где  $Q$  — множество качественных показателей.

3. Экономический ущерб компании ОАО «РЖД» от неэффективной эксплуатации МИЛ —  $Ep_{j,i}(0), j \in J, i \in I$ , где  $J$  — множество экономических показателей.

Требуется установить из множества допустимых значений параметров  $I$  такие, которые соответствуют оптимальным значениям всех целевых ограничений  $f_k$ :

$$f_N^k(I) \rightarrow opt, \text{ при } k \in [1, K];$$

$$f_Q^k(I) \rightarrow opt, \text{ при } k \in [1, K];$$

$$f_j^k(I) \rightarrow \min, \text{ при } k \in [1, K].$$

Сценарий  $I_1$  удовлетворяет условиям, если не существует другого сценария  $I_2$ , имеющего лучшие оценки. На основании целевых функций требуется решение следующих задач:

1. Определить механизм оценки по набору показателей и этапа жизненного цикла МИЛ для прогноза уровня достижения целей на период планирования  $t \in [0, T]$ .

2. Сформировать сценарии устойчивого развития МИЛ на период планирования  $t \in [0, T]$  в зависимости от фазы жизненного цикла МИЛ.

3. Разработать механизм выбора оптимального сценария по набору параметров.

4. Определить программу развития МИЛ на период планирования  $t \in [0, T]$ .

5. Разработать механизм оценки и текущего стимулирования для управления балансом инте-

ресов развития МИЛ для поддержания оптимальных значений ключевых параметров.

Рассмотрим решение некоторых перечисленных задач (1, 2, 4).

**Решение 1.** Механизм оценки по набору показателей и этапа жизненного цикла МИЛ для прогноза уровня достижения целей на период планирования  $t \in [0, T]$ .

Параметры железнодорожной линии на каждом из этапов определяются набором исходных данных для моделей и методов на последующих этапах. Ключевым элементом в определении параметров и показателей траектории эффективного функционирования МИЛ является определение этапа жизненного цикла линии, размеров доходов и расходов на каждом из них.

Определение этапа жизненного цикла позволяет конкретизировать имеющиеся ограничения параметров функционирования линии, к которым можно отнести:

Первый этап — определение потребности в перевозках. На этом этапе необходимо согласование органов местной исполнительной власти и представителей ОАО «РЖД».

Второй этап — разработка и проектирование. Рассмотрим содержимое этого этапа на реальном примере для линии протяженностью 30 км, при наличии 80 стрелок на участке, стоимость проектирования приведена в [6].

Третий этап — строительство.

Четвертый этап — пуско-наладочные работы примерно составляют 10 % от стоимости строительства.

Пятый этап — активная эксплуатация активной эксплуатация железнодорожной линии в соответствии с источником [6], при эксплуатации около 20 лет.

Шестой этап — спад производительности, определение линии к категории МИЛ (убыточных линии) характеризуется изменением

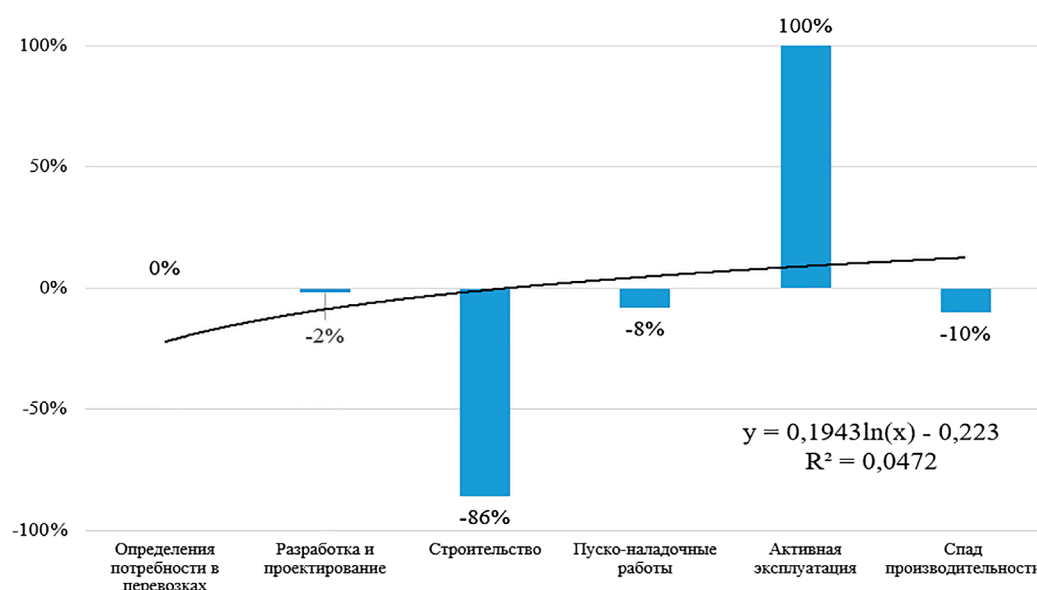


Рис. 1. Этапы жизненного цикла функционирования железнодорожной линии при условии доходности на весь период эксплуатации 10 %

структуры грузопотоков, снижением объемов перевозок на участке и снижением пассажиропотоков.

Установление траектории эффективного функционирования по укрупненным данным на все этапы жизненного цикла при условии доходности линии 10 % за весь период эксплуатации представлен на рис. 1.

Как видно из рис. 1, для достижения доходности на весь период эксплуатации железнодорожной линии, равной 10 %, его затраты на различных этапах жизненного цикла не должны превышать приведенных значений. Логарифмическое уравнение линии тренда примет вид  $y = 0,1943\ln(x) - 0,223$ , а величина достоверности аппроксимации составит  $R^2 = 0,0472$ .

**Решение 2.** Разработка сценариев эффективного функционирования МИЛ на период планирования  $t \in [0, T]$ . Посредством математического аппарата взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малоинтенсивных линий (рис. 2) планируется разработка алгоритмов, нормирование весовых значений связей и свойств объектов системы для

установления рекомендаций по строительству новых железнодорожных линий и эксплуатации существующих.

При функционировании системы входным воздействием является потребность в перевозках  $x_1(t)$  и другие описываемые параметры  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$ , результатом функционирования системы являются реализованные перевозки  $y_1(t)$  и другие параметры  $y_2(t)$ ,  $y_3(t)$ . Состояние системы  $Z$  есть функция  $Fc$  совокупности свойств ее элементов, которую можно представить выражением:

$$Z(t) = Fc(Z_{1A}, Z_{2A}, Z_{1B}, Z_{2B}, Z_{1C}, Z_{2C}, Z_{3C}).$$

Каждый объект системы имеет набор показателей. Для интенсивных линий учитываются приведенная грузонапряженность и техническая скорость, для малоинтенсивных линий — размеры движения и тонно-километры работы, для новых линий — приведенная грузонапряженность, чистый дисконтированный доход и эксплуатационные расходы на обслуживание линии.

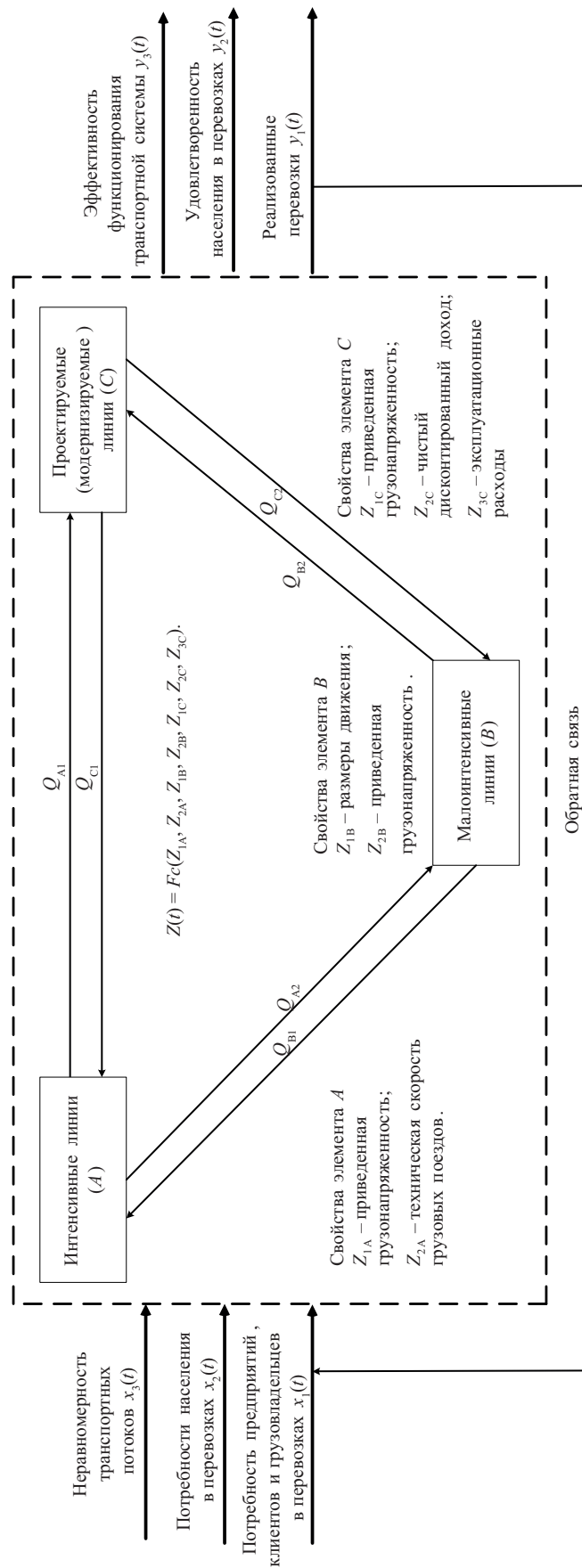


Рис. 2. Схема математической модели взаимодействия интенсивных, проектируемых (модернизируемых) и малоинтенсивных линий

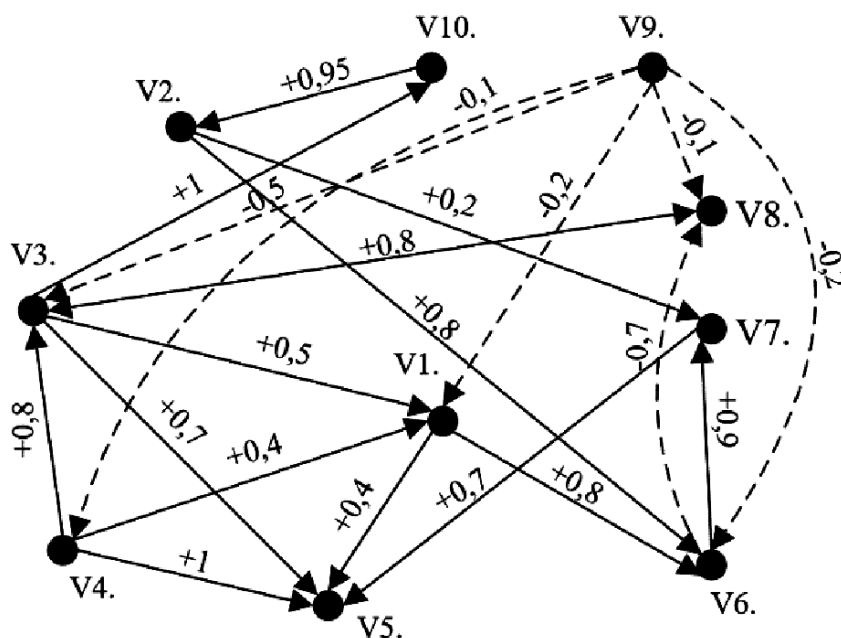


Рис. 3. Укрупненная когнитивная карта управления МИЛ и ИЛ, где V1 — взаимодействие и ИЛ и МИЛ; V2 — тарифное расстояние перевозки; V3 — грузооборот; V4 — погрузка/выгрузка; V5 — класс линии; V6 — управление перевозками; V7 — пропускная способность; V8 — грузо-напряженность; V9 — колебания транспортного потока; V10 — плотность транспортной сети

**Решение 3.** Формирование программы развития МИЛ на период планирования  $t \in [0, T]$  на основе нечеткого когнитивного моделирования.

Нечеткие когнитивные карты представляют собой простой граф из узлов и взвешенных дуг, где узлы — концепты предметной области, а дуги — причинно-следственные связи между ними [6–8]. Нечеткое когнитивное моделирование позволяет решать сложно-структурированные задачи управления сложными системами. Такой подход к построению стратегии решения проблем сложной системы позволяет формализовать и систематизировать процесс взаимодействия ИЛ и МИЛ для выявления проблемных факторов взаимосвязей и их влияний.

Моделирование процесса взаимодействия ИЛ и МИЛ направлено на перераспределение транспортных потоков внутри железнодорожной транспортной сети [7–13]. Для снижения неравномерности транспортной работы на ИЛ и ее повышения на убыточных МИЛ, для разработки

когнитивной карты [14–16] выбраны количественный и качественные показатели, прямо или косвенно влияющие на процесс взаимодействия ИЛ и МИЛ.

Модель когнитивной карты  $K_{И-М}$  определяется функцией  $f_{K_{И-М}}$ , которая задает изменение смешанного фактора  $x_i$  карты в момент  $(t + 1)$  с учетом значения фактора в предыдущий момент времени изменения значений факторов-причин и внешнего воздействия в виде импульса при  $t = 0$ , в виде:

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + \sum_{j \in I_i} a_{ij}x_j(t) - x_j(t - 1) + g_i(t),$$

где  $x_i(t)$  — исходное состояние когнитивной системы в момент времени  $t$ ;

$\sum_{j \in I_i} a_{ij}x_j(t) - x_j(t - 1)$  — вес взаимного влияния

между факторами  $a_{ij}$ , приращение импульса к фактору  $x_j$  за время  $t$ ;

$g_i(t)$  — внешнее управляющее воздействие.



ТАБЛИЦА 1. Характеристики нечеткой когнитивной карты

| Концепт | Влияние              | Влияют           | Веса влияния на другие концепты | Веса влияющие на концепт | Количество взаимосвязей |
|---------|----------------------|------------------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| $V1$    | $V5, V6$             | $V3, V4, V9$     | 0,4; 0,8                        | 0,5; 0,4; -0,2           | 5                       |
| $V2$    | $V7, V6$             | $V10$            | 0,2; 0,8                        | 0,95                     | 3                       |
| $V3$    | $V1, V8, V5, V10$    | $V4, V8, V9$     | 0,5; 0,8; 0,7; 1                | 0,8; 0,8; -0,5           | 7                       |
| $V4$    | $V1, V5$             | $V9$             | 0,4; 1                          | -0,1                     | 3                       |
| $V5$    | —                    | $V1, V3, V4, V7$ | —                               | 0,4; 0,7; 1; 0,7         | 4                       |
| $V6$    | $V7$                 | $V1, V2, V9$     | 0,9                             | 0,8; 0,8; -0,2           | 4                       |
| $V7$    | $V5$                 | $V2, V6$         | 0,7                             | 0,2; 0,9                 | 3                       |
| $V8$    | —                    | $V3, V6, V9$     | —                               | 0,8; -0,7; -0,1          | 3                       |
| $V9$    | $V3, V4, V1, V6, V8$ | —                | -0,5; -0,1; -0,2; -0,1          | —                        | 5                       |
| $V10$   | $V2$                 | $V3$             | 0,95                            | -0,5                     | 2                       |

В укрупненном виде проблему взаимодействия ИЛ и МИЛ предлагается решать с помощью нечетких когнитивных карт (рис. 3).

На процесс управления ИЛ и МИЛ влияет положительно грузооборот ( $V3$ ) и размер погрузки и выгрузки ( $V4$ ). При увеличении грузооборота увеличивается необходимость продвижения грузов по МИЛ. Также при увеличении размера погрузки и выгрузки увеличивается количество станций на МИЛ, где выполняются такие операции.

Отрицательно на ( $V1$ ) влияют колебания транспортных потоков ( $V9$ ). При снижении или резком увеличении колебаний транспортных потоков и планировании организации перевозок снижается интенсивность движения по МИЛ.

Тарифное расстояние перевозки ( $V2$ ) рассчитывается по действующей методике [17] на основании кратчайшего расстояния перевозки и влияет на управление перевозками ( $V6$ ) и пропускную способность линии ( $V7$ ). Тарифное расстояние перевозки определяет систему управления перевозками (выделение наиболее ИЛ, места расположения участковых станции, локомотивных депо и прочее). Определив тарифные расстояния перевозки, составляется план по реализации пропускной способности. Описание укрупненной когнитивной карты приведено в табл. 1.

Наибольшее количество положительных и отрицательных взаимосвязей имеют концепты  $V3, V9$ , следовательно, по ним необходима разработка детализированных нечетких когнитивных карт по каждому концепту в отдельности.

Повышение эффективности функционирования малоинтенсивных линий — сложный многоэтапный процесс, реализуемый последовательным выполнением решаемых задач, приведенных в настоящей работе.

Разработана когнитивная карта, позволяющая определить характеристики взаимосвязей концептов, которые в наибольшей степени оказывают влияние на повышение эффективности работы МИЛ.

Этап жизненного цикла малодеятельных линий характеризуется количественными параметрами, используемыми в качестве входных воздействий в схему математической модели, таких как потребность в перевозках  $x_1(t)$ , и другие параметры  $x_2(t), x_3(t)$ .

Результатом моделирования является определение количественных факторов, которые оказывают наибольшее воздействие на процесс взаимодействия ИЛ и МИЛ. Поэтапное решение задач позволит повысить эффективность взаимодействия ИЛ и МИЛ, снизить неравномерность перевозочного процесса и повысить

ритмичность работы железнодорожной транспортной системы.

На основании укрупненного модельного комплекса и предложенного подхода сформулированы концептуальные утверждения: увеличение объема перевозок позволяет повысить потребность в малоинтенсивных линиях; передача части грузопотока на малоинтенсивные линии снижает неравномерность на интенсивных линиях; закрытие и/или законсервирование малоинтенсивных линий приводит к более высоким издержкам, чем убыточная эксплуатация линии, на короткий горизонт планирования.

### Заключение

В статье дана оценка проблеме функционирования МИЛ в контексте систем автоматики и распределения транспортных потоков. Дана оценка стратегиям развития железнодорожного транспорта на различные горизонты планирования в части функционирования МИЛ. Выделены особенности функционирования МИЛ в современных условиях.

Предложена математическая постановка задачи эффективного функционирования МИЛ, которая решается поэтапной реализацией определения этапа жизненного цикла МИЛ. Предложено разработать математический аппарат для определения траектории устойчивого развития и функционирования и модель управления взаимодействием ИЛ и МИЛ на основе нечеткого когнитивного моделирования.

Предложены и обоснованы шесть этапов жизненного цикла функционирования МИЛ. Установлено логарифмическое уравнение линии тренда, и определена достоверность аппроксимации для устойчивого развития при доходности линии 10 %, от уровня затрат, за весь период эксплуатации. Разработан математический аппарат, и дана общая структура развития МИЛ.

Разработана укрупненная нечеткая когнитивная карта управления МИЛ и ИЛ, определены концепты, оказывающие наибольшее влияние на процесс взаимодействия МИЛ и ИЛ, и определены направления для дальнейших исследований в части составления детализированных нечетких когнитивных карт концептов грузооборота и колебания транспортного потока.

Представленные в статье положения полезны для подразделений железных дорог, занимающихся планированием перевозок и приемом заявок к перевозке грузов, в части повышения использования убыточных малодеятельных линий. Решаемые в статье задачи позволяют комплексно или точно использовать МИЛ, количество которых в последнее время увеличивается, также возрастают потребности в механизмах, обеспечивающих снижение их убыточности, а следовательно, происходит повышение общих доходов железной дороги.

### Библиографический список

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в российской федерации до 2030 г. Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р. — 86 с.
2. Программа инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. Утверждена советом директоров ОАО «РЖД» (протокол № 13 от 24 июня 2011 г.). — М., 2011. — 63 с.
3. Стратегия научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и перспективу до 2025 г. «Белая книга». — 2015. — 83 с.
4. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 г. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 марта 2019 г. № 466-р. — 74 с.
5. Кириленко О. Н. Экономическая эффективность методов эксплуатации малодеятельных линий / О. Н. Кириленко // Экономика железных дорог. — 2014. — № 8. — С. 79–85.



6. Вакуленко С. П. Малодеятельные линии: состояние и варианты оптимизации / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенова // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 3(70). — С. 174–180.
7. Никитин А. Б. Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малодеятельных линиях / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. — 2019. — Т. 5. — № 1. — С. 45–61.
8. Jian W. A Train Control System for Low Density Line in China / W. Jian, J. Cheng Mingm, C. Baigen, L. Jiang // Journal of the China railway society. — 2015. — December. — Pp. 46–53.
9. Romanenko V. E. System analysis and the task of ontological modeling of multimodal transportation / V. E. Romanenko, E. K. Yarkin, V. A. Mokhov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 272. — 2019. — 022231. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022231.
10. Распоряжение ОАО «РЖД» от 13 января 2020 г. № 28/р «Об утверждении Методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД»». — М. — 8 с.
11. Епишкин И. А. Причины появления малодеятельных линий в РФ / И. А. Епишкин, К. В. Фионова // Транспортное дело России. — 2018. — № 6. — С. 262–264.
12. Кульба В. В. Управление и контроль реализации социально-экономических программ / В. В. Кульба, С. С. Ковалевский. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 400 с.
13. Новичихин А. В. Когнитивное моделирование для диагностики социально-экономических систем топливно-сырьевого региона / А. В. Новичихин, В. Н. Фрянов // Экономика и менеджмент систем управления. — 2014. — № 2. — С. 72–83.
14. Ковалев К. Е. Развитие научно-технических основ повышения эффективности функционирования транспортной системы при взаимодействии интенсивных и малодеятельных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2021. — Т. 18. — № 2. — С. 169–176.
15. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодеятельных линиях / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 2. — С. 252–267.
16. Ковалев К. Е. Модель загруженности оперативно-диспетчерского персонала на малодеятельных линиях / К. Е. Ковалев, В. Л. Белозеров, В. А. Шаров // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 3. — С. 294–308.
17. Прейскурант № 10-01. Тарифы на перевозку грузов и услуги инфраструктуры, выполняемые российскими железными дорогами (утв. Постановлением ФЭК РФ от 17 июня 2003 г. № 47-т/5). — 463 с.

Дата поступления: 10.01.2022

Решение о публикации: 25.02.2022

#### **Контактная информация**

КОВАЛЁВ Константин Евгеньевич — канд. техн. наук;  
kovalev@pgups.ru

НОВИЧИХИН Алексей Викторович — д-р техн. наук,  
доцент; novitchihin@bk.ru

## Efficiency Rise in Functioning of Low-Intensity Lines: Problem Statement and Mathematical Models

K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Efficiency Rise in Functioning of Low-Intensity Lines: Problem Statement and Mathematical Model // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 1, pp. 28–39. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2022-1-28-39

### Summary

**Purpose:** The article proposes a solution of the problem of functioning of low-intensity lines. The provisions of the strategies for the development of railway transport for various planning horizons are considered in the context of improving the efficiency of the operation of low-intensity lines. The mechanism of assessment on the set of indicators and stages of life cycle of the lines has been defined. The scenarios of sustainable development of low-intensity lines depending on life cycle phase are formed. The mechanism for the evaluation and current stimulation of low-intensity lines has been developed to maintain optimal values of key parameters. The features of the functioning of low-intensity lines on Russian railways are determined in terms of high social significance for population and strategic importance for the country and the correlation of the size of traffic in the regions with the country economic development. Mathematical formulation of the problem of effective functioning of low-intensity lines based on its decomposition is proposed to determine the stages of the life cycle. The model of managing the interaction of intense and low-intensity lines has been improved by means of fuzzy cognitive modeling methods. An enlarged fuzzy cognitive map for the control of intense and low-intensity lines is presented. Control concepts that have a significant impact on the control object are defined. **Methods:** Methods of analysis and synthesis, system theory, mathematical modeling are applied. **Results:** A solution for the problem of increasing the efficiency of the operation of low-intensity lines in modern conditions from the standpoint of loosely-structured systems is proposed. **Practical significance:** Mathematical formulation of the problem of low-intensity line functioning is presented which is solved by determining the stages of the life cycle and the model for managing the interaction between intense and low-intensity lines based on fuzzy cognitive modeling for practical application to existing low-intensity lines.

**Keywords:** Railway transport, managing approach, low-intensity lines, transportation process management, transportation management, fuzzy cognitive maps.

### References

1. *Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v rossiyskoy federatsii do 2030 g. Utverzhdena Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17 iyunya 2008 g. № 877-r* [Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated June 17, 2008 No. 877-r]. 86 p. (in Russian)

2. *Programma innovatsionnogo razvitiya OAO "Rossiyskie zheleznnye dorogi" na period do 2015 g. Utverzhdena sovetom direktorov OAO "RZhD" (protokol № 13 ot 24 iyunya 2011 g.)* [Innovative Development Program of Russian Railways OJSC for the period up to 2015. Approved by the Board of Directors of Russian Railways OJSC (Minutes No. 13 dated June 24, 2011)]. Moscow, 2011. 63 p. (in Russian)

3. *Strategiya nauchno-tekhnicheskogo razvitiya kholdinga "Rossiyskie zheleznye dorogi" na period do 2020 g. i perspektivu do 2025 g. "Belaya kniga"* [The strategy of scientific and technical development of the holding "Russian Railways" for the period up to 2020 and prospects up to 2025 "White Book"]. 2015. 83 p. (in Russian)
4. *Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshchestva "Rossiyskie zheleznye dorogi" do 2025 g. Rasporyazheniem Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19 marta 2019 g. № 466-r* [Long-term development program of the open joint-stock company "Russian Railways" until 2025 by Order of the Government of the Russian Federation dated March 19, 2019 No. 466-r]. 74 p. (in Russian)
5. Kirilenko O. N. Ekonomicheskaya effektivnost' metodov ekspluatatsii malodeyatel'nykh liniy [Economic efficiency of low-performance lines operation methods]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of railways]. 2014, I. 8, pp. 79–85. (in Russian)
6. Vakulenko S. P. Malodeyatel'nye linii: sostoyanie i varianty optimizatsii [Low-performance lines: state and optimization options]. *Mir transporta* [World of transport]. 2017, V. 15, I. 3(70), pp. 174–180. (in Russian)
7. Nikitin A. B. Vozmozhnost' vnedreniya tsifrovoy radiosvyazi i organizatsii peredachi dannykh mezhdu stantsiyami na malodeyatel'nykh liniyakh [The possibility of introducing digital radio communication and organizing data transmission between stations on low-density lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation]. 2019, V. 5, I. 1, pp. 45–61. (in Russian)
8. Jian W. A Train Control System for Low Density Line in China / W. Jian, J. Cheng Mingm, C. Baigen, L. Jiang // *Journal of the China railway society*. 2015. December. Pp. 46–53.
9. Romanenko V. E. System analysis and the task of ontological modeling of multimodal transportation / V. E. Romanenko, E. K. Yarkin, V. A. Mokhov // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 272. 2019. 022231. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022231.
10. *Rasporyazhenie OAO "RZhD" ot 13 yanvarya 2020 g. № 28/r "Ob utverzhdenii Metodiki klassifikatsii i spetsializatsii zheleznodorozhnykh liniy OAO "RZhD"* [Order of Russian Railways dated January 13, 2020 No. 28/r "On Approval of the Methodology for Classification and Specialization of Railway Lines of Russian Railways"]. Moscow: 8 p. (in Russian)
11. Epishkin I. A. Prichiny poyavleniya malodeyatel'nykh liniy v RF [Causes of the appearance of low-performance lines in the Russian Federation]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2018, I. 6, pp. 262–264. (in Russian)
12. Kul'ba V. V. *Upravlenie i kontrol' realizatsii sotsial'no-ekonomicheskikh programm* [Management and control of the implementation of socio-economic programs]. Moscow: Knizhnyy dom "LIBROKOM" Publ., 2009. 400 p. (in Russian)
13. Novichikhin A. V. Kognitivnoe modelirovanie dlya diagnostiki sotsial'no-ekonomicheskikh sistem toplivno-syrevoogo regiona [Cognitive modeling for the diagnosis of socio-economic systems of the fuel and raw materials region]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya* [Economics and management of control systems]. 2014, I. 2, pp. 72–83. (in Russian)
14. Kovalev K. E. Razvitie nauchno-tekhnicheskikh osnov povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya transportnoy sistemy pri vzaimodeystvii intensivnykh i malodeyatel'nykh liniy [Development of scientific and technical foundations for improving the efficiency of the transport system in the interaction of intensive and low-density lines]. *Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Communications]. 2021, V. 18, I. 2, pp. 169–176. (in Russian)
15. Kovalev K. E. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podkhod k upravleniyu protsessami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyakh [Comprehensive synergy-indicator approach to the management of transportation processes]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation]. 2021, V. 7, I. 2, pp. 252–267. (in Russian)
16. Kovalev K. E. Model' zagruzhennosti operativno-dispetcherskogo personala na malodeyatel'nykh liniyakh [The model of workload of operational and dispatching personnel on low-density lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation]. 2020, V. 6, I. 3, pp. 294–308. (in Russian)

17. *Preyskurant № 10-01. Tarify na perezovozku gruzov i uslugi infrastruktury, vpolnyaemye rossiyskimi zheleznymi dorogami (utv. Postanovleniem FEK RF ot 17 iyunya 2003 g. № 47-t/5)* [Price list No. 10-01. Tariffs for the transportation of goods and infrastructure services performed by Russian railways (approved by Decree of the Federal Energy Commission of the Russian Federation dated June 17, 2003 No. 47-t / 5)]. 463 p. (in Russian)

Received: January 10, 2022

Accepted: February 25, 2022

#### **Author's information**

Konstantin E. KOVALEV — PhD in Engineering,  
Associate Professor; kovalev@pgups.ru

Alexey V. NOVICHKHIN — D. Sci. in Engineering,  
Associate Professor; novichihin@bk.ru