

МЕХАНИЗМ ДИАГНОСТИКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАЛОИНТЕНСИВНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЛИНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

КОВАЛЕВ Константин Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент кафедры¹; e-mail: kovalev_kostia@mail.ru
НОВИЧИХИН Алексей Викторович, д-р техн. наук, профессор¹; e-mail: novitchihin@bk.ru
САКОВИЧ Игорь Леонтьевич, канд. экон. наук, доцент кафедры¹, первый заместитель начальника по экономике, финансам и корпоративной координации²; e-mail: logist@pgups.ru
БОЛОТИН Валерий Алексеевич, канд. техн. наук, профессор кафедры¹; e-mail: spb-vab@yandex.ru

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, кафедра «Логистика и коммерческая работа», Санкт-Петербург

²Октябрьская железная дорога – филиал ОАО «Российские железные дороги», Санкт-Петербург

Для идентификации проблем функционирования железнодорожных линий используются различные механизмы, в том числе механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий, который позволяет повысить эффективность их функционирования. Предлагаемый механизм позволяет оценить текущее состояние малоинтенсивной железнодорожной линии и установить причинно-следственные связи, приводящие к убыточности линии, дать анализ показателей, которые в наибольшей степени оказывают негативное влияние на функционирование линии. Для этого применен метод когнитивного моделирования.

В статье разработана укрупненная когнитивная карта функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий, используемая для диагностики существующего состояния эксплуатации линии. Когнитивная карта состоит из концептов, связей между концептами и весовых значений связей. На основании когнитивной карты составлена матрица смежности, которая позволяет оценить достоверность и устойчивость нечеткой когнитивной карты по внешним и внутренним возмущениям. Рассчитаны характеристическое уравнение и собственные значения матрицы, которые позволяют дать оценку показателей когнитивной карты в виде влияния концептов на систему и системы на концепты. Установлены показатели нечеткой когнитивной карты, а именно консонанс влияния системы, диссонанс влияния системы, влияние концепта на систему, которые дают наиболее полное представление о внутренней структуре малоинтенсивной линии. Наибольшее положительное влияние на систему среди концептов оказывают «технические ресурсы», «персонал станций и участка» и «нормативная база». Наиболее значимое положительное влияние на перечисленные концепты позволяет повысить эффективность работы малоинтенсивных железнодорожных линий. Наибольшее отрицательное влияние на систему среди концептов оказывает концепт «Размеры движения» в связи с недостаточным количеством пар поездов в сутки, проходящих по линии.

Составлен план экспериментов для определения изменения параметров концептов «Производительность и эффективность» при оказании импульсных воздействий на концепты «Оперативное управление перевозочным процессом», «Технические ресурсы» и «Персонал станций и участка» с целью оценки их влияния на концепты «Производительности» и «Эффективности». При внесении импульсов в концепт «Функционального управления» и «Технические ресурсы» существенного изменения производительности и эффективности не наблюдается. При внесении импульсов в концепт «Персонал» наблюдается рост производительности и эффективности, что свидетельствует о возможности повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий путем положительного импульса на концепт «Персонал».

Ключевые слова: управление процессами перевозок; малоинтенсивные линии; механизм диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий; когнитивное моделирование; импульсные процессы; железнодорожный транспорт.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-72-86

▼ Введение

В современных условиях на железных дорогах Российской Федерации увеличивается необходимость эффективного использования малоинтенсивных железнодорожных линий (МИЛ). Проблема функционирования и развития МИЛ рассмотрена в отечественных и

зарубежных исследованиях [1–9]. Анализ исследований показал отсутствие разработанного механизма диагностики эксплуатации малоинтенсивных железнодорожных линий, позволяющего оценить текущее состояние МИЛ. В связи с этим необходимы современные инструменты и механизмы, позволяющие

повысить эффективность работы МИЛ, путем определения полюсов роста, позволяющих повысить объемы перевозок на таких линиях.

Целью статьи является разработка механизма диагностики, который позволяет определить направления развития МИЛ, для того чтобы установить потребные объемы технических, технологических и экономических ресурсов, с применением когнитивных карт и импульсных воздействий на концепты. Механизм диагностики разработан с использованием синергетико-индикаторного подхода, который позволяет выявлять и исследовать причинно-следственные связи сложно структурированной системы с набором количественных и качественных показателей. Механизм диагностики позволяет устанавливать закономерности функционирования и прогнозировать возможные направления развития железнодорожных линий, в том числе МИЛ.

1. Разработка механизма диагностики эксплуатации МИЛ

По действующей методике классификации и специализации железнодорожных линий для МИЛ фактические размеры движения поездов составляют не более 8 пар поездов в сутки и грузонапряженность не более 5,0 млн т-км брутто/км в год¹. Проблема малоинтенсивных линий в современных условиях является малоизученной, хотя общая их протяженность составляет около 20 % от общей протяженности железнодорожной транспортной сети [10, 11].

Разработанный механизм диагностики эксплуатации МИЛ представлен на рис. 1. Отличием предлагаемого механизма является возможность моделирования различных сценариев развития для убыточных МИЛ после выполнения категоризации проблемных ситуаций с использованием когнитивного моделирования. Разработанный механизм позволяет установить факторы, приводящие к низкой эффективности функционирования МИЛ. Предлагаемый механизм позволяет формировать комплексные сценарии развития МИЛ в зависимости от внутренних и внешних факторов.

¹ Распоряжение ОАО «РЖД» от 13 января 2020 г. № 28/р «Об утверждении Методики классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД»». — Москва. — 8 с.

Диагностика начинается с ввода данных об участках МИЛ по дороге с их основными показателями. Далее производится оценка и анализ исходного состояния функционирования МИЛ на основе алгоритма Форда — Фалкерсона, который позволяет определить максимальный поток и минимальный разрез при представлении железнодорожной транспортной сети в виде ориентированного графа [12, 13].

Идеей конкретизации алгоритма является определение максимально возможного потока путем диагностики возможностей пропускной способности железнодорожной транспортной сети, что позволяет задействовать транзитные МИЛ при перевозке грузов на грузонапряженных и востребованных направлениях. Конкретизация алгоритма Форда — Фалкерсона [14, 15] заключается в том, что в качестве концептов приняты обратные значения классности станции, а в качестве ребер — обратные значения класса железнодорожной линии. Построив ориентированный граф с применением конкретизированного алгоритма Форда — Фалкерсона, выполняется диагностика проблемных ситуаций в функционировании линий. Большинство МИЛ являются убыточными и малоэффективными в связи с отсутствием потребности в перевозках в пассажирском и грузовом сообщении. Для повышения эффективности их работы разрабатываются возможные направления развития линий и определяются размеры ресурсов, необходимые для их реализации.

Диагностика работы МИЛ является сложно структурированной задачей, учитывающей количественные и качественные показатели. Если МИЛ не является убыточной, то алгоритм приводит к пункту оформления оперативного плана эксплуатационной работы МИЛ. Если МИЛ убыточна, необходима категоризация проблемных ситуаций, которая позволит выявить группы причин, приводящих к убыточности линий.

При наличии условия необходимости повышения доходности линии применен подход когнитивного моделирования, состоящий из следующих этапов: определение вершин и весовых значений связей; разработка нечеткой когнитивной модели с набором показателей; корректировка модели и проверка адекватности; планирование, моделирование и реализация

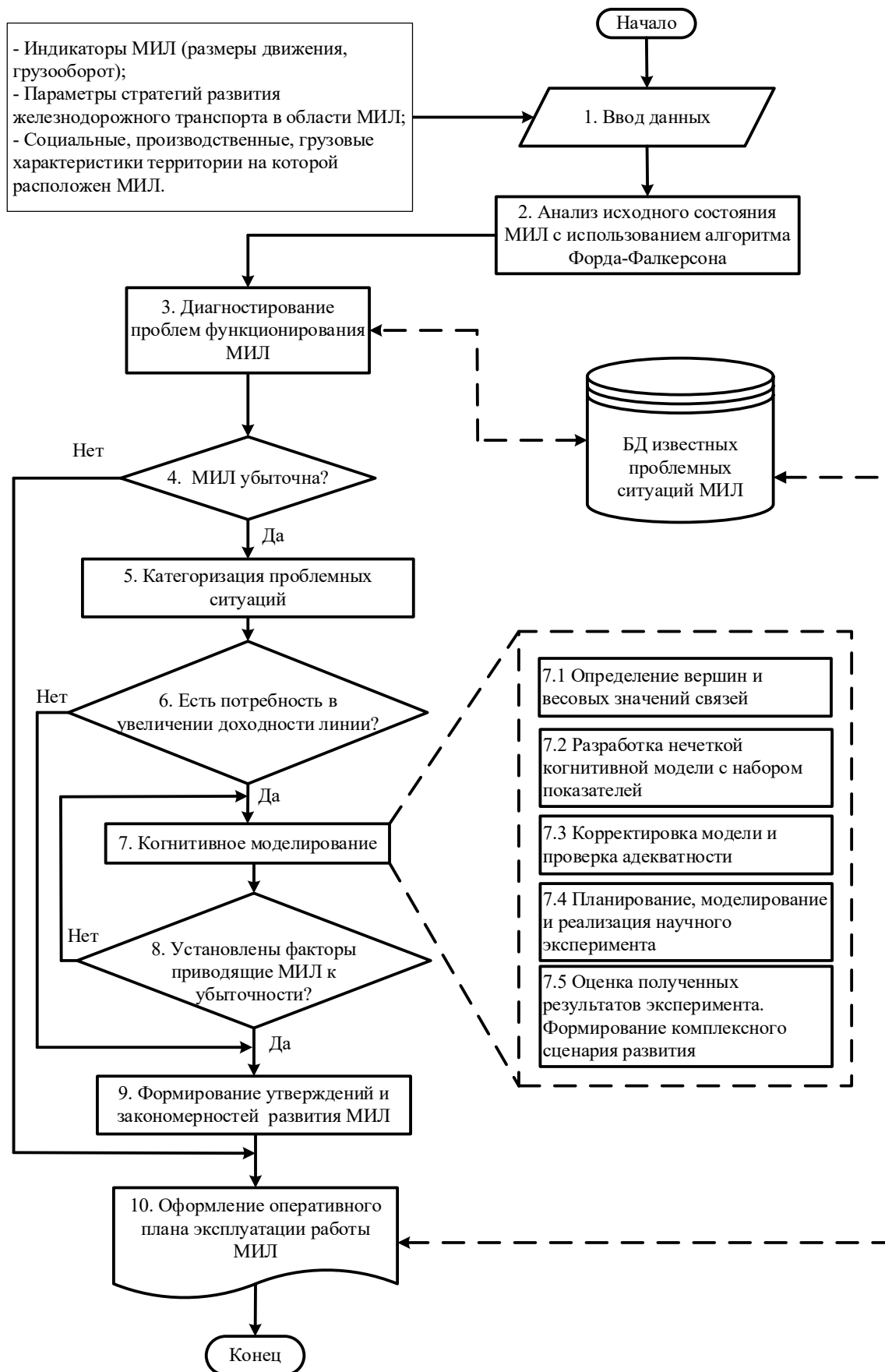


Рис. 1. Механизм диагностики эксплуатации МИЛ

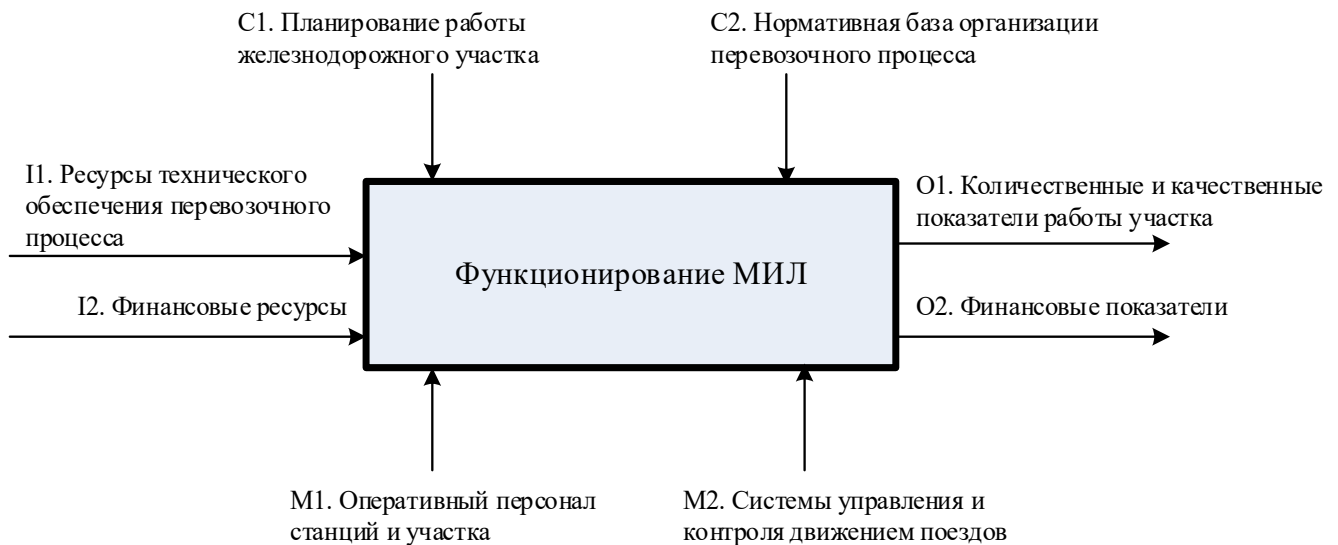


Рис. 2. Процесс функционирования железнодорожной линии с использованием методологии функционального моделирования IDEF0

научного эксперимента; оценка полученных результатов эксперимента [16–18].

На основании когнитивного моделирования установлены факторы, приводящие МИЛ к убыточности. Выполняется анализ состояния линии, направления развития для повышения доходности, и формируется оперативный план развития МИЛ. Для функционирования МИЛ необходимы различные ресурсы, в том числе затраты на содержание инфраструктуры, прогнозируемые размеры перевозок, работающий механизм расчета железнодорожных тарифов, затраты на тягу и прочие составляющие перевозочного процесса, которые необходимы для функционирования любой железнодорожной линии. Процесс функционирования железнодорожной линии (в том числе МИЛ) можно описать с помощью рис. 2, который получен на основе объектно-ориентированного подхода и реализован с использованием методологии функционального моделирования IDEF0², которая позволяет представить систему в виде набора взаимосвязанных функций. Не

использованы методологии *IDEFI*, *IDEFIX*, *IDEFIX (IDEFI Extended)*, *IDEF2*, *IDEF3*, *IDEF4*, *IDEF5* по причине того, что они не дают наглядного, достоверного и точного описания рассматриваемых процессов и предназначены для других функциональных областей [17].

Процесс функционирования железнодорожной линии с использованием методологии функционального моделирования IDEF0 детализирован в виде жизненного цикла железнодорожной линии (рис. 3). На основании жизненного цикла функционирования железнодорожной линии представлены существующие механизмы управления процессами перевозок, в которых указано место разработанного синергетико-индикаторного подхода к проблеме эксплуатации МИЛ. Под функционированием МИЛ $\sum P_i$ понимается соотношение технических $T(t)$, технологических $W(t)$ и экономических показателей $E(t)$ линии, которое можно представить в виде кортежа:

$$\sum P_i(t) \equiv \langle T(t), W(t), E(t) \rangle. \quad (1)$$

Причинно-следственные связи и корреляция взаимосвязанных процессов функционирования МИЛ трудно структурируемы. Для этого использован метод когнитивного моделирования, который позволяет учитывать взаимосвязи количественных и качественных факторов, конкретизирующих показатели МИЛ.

² IDEF0 — методология функционального моделирования и графическая нотация, предназначенная для формализации и описания бизнес-процессов. Отличительной особенностью IDEF0 является ее акцент на соподчиненность объектов. В IDEF0 рассматриваются логические отношения между работами, а не их временная последовательность.

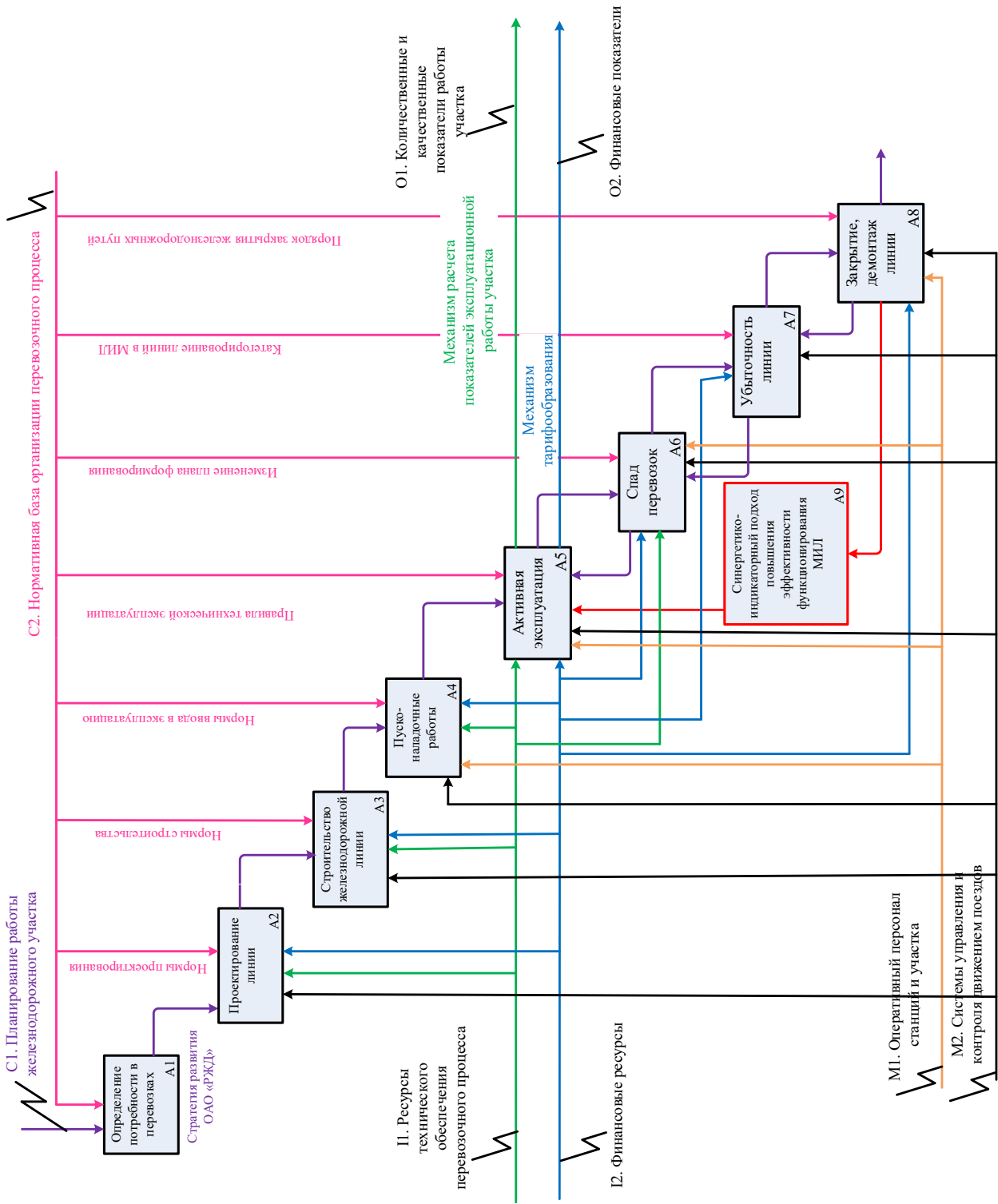


Рис. 3. Жизненный цикл функционирования железнодорожной линии с использованием методологии функционального моделирования IDEFO

2. Когнитивная модель функционирования МИЛ

Разработана укрупненная нечеткая когнитивная карта функционирования МИЛ для диагностики существующего состояния линии. Когнитивная карта состоит из множества концептов, связей между концептами и весовых значений связей [18]. Основой для определения концептов когнитивной карты является приведенный на рис. 2 процесс функционирования железнодорожной линии. Укрупненная когнитивная карта функционирования МИЛ представлена на рис. 4.

В когнитивную карту помимо элементов из рис. 2 добавлен концепт «V1. Размеры движения», который обуславливает работу линии. На основании укрупненной когнитивной карты составлена матрица (B) смежности когнитивной карты (2).

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & -0,6 & -0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot (2)$$

Нечеткое множества не накладывает ограничений на выбор функции принадлежности. Использовано аналитическое представление функции принадлежности μ нечеткого множества (A), (7) с элементами x , нечетко обладающими определяющим множеством свойством R (3) упрощает соответствующие аналитические и численные расчеты при применении методов теории нечетких множеств. Выбрана треугольная функция принадлежности, используемая для задач, неопределенностей, которые характеризуются выражением:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1 - \frac{W(t) - x}{W(t) - T(t)}; T(t) \leq x \leq W(t); \\ 1 - \frac{x - W(t)}{E(t) - W(t)}; W(t) \leq x \leq E(t); \\ 0, \text{остальные случаи.} \end{cases} \quad (3)$$

При $(W(t) - T(t)) = (E(t) - W(t))$ применима симметричная треугольная функция принадлежности, которая состоит из кортежа параметров (1). При разработке когнитивной карты необходимо выполнить оценку устойчивости нечеткой карты к внешним импульсным воздействиям и внутренней структурной устойчивости. Условие структурной устойчивости нечеткой когнитивной карты, наличие нечетного числа циклов отрицательной обратной связи, а условие неустойчивости нечеткой когнитивной карты — наличие четного числа циклов положительной обратной связи. Для анализа устойчивости модели к внешним возмущениям необходимо составить характеристическое уравнение матрицы смежности.

Устойчивость системы к внешним возмущениям определяется на основании определения собственных значений матрицы смежности (2) и составления характеристического уравнения. Собственные значения матрицы:

$$\lambda_1 = 0; \lambda_2 = -\frac{3^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt[3]{50}}{10}; \lambda_3 = -\frac{\sqrt{42i}}{10};$$

$$\lambda_4 = \frac{\sqrt{42i}}{10}; \lambda_5 = -\frac{3 \cdot \sqrt[6]{3} \cdot \sqrt[3]{50i}}{20}; \lambda_6 = \frac{3 \cdot \sqrt[6]{3} \cdot \sqrt[3]{50i}}{20}.$$

На основании собственных значений матрицы смежности составлено характеристическое уравнение:

$$\lambda^8 + \frac{21\lambda^6}{50} + \frac{9\lambda^5}{20} + \frac{189\lambda^3}{1000} = 0. \quad (4)$$

В соответствии с уравнением (4) собственные числа матрицы не превышают $|-1|$ и являются действительными числами. Структурная устойчивость определяется по количеству отрицательных связей. В данном случае нечетное количество отрицательных связей свидетельствует об устойчивости когнитивной карты.

Представленные расчеты позволяют сделать вывод, что разработанная система является устойчивой к внешним и внутренним структурным изменениям и может быть использована для моделирования импульсных процессов и сценариев развития.

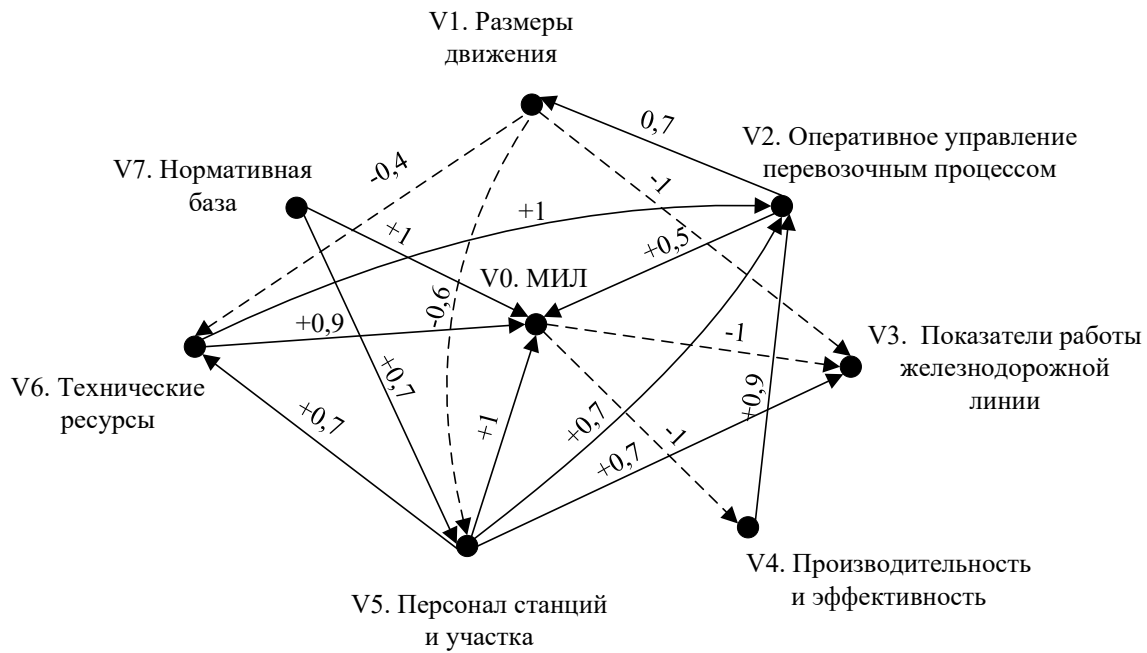


Рис. 4. Укрупненная когнитивная карта функционирования МИЛ

Таблица 1. Показатели когнитивной карты функционирования МИЛ

Названия концептов	Консонанс влияния системы	Диссонанс влияния системы	Консонанс влияния концепта	Диссонанс влияния концепта	Влияние системы на концепт	Влияние концепта на систему
Размеры движения	0,15	0,85	0,28	0,72	0,1	-0,24
Оперативное управление перевозочным процессом	0,28	0,72	0,19	0,81	-0,32	-0,12
Показатели работы железнодорожной линии	0,29	0,71	0,0	1,0	-0,73	0,00
Производительность и эффективность	0,28	0,72	0,19	0,81	-0,53	0,06
Персонал станций и участка	0,15	0,85	0,27	0,73	-0,04	-0,12
Технические ресурсы	0,15	0,85	0,19	0,81	0,10	-0,21
Нормативная база	0,00	1,00	0,33	0,67	0,00	-0,03
Функционирование МИЛ	0,33	0,67	0,19	0,81	0,35	-0,42

3. Показатели когнитивной модели

Для дальнейших расчетов может быть выбрана любая программная среда и язык программирования Node.js [19]. В матрице отражены положительные и отрицательные связи между концептами, которые определены на основе экспертных оценок. Когнитивная карта построена для убыточной МИЛ. Как видно из рис. 1 и табл. 1, наибольшее негативное воздействие оказывает концепт «Размеры движения ниже нормативных». От исходной когнитивной матрицы (A) переходим к когнитивной матрице положительных связей R размерности $2n \cdot 2n$ (где n — число концептов) по следующим

выражениям согласно [20, 21]. Элементы r_{ij} матрицы R (7) определяются из матрицы (A) путем следующей замены:

$$w_{ij} > 0 \rightarrow r_{2i-1,2j-1} = w_{ij}, r_{2i,2j} = w_{ij}. \tag{5}$$

$$-w'_{ij} > 0 \rightarrow r_{2i-1,2j} = -w'_{ij}, r_{2i,2i-1} = -w'_{ij}. \tag{6}$$

где $w_{ij}; -w'_{ij}$ — основные элементы матрицы, имеющие ненулевое значение;
 i, j — строка и столбец матрицы.

Остальные элементы матрицы R принимают нулевое значение. В выражении (7) представлен переход к когнитивной матрице R.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 & -0,5 & -0,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0,7 & 0 & 0,9 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0,5 & 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0,5 & 0 & 0,4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = R. \tag{7}$$

Определено транзитивное замыкание нечеткой матрицы R в соответствии с [18]. Примем, что $R = V_i^\infty = 1^{p1}$. Операция V в данном случае — это взятие покомпонентного максимума. Возведение в степень $R^n = R^{n-1} \cdot R$. Для точности до 0,01 достаточно остановиться на 200 шаге.

В результате транзитивного замыкания матрицы (R) (7) в матрице существуют двойные связи. Такие связи представлены положительно-отрицательной парой $v_{ij}; v'_{ij}$. Построено эвристическое транзитивное замыкание по выражениям (8, 9):

$$v_{ij} = \max\{r_{2i-1,2j-1}, r_{2i2j}\}. \tag{8}$$

$$v'_{ij} = -\max\{r_{2i-1,2j}, r_{2i-1,2j}\}. \tag{9}$$

Фрагмент транзитивно замкнутой матрицы когнитивной карты представлен в выражении (10).

$$\begin{bmatrix} 0,18 & -0,42 & 0,54 & -0,38 & 0,6 & -1 & 0,6 & -0,42 & 0,25 & -0,6 & 0,18 & -0,42 \\ 0 & 0 & 0,2 & -0,45 & 0,23 & -0,5 & 0,23 & -0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9 & -0,41 & 0,2 & 0,45 & 0,2 & -0,45 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,7 & -0,29 & 0,63 & -0,9 & 0,7 & -1 & 0,7 & -1 & 0,18 & 0,18 & 0,7 & 0,29 \\ 0 & 0 & 0,36 & -0,81 & 0,41 & -0,9 & 0,41 & -0,9 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Дальнейшее исследование основано на вычислении показателей укрупненной когнитивной карты функционирования МИЛ, основными среди которых являются консонанса, диссонанса и воздействия концептов на систему и системы на концепты [18].

Консонансом влияния i -го концепта на j -й показатель определяется по выражению:

$$c_{ij} = \frac{|v_{ij} + v'_{ij}|}{|v_{ij}| + |v'_{ij}|}. \quad (12)$$

Воздействием i -го концепта на j -й показатель определяется по выражению:

$$p_{ij} > \operatorname{sgn}(v_{ij} + v'_{ij}) \max(|v_{ij}|, |v'_{ij}|), |v_{ij}| \neq |v'_{ij}|. \quad (13)$$

Диссонанс определяется как нечеткое дополнение консонанса по выражению:

$$d_{ij} = 1 - c_{ij}. \quad (14)$$

Таким образом, под воздействием понимается доминирующее по силе влияние между концептами, а показатель консонанса выражает меру доверия к знаку воздействия (чем выше консонанс, тем убедительнее мнение об этом знаке). Наибольший интерес для анализа системы представляют интегральные показатели консонанса и воздействия. Выражения для их вычисления приведены ниже [18].

Консонанс влияния i -го концепта на систему:

$$C_i^{\rightarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}. \quad (15)$$

где c_{ij} — консонанс влияния i -го концепта на j -й показатель.

Консонанс влияния системы на j -й концепт:

$$C_i^{\leftarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}. \quad (16)$$

Для диссонанса определяются аналогичные двойственные показатели:

$$D_i^{\rightarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij}, \quad (17)$$

где d_{ij} — диссонанс влияния i -го концепта на j -й.

Диссонанс влияния системы на j -й концепт:

$$D_i^{\leftarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ij}. \quad (18)$$

Воздействие системы на j -й концепт:

$$P_i^{\rightarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij}, \quad (19)$$

где p_{ij} — воздействие i -го концепта на j -й.

Воздействие системы на j -й концепт:

$$P_i^{\leftarrow} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij}. \quad (20)$$

Показатели когнитивной карты функционирования МИЛ на основании выражений (13–20) представлены в табл. 1.

На основании показателей когнитивной карты наибольший консонанс влияния системы оказывают управляемые концепты, к которым относятся: «Оперативное управление перевозочным процессом», «Персонал станций и участка» и «Технические ресурсы».

Положительное влияние на систему среди концептов оказывает только «Производительность и эффективность». Наибольшее отрицательное влияние на систему оказывают концепты: «Размеры движения», «Оперативное управление перевозочным процессом» и «Технические ресурсы». Негативное влияние перечисленных концептов необходимо снизить путем разработки механизмов планирования и стимулирования к перевозкам на МИЛ, через анализ стейкхолдеров перевозочного процесса.

Таким образом, с помощью когнитивного анализа сформулированы концепты, которые в наибольшей степени оказывают влияние на эффективность деятельности МИЛ. Выявлены основные факторы, оказывающие негативное влияние на функционирование МИЛ,

Таблица 2. План модельного эксперимента

Сценарии	Управляющие концепты																											
	V2. Оперативное управление перевозочным процессом							V5. Персонал станций и участка							V6. Технические ресурсы													
	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V7	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7					
1. Поиск грузовой базы			+	•	+	—	*			+	+	+	*			+	+	*										
2. Модернизация			+	+	+	*			+	*											•	+	+					
3. Консервирование			—	—	—	—	+			—	—	—									—	—	*					
4. Закрытие путей			—	—	—	*			—	—	—	—	*								—	—	—	*				
5. Оптимальный вариант			+	+	+			+	•	+	+										•	+						

Примечание: «+» — воздействие ОАО «РЖД»; «-» — негативные тенденции; «*» — воздействие органов власти; «•» — воздействие возможных стейкхолдеров.

к которым относятся: «Низкие размеры движения», «Функциональное управление», «Персонал станций и участка», «Технические ресурсы». Воздействуя на вышеперечисленные факторы, можно значительно улучшить функционирование МИЛ.

4. Импульсное моделирование

Модель когнитивной карты может подвергаться внешним импульсным воздействиям в любой момент времени, функция значения факторов в момент времени (t + 1) будет иметь вид [18]:

$$v_i(t + 1) = v_i(t) + p_i^0(t + 1) + \sum_{j=1}^n sig(u_j, u_i)p_j(t), \quad (21)$$

где $v_i(t)$ — исходное состояние когнитивной системы;

$p_i^0(t + 1)$ — момент внесений внешнего импульсного воздействия;

$\sum_{j=1}^n sig(u_j, u_i)p_j(t)$ — импульсное воздействие

на концепты u_j , соответствующее обратному значению класса станции u_i и имеющее обратное значение, соответствующее классу линии.

В табл. 2 представлен план модельных экспериментов, который состоит из значений импульсов, вносимых в концепты когнитивной карты функционирования МИЛ.

Наиболее существенные результаты моделирования сценариев развития при внесении

импульсов в концепты укрупненной когнитивной карты функционирования МИЛ представлены на рис. 5–8.

Моделирование осуществляется на основе внесения импульсных воздействий (21) в управляемые концепты «Оперативное управление перевозочным процессом», «Технические ресурсы» и «Персонал станций и участка», и представлена оценка результатов моделирования. Внесен импульс «+1» в концепт «Функциональное управление» (рис. 5).

При внесении импульса «+1» в концепт «Оперативное управление перевозочным процессом» существенного изменения «Производительности и эффективности» не наблюдается. Внесен импульс «+1» в концепт «Технические ресурсы» (рис. 6).

При внесении импульса «+1» в концепт «Технические ресурсы» существенного изменения «Производительности и эффективности» не наблюдается. Внесен импульс «+1» в концепт «Персонал станций и участка» (рис. 7).

При внесении импульса «+1» в концепт «Персонал станций и участка» наблюдается незначительный рост «Производительности и эффективности», что свидетельствует о возможности повышения эффективности функционирования МИЛ путем положительного импульса на концепт «Персонал станций и участка». Это позволяет сделать вывод о достоверности и адекватности модели, поскольку большинство мероприятий, выполняемых на железной дороге в части функционирования МИЛ, связаны с кадровыми вопросами.

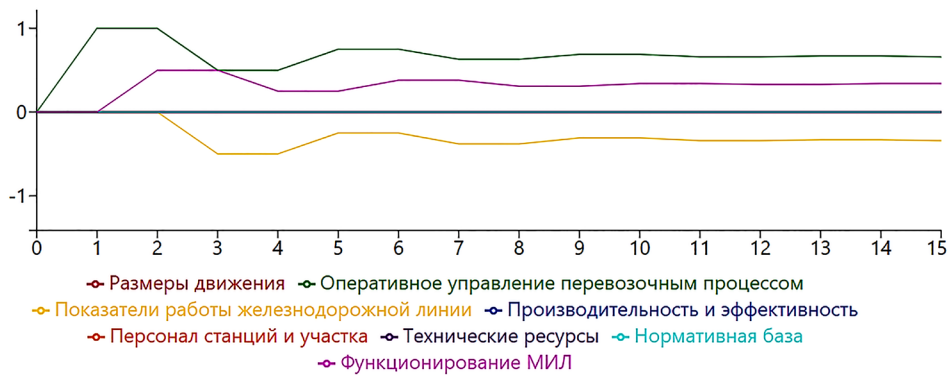


Рис. 5. Сценарий развития при внесении положительного импульса в концепт «Оперативное управление перевозочным процессом»

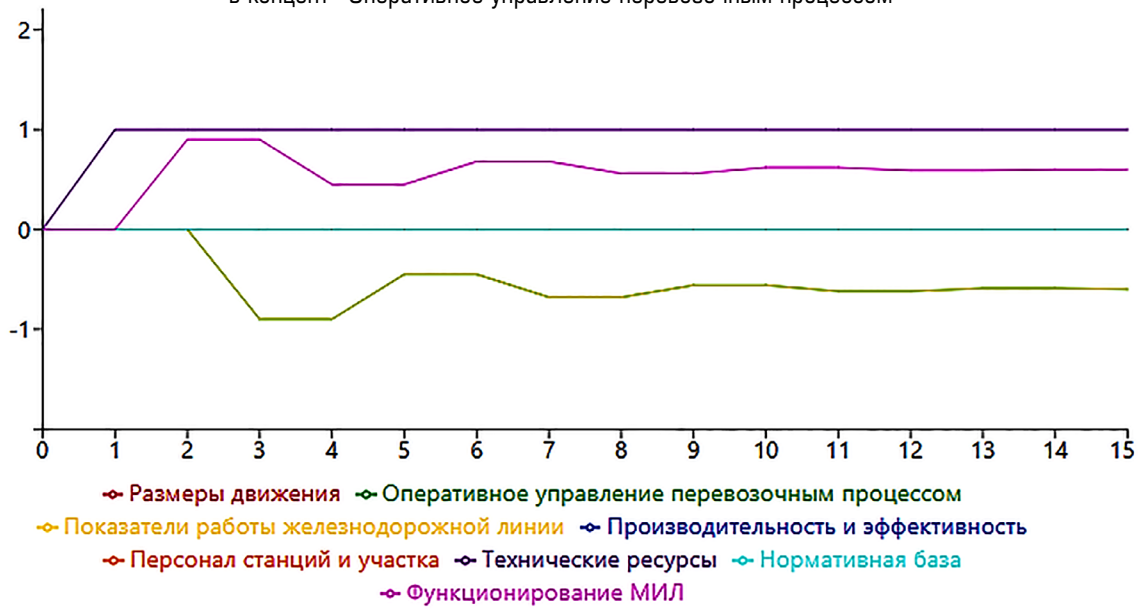


Рис. 6. Сценарий развития при внесении положительного импульса в концепт «Технические ресурсы»

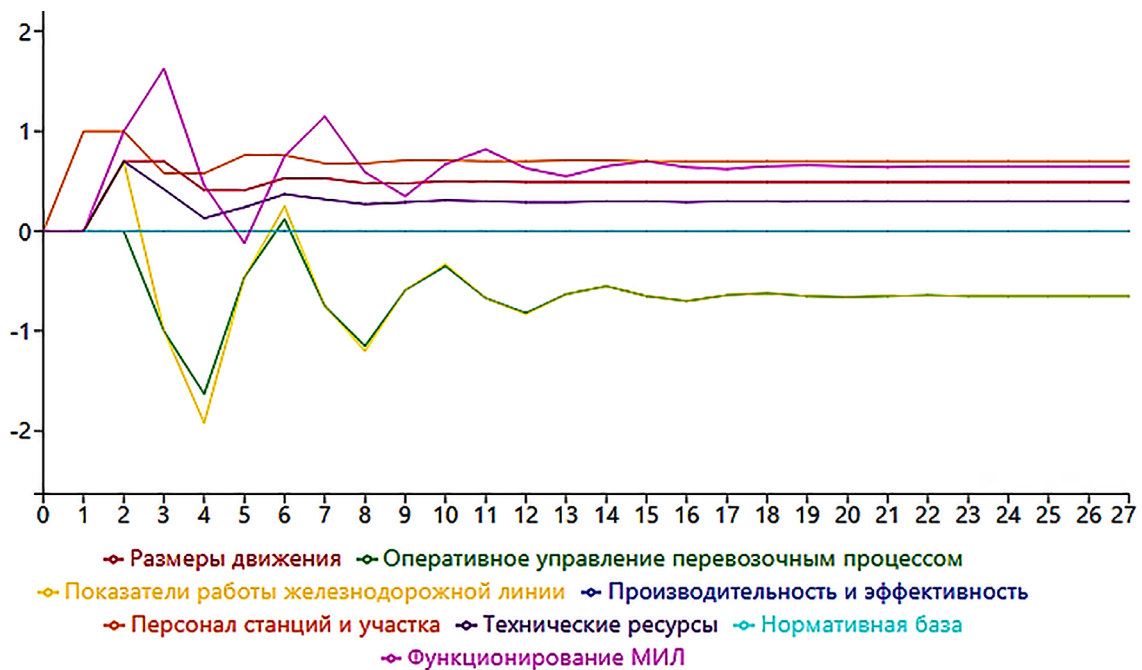


Рис. 7. Сценарий развития при внесении положительного импульса в концепт «Персонал станций и участка»

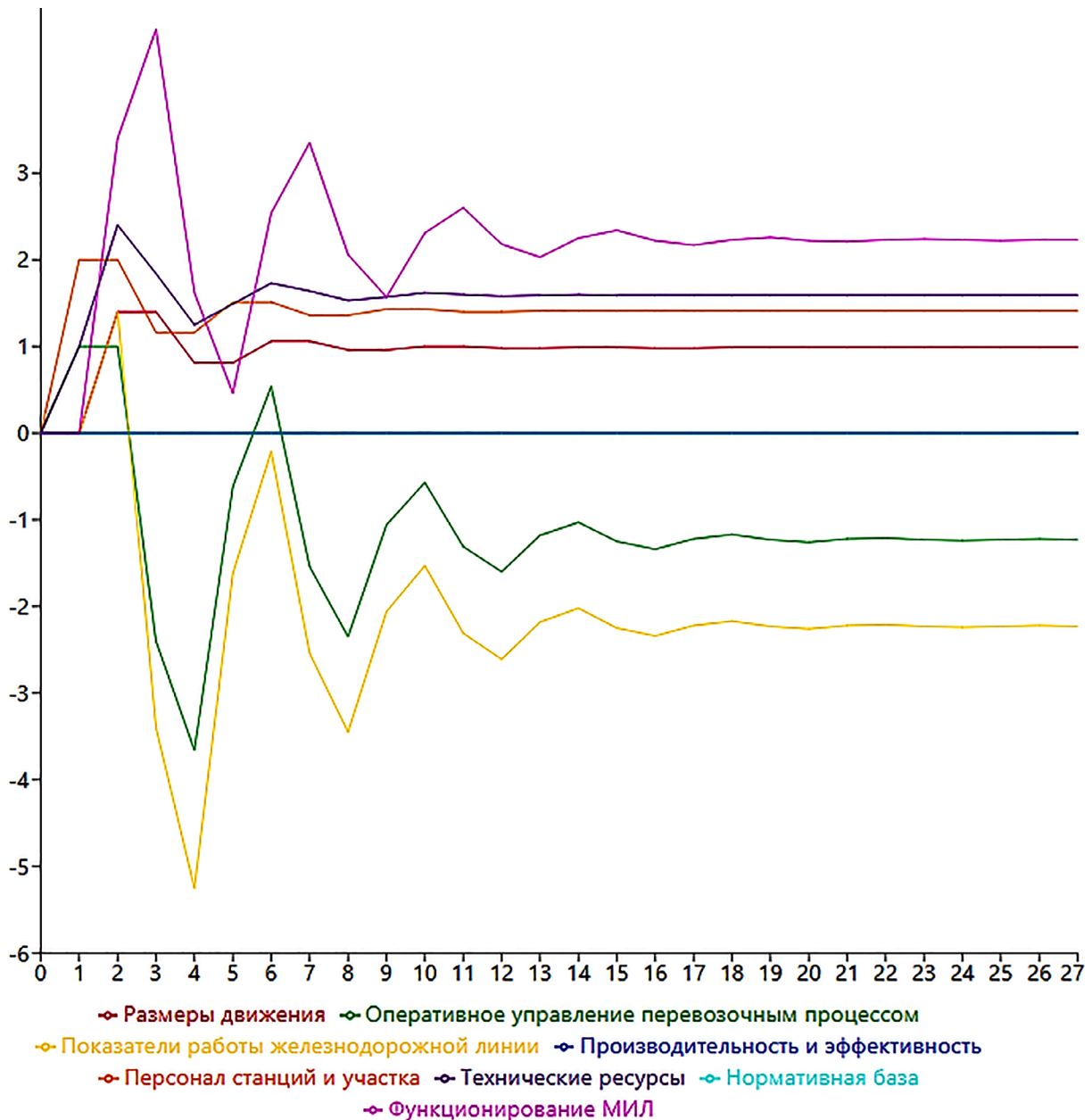


Рис. 8. Внесен импульс в концепты «Функционального управления», «Персонал станций и участка» и «Технические ресурсы»

Внесен импульс во все ранее рассмотренные концепты «Оперативное управление перевозочным процессом», «Технические ресурсы» и «Персонал станций и участка» (рис. 8).

На основании рис. 8 при внесении импульса, равного «+1», в концепт «Функционального управления» и импульса «+2» в концепт «Персонал станций и участка» рост производительности и эффективности функционирования МИЛ не наблюдается.

Заключение

В статье разработан механизм диагностики эксплуатации МИЛ. Описан процесс функционирования МИЛ, который послужил основой для разработки нечеткой укрупненной когнитивной карты функционирования МИЛ. Дано математическое описание состояния железнодорожного участка, представленное в виде кортежа технических, технологических и экономических показателей. Одним из элементов разработанного механизма является

жизненный цикл функционирования железнодорожной линии с использованием методологии функционального моделирования IDEF0. Описан порядок функционирования и переходов этапов жизненного цикла с указанием нормативных документов, применяемых на разных этапах функционирования линии.

Моделирование показало, что наибольший положительный эффект достигается при воздействии на концепт «Персонал станций и участка». Воздействие на другие рассматриваемые концепты и комплексное воздействие на несколько концептов положительного эффекта не дает. На основании анализа результатов моделирования сценариев сделаны следующие утверждения:

1. При оптимистичных сценариях функционирования МИЛ (поиска грузовой базы, модернизации и оптимального варианта функционирования) необходимо увеличение размеров движения до нормативных значений. Этого можно добиться путем привлечения возможных стейкхолдеров перевозочного процесса и предоставлением обоснованных скидок с перевозочного тарифа.

2. Пессимистические сценарии, такие как консервирование и закрытие линии, приводят к негативным тенденциям не только на концепты укрупненной когнитивной карты, связанные с функционированием железной дороги, но также на социальные и экономические возможности территорий, на которых расположен МИЛ.

3. Стабильное функционирование и повышение эффективности функционирования МИЛ возможно при согласованном воздействии на концепты «Оперативного управления перевозочным процессом»; V6 «Технических ресурсов» и «Персонала станций и участка».

4. Отсутствует нормативный (законодательный) механизм стимулирования и поддержки предприятий, которые могут организовывать свои производства рядом с МИЛ для последующей их активной эксплуатации.

5. Размеры движения ниже нормативных негативно влияют на технические ресурсы, персонал станций, участок и показатели работы МИЛ, которые, в свою очередь, негативно влияют на экономические показатели и показатели производительности и эффективности.

Направлением дальнейших исследований повышения эффективности функционирования МИЛ является разработка механизма планирования работы МИЛ на основе состояния технических, технологических и экономических показателей и механизма стимулирования стейкхолдеров перевозочного процесса для интенсификации перевозок на МИЛ. ▲

Библиографический список

1. Кириленко О. Н. Экономическая эффективность методов эксплуатации малонапряженных линий / О. Н. Кириленко // Экономика железных дорог. — 2014. — № 8. — С. 79–85.
2. Вакуленко С. П. Малонапряженные линии: состояние и варианты оптимизации / С. П. Вакуленко, А. В. Колин, Н. Ю. Евреенкова // Мир транспорта. — 2017. — Т. 15. — № 3(70). — С. 174–180. — DOI: doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-4-1.
3. Никитин А. Б. Возможность внедрения цифровой радиосвязи и организации передачи данных между станциями на малонапряженных линиях / А. Б. Никитин, И. В. Кушпиль // Автоматика на транспорте. — 2019. — Т. 5. — № 1. — С. 45–61. DOI: 10.20295/2412-9186-2019-1-45-61.
4. Frumin D. Branching processes of conservative nested Petri nets / D. Frumin, I. A. Lomazova // VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation. — Vol. 28: EPIc Series. EasyChair, 2014. — Pp. 19–35.
5. Chan Y. K. The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management / Y. K. Chan, P. Gaffney, K. Neailey et al. // The TQM Magazine. — 1998. — Vol. 10. — № 6. — Pp. 420–424.
6. Badetskii A. P. Improving the stability of the train formation plan to uneven operational work / A. P. Badetskii, O. A. Medved // Transportation Research Procedia. Ser. "International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2020". — 2021. — Pp. 559–567. — DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
7. Chudzikiewicz A. Simulation evaluation of the costs of adapting the low density traffic line to practical exploitation / A. Chudzikiewicz // Procedia Social and Behavioral Sciences 20. — 2011. — Pp. 244–250. — DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.08.030.
8. Епишкин И. А. Причины появления малонапряженных линий в РФ / И. А. Епишкин, К. В. Фионова // Транспортное дело России. — 2018. — № 6. — С. 262–264.
9. Шарапов С. Н. Повышение эффективности работы малоинтенсивных железнодорожных линий / С. Н. Шарапов, С. В. Горельцев, М. В. Лялько // Железнодорожный транспорт. — 2018. — № 6. — С. 36–46.
10. Ковалев К. Е. Разработка механизмов повышения эффективности функционирования малоинтенсивных железнодорожных линий / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин, О. А. Медведь // Автоматика на транспорте. — 2022. — Т. 8. — № 2. — С. 150–161. — DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161.

11. Ковалев К. Е. Комплексный синергетико-индикаторный подход к управлению процессами перевозок на интенсивных и малодетальных линиях / К. Е. Ковалев, А. В. Новичихин // Автоматика на транспорте. — 2021. — Т. 7. — № 2. — С. 252–267. — DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267.
12. Kovalev K. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models / K. Kovalev, A. Novichikhin // Lecture Notes in Networks and Systems. — 2022. — Vol. 402 LNNS. — С. 701–709. — DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_76.
13. Kovalev K. E. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines / K. E. Kovalev, A. V. Novichikhin // Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series 2131. — 2021. — P. 032008. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008.
14. Кульба В. В. Управление и контроль реализации социально-экономических программ / В. В. Кульба, С. С. Ковалевский. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 400 с.
15. Новиков Д. А. Механизмы функционирования многоуровневых организационных систем / Д. А. Новиков. — М.: Фонд «Проблемы управления», 1999. — 150 с.
16. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. — М.: МПСИ, 2005. — 584 с.
17. Армстронг М. Управление результативностью. Система оценки результатов в действии / М. Армстронг. — Альпина Диджитал, 2011. — 276 с.
18. Робертс Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Ф. С. Робертс; пер. англ. А. М. Раппопорта, С. И. Травкина; под ред. А. И. Теймана. — М.: Наука, 1986. — 496 с.
19. Node.js — программная платформа. — URL: <https://www.node.org/> (дата обращения: 24.08.2022).
20. Управление и контроль реализации социально-экономических целевых программ / Под ред. В. В. Кульбы, С. С. Ковалевского. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 400 с.
21. Касти Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы: Пер. англ. / Касти Дж. — М.: Мир, 1982. — 216 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 72-86
 DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-72-86

Diagnosics Mechanism of Low-Density Railway Lines on the Basis of Fuzzy Cognitive Modeling

Information about authors

Kovalev K. E., PhD in Engineering, Associate Professor¹. E-mail: kovalev_kostia@mail.ru

Novichikhin A. V., Doctor in Engineering, Professor¹. E-mail: novichihin@bk.ru

Sakovich I. L., PhD in Engineering, Associate Professor¹, First Deputy Head for Economics, Finance and Corporate Coordination². E-mail: logist@pgups.ru

Bolotin V. A., PhD in Engineering, Professor¹. E-mail: spb-vab@yandex.ru

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, "Logistics and Commercial Work" Department, Saint Petersburg

²Oktyabrskaya Railway – branch of JSC "Russian Railways", St. Petersburg

Abstract: For to identify functioning problem of railway lines various mechanisms are used, including the mechanism of low-density railway line exploitation diagnostics which allows to raise their functioning efficiency. The proposed mechanism allows to evaluate low-density railway line current state and to establish cause-and-effect relationships leading to line unprofitability, to give analysis of indicators which to the greatest extent influence negatively the line functioning. Cognitive modeling method is used for this purpose. The article develops enlarged cognitive map of low-density railway line functioning that's used for the diagnostics of line exploitation existing state. Cognitive map consists of concepts, links between concepts and links' weight values. On cognitive map basis, adjacency matrix is made up which allows to evaluate reliability and sustainability of fuzzy cognitive map according to internal and external disturbances. Characteristic equation and matrix eigenvalues are calculated which allow to give the assessment of cognitive map indicators in the form of the influence of concepts on system and of system on concepts.

Fuzzy cognitive map indicators are established, namely, system influence consonance, system influence dissonance, concept influence on system which give the most complete representation of low-density line internal structure. "Technical resources", "stations' and section's staff", "normative base" among concepts touch on the largest positive impact on system. The most significant positive influence on the listed concepts will allow to rise operation efficiency of low-density railway lines. "Traffic volume" concept among concepts causes the most negative influence on the system because of the lack of quantity of train pairs, passing along the line, a day.

The plan of experiments for to define the changes in the parameters of "Productivity and effectiveness" concepts, when exerting impulse influences on "Operational management", "Technical resources" and "Stations' and section's staff" concepts with the purpose of the evaluation of their influence on "Productivity" and "Efficiency" concepts, is made up. When introducing impulses into "Staff" concept, productivity and efficiency growth is observed that testifies to the possibility of efficiency rise of low-density railway line functioning by the way of positive impulse on "Staff" concept.

Keywords: management of transportation processes; low-density lines; diagnostics mechanism for low-density railway line exploitation; cognitive modeling; impulse processes; railway transport.

References

1. Kirilenko O. N. Ekonomicheskaya effektivnost' metodov ekspluatatsii malodeyatel'nykh liniy [Economic efficiency of operating methods for low-capacity lines]. *Ekonomika zheleznykh dorog* [Economics of Railways]. 2014, I. 8, pp. 79–85. (In Russian)
2. Vakulenko S. P., Kolin A. V., Evreenova N. Yu. Malodeyatel'nye linii: sostoyanie i varianty optimizatsii [Inactive lines: state and optimization options]. *Mir transporta* [World of transport]. 2017, vol. 15, I. 3 (70), pp. 174–180. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-4-1. (In Russian)
3. Nikitin A. B., Kushpil' I. V. Vozmozhnost' vnedreniya tsifrovoy radiosvyazi i organizatsii peredachi dannykh mezhdru 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 research]. 2019, vol. 5, I. 1, pp. 45–61. (In Russian)
4. Frumin D., Lomazova I. A. Branching processes of conservative nested Petri nets. VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation. 2014, vol. 28: EPIC Series. EasyChair, pp. 19–35.
 5. Chan Y. K., Gaffney P., Neailey K., Ip W. H. The establishment of an integrated management system paradigm for railway engineering management. *The TQM Magazine*. 1998, vol. 10, i. 6, pp. 420–424.
 6. Badetskii A. P., Medved O. A. Improving the stability of the train formation plan to uneven operational work. *Transportation Research Procedia. Ser. "International Scientific Siberian Transport Forum, TransSiberia 2020"*. 2021, pp. 559–567. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.108.
 7. Chudzikiewicz A. Simulation evaluation of the costs of adapting the low density traffic line to practical exploitation. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 20. 2011, pp. 244–250. DOI:10.1016/j.sbspro.2011.08.030.
 8. Epishkin I. A., Fionova K. V. Prichiny poyavleniya malodeyatel'nykh liniy v RF [Reasons for the appearance of low-density lines in the Russian Federation]. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia]. 2018, I. 6, pp. 262–264. (In Russian)
 9. Sharapov S. N., Gorel'tsev S. V., Lyal'ko M. V. Povyshenie effektivnosti raboty malo-intensivnykh zheleznodorozhnykh liniy [Improving the efficiency of low-density railway lines]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway transport.]. 2018, I. 6, pp. 36–46. (In Russian)
 10. Kovalev K. E., Novichikhin A. V., Medved' O. A. Razrabotka mekhanizmov povysheniya effektivnosti funktsionirovaniya malointensivnykh zheleznodorozhnykh liniy [Development of mechanisms for improving the efficiency of low-density railway lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2022, vol. 8, I. 2, pp. 150–161. DOI: 10.20295/2412-9186-2022-8-2-150-161 (In Russian)
 11. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Kompleksnyy sinergetiko-indikatornyy podkhod k upravleniyu protsessami perevozok na intensivnykh i malodeyatel'nykh liniyakh [Integrated synergetic-indicator approach to managing transportation processes on intensive and low-density lines]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation research]. 2021, vol. 7, I. 2, pp. 252–267. DOI: 10.20295/2412-9186-2021-7-2-252-267 (In Russian)
 12. Kovalev K., Novichikhin A. Interaction of intensive and low-density lines: management approach and models. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022, vol. 402 LNNS, pp. 701–709. DOI: 10.1007/978-3-030-96380-4_76.
 13. Kovalev K. E., Novichikhin A. V. Ford-Fulkerson algorithm refinement for the cooperation effectiveness increase of intensive and low-density lines. *Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) Journal of Physics: Conference Series* 2131. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/032008.
 14. Kul'ba V. V., Kovalevskiy S. S. *Upravlenie i kontrol' realizatsii sotsial'no-ekonomicheskikh program* [Management and control of the implementation of socio-economic programs]. Moscow: «LIBROKOM» Publ., 2009. 400 p. (In Russian)
 15. Novikov D. A. *Mekhanizmy funktsionirovaniya mnogourovnevnykh organizatsionnykh sistem* [Functioning mechanisms of multi-level organizational systems]. Moscow: Fond «Problemy upravleniya» Publ., 1999. 150 p. (In Russian)
 16. Novikov D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Theory of management of organizational systems]. Moscow: MPSI Publ., 2005. 584 p. (In Russian)
 17. Armstrong M. *Upravlenie rezul'tativnost'yu. Sistema otsenki rezul'tatov v deystvii* [Performance management. The system for evaluating results in action]. «Al'pina Didzhital» Publ., 2011. 276 p. (In Russian)
 18. Roberts F. S. *Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nym, biologicheskim i ekologicheskim zadacham* [Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological and Ecological Problems]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 496 p. (In Russian)
 19. *Node.js — programmnaya platforma* [Node.js is a software platform]. Available at: <https://www.node.org/> (accessed: August 24, 2022).
 20. *Upravlenie i kontrol' realizatsii sotsial'no-ekonomicheskikh tselevykh program* [Management and control of the implementation of socio-economic target programs]. Moscow: «LIBROKOM» Publ., 2009. 400 p. (In Russian)
 21. Kasti Dzh. *Bol'shie sistemy. Svyaznost', slozhnost' i katastrofy* [Large systems. Connectivity, complexity and catastrophes]. Moscow: Mir Publ., 1982. 216 p. (In Russian)