

ТРАНСПОРТНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

УДК 658.5, 621.331

DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_92

*А. Н. Митрофанов, Ю. И. Жарков, С. А. Окладов***ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ТЯГИ ПОЕЗДОВ**

Аннотация. Представлен подход к построению цифровых двойников бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов на полигонах железных дорог. Подход основан на матричной структуре представления бизнес-процессов грузовых перевозок и их обеспечения со стороны центральных дирекций ОАО «РЖД». В качестве формы построения цифровых двойников (моделей) предложено использовать функционалы, а в качестве параметров цифровой модели – показатели, имеющие наибольший уровень корреляционной взаимосвязи с фактическим показателем энергообеспечения тяги поездов. В качестве показателей бизнес-процессов рассматривались: расход электроэнергии на тягу поездов; удельный расход электроэнергии на тягу поездов; небаланс электроэнергии; работа в электротяге; участковая скорость; средний вес грузового поезда и другие.

Ключевые слова: бизнес-процессы, энергообеспечение тяги поездов, расход электроэнергии, цифровые двойники, корреляционный анализ, методы идентификации.

Для цитирования: Митрофанов, А. Н. Подход к построению моделей цифровых двойников бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов / А. Н. Митрофанов, Ю. И. Жарков, С. А. Окладов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 3. – С. 92–102. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_92.

Введение

Задачи оценки и повышения эффективности бизнес-процессов ОАО «РЖД» относятся к приоритетным направлениям инновационного развития холдинга на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года [1].

Однако, несмотря на установленные в данном документе приоритеты использования информационных технологий, на территориальных филиалах ОАО «РЖД» оценка эффективности в основном строится на базе полуэмпирических технологий. Анализ и решение производится представителями функциональных дирекций при региональных операционных комиссиях (ОКР) на сопоставления фактических показателей с плановыми показателями деятельности и без использования системного аналитического анализа деятельности дирекций с использованием моделей цифровых двойников хозяйств и подразделений.

Проводя анализ текущего состояния уровня цифровизации процедур и технологий перевозочного процесса и состояния технологий хозяйств, обеспечивающих грузовые перевозки, на региональных центрах корпоративного управления (РЦКУ) территориальных филиалов ОАО «РЖД», следует отметить, что цифровые показатели и автоматизированные системы по видам деятельности хозяйств насчитывают более 3000 видов и эксплуатируются достаточно давно: АСОУП, Этран, ИОММ, ГИД-Урал, АСУ-Т, АСУ-Э, КАСАНТ и др.

Для принятия решений оперативного управления с использованием цифровых двойников бизнес-процессов необходимо из значительного множества используемых показателей деятельности по различным хозяйствам и дирекциям выделить основные – «ключевые» показатели эффективности (КПЭ).

В рамках научных направлений: «Идентификация энергоэффективных технологий на железнодорожном транспорте», в СамГУПС [3–7], и «Автоматизированные системы электроснабжения», в РГУПС [8–12], разработано методологическое обоснование подбора показателей грузовых перевозок и обеспечивающих данные перевозки хозяйств для установления их связей и взаимовлияния с бизнес-процессами энергообеспечения тяги поездов на направлениях тяжеловесного движения. Проведенное исследование, а также работы в области теории идентификации [13, 14] позволили предложить подходы к формам построения цифровых двойников, к выбору показателей, которые могут быть использованы для построения моделей цифровых двойников, позволяющих моделировать режимы процессов энергообеспечения тяги поездов и их автоматизации.

Содержательный смысл каждой из данных условных взаимосвязей будет характеризовать влияние на грузовые перевозки на конкретном полигоне железной дороги определенной Территориальной дирекции. Несмотря на достаточную условность подобного представления взаимосвязей, этот подход позволяет получать закономерности взаимосвязи КПЭ перевозочного процесса и КПЭ дирекций в количественном виде и так же сопоставлять данные показатели по территориальным полигонам. На полигонах железных дорог уже есть примеры использования подобных условных взаимосвязей, например, в подразделениях локомотивного хозяйства показатель «Удельный расход электроэнергии на тягу поездов» определяется как отношение показателя «Расход электроэнергии на тягу поездов» к показателю «Работа в электротяге».

Поскольку очевидно, что осуществление грузовых перевозок на полигоне возможно лишь при совместном их обеспечении со стороны многих Центральных дирекций, то зависимость показателей грузовых перевозок от показателей деятельности обеспечивающих его хозяйств будет описываться уже не одиночной взаимосвязью, а некоторой многофакторной зависимостью, то есть представлять собой некоторый функционал F .

Для любого i -го исследуемого полигона в составе направления движения тяжеловесных поездов с центром управления и принятия решений в РЦКУ(i) выражение, описывающее вектор показателей грузового движения $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$, будет иметь вид:

$$Y_{\text{РЦКУ}(i)}^* = F_{\text{РЦКУ}(i)}(X_{\text{ТЦФТО}(i)}, X_{\text{ТДИ}(i)}, X_{\text{ТТЭ}(i)}, X_{\text{ТДТ}(i)}, \dots, X_{\text{ТДУД}(i)}) + \xi_{\text{РЦКУ}(i)}, \quad (1)$$

где $Y_{\text{РЦКУ}(i)}^*$ – вектор расчетных показателей цифровой модели (цифровой двойник) вектора фактических показателей грузового движения $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$ на территориальном РЦКУ(i);

$X_{\text{ТЦФТО}(i)}$, $X_{\text{ТДИ}(i)}$, $X_{\text{ТТЭ}(i)}$, $X_{\text{ТДТ}(i)}$, \dots , $X_{\text{ТДУД}(i)}$ – векторы наблюдаемых фактических показателей территориальных хозяйств Центральные дирекций, обеспечивающих грузовое движение на РЦКУ(i). Здесь $X_{\text{ТТЭ}(i)}$ – вектор показателей i -го территориального хозяйства дирекции Трансэнерго филиала ОАО «РЖД»;

$F_{\text{РЦКУ}(i)}$ – вектор функционалов взаимосвязи между векторами наблюдаемых фактических показателей $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$ и показателей территориальных хозяйств Центральные дирекций на РЦКУ(i). Для вычисления вектора расчетных показателей $Y_{\text{РЦКУ}(i)}^*$ по выражению (1) на первом этапе надо найти вектор функционалов – $F_{\text{РЦКУ}(i)}$. Решение данной задачи известно, оно лежит в области параметрической идентификации [6, 7] и в данной статье подробно не рассматривается;

$\xi_{\text{РЦКУ}(i)}$ – вектор стохастической составляющей влияния на качество цифровой модели из-за неучтенных факторов на i -м исследуемом полигоне. Это связано с тем, что фактические показатели грузового движения $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$ представляются оценочными показателями цифровой модели $Y_{\text{РЦКУ}(i)}^*$ только с определенной погрешностью. Причем погрешности по различным показателям вектора $Y_{\text{РЦКУ}(i)}$ могут быть различными. Очевидно, что и по различным РЦКУ абсолютные значения показателей и погрешности их оценивания также будут различными.

Векторы показателей бизнес-процессов грузовых перевозок коридоров и направлений тяжеловесного движения $Y_{(1 \div N)}$, в которые интегрированы все от 1 до N полигонов территориальных филиалов, целесообразно получать также методами идентификации. Однако идентификация $Y_{(1 \div N)}$ по оценкам показателей отдельных полигонов $Y_{\text{РЦКУ}(1)}^*$, $Y_{\text{РЦКУ}(2)}^*$, \dots , $Y_{\text{РЦКУ}(i)}^*$, \dots , $Y_{\text{РЦКУ}(N)}^*$ может привести к значительным погрешностям. Более точное оценивание $Y_{(1 \div N)}$ может быть получено с использованием объемных и обобщенных по коридору (направлению) фактических показателей территориальных хозяйств Центральные дирекций, которые не содержат вычисляемых операций (типа «Удельный расход электроэнергии на тягу поездов»). При этом выражение, описывающее вектор показателей грузового движения по коридору (направлению) $Y_{(1 \div N)}$, будет иметь вид:

$$Y_{(1 \div N)}^* = F_{(1 \div N)}(X_{\text{ТЦФТО}(1 \div N)}, X_{\text{ТДИ}(1 \div N)}, X_{\text{ТТЭ}(1 \div N)}, X_{\text{ТДТ}(1 \div N)}, \dots, X_{\text{ТДУД}(1 \div N)}) + \xi_{(1 \div N)}, \quad (2)$$

где $Y_{(1 \div N)}^*$ – вектор расчетных показателей цифровой модели (цифровой двойник) вектора фактических показателей грузового движения $Y_{(1 \div N)}$ по коридору (направлению);

$X_{\text{ЦФТО}}(1 \div N), X_{\text{ТДИ}}(1 \div N), X_{\text{ТТЭ}}(1 \div N), X_{\text{ТДТ}}(1 \div N), \dots, X_{\text{ТДУД}}(1 \div N)$ – векторы наблюдаемых фактических от 1 до N показателей территориальных хозяйств Центральные дирекции. Здесь $X_{\text{ТТЭ}}(1 \div N)$ – вектор показателей от 1 до N хозяйств дирекции Трансэнерго;

$F_{(1 \div N)}$ – вектор функционалов взаимосвязи между векторами наблюдаемых фактических показателей $Y_{(1 \div N)}$ и показателей всех от 1 до N территориальных хозяйств Центральные дирекции;

$\xi_{(1 \div N)}$ – вектор стохастической составляющей влияния на качество цифровой модели из-за неучтенных факторов по коридору (направлению).

Исходя из физического единения деятельности бизнес-процессов грузовых перевозок и хозяйств Центральные дирекции, обеспечивающих данные перевозки, представленный выше идентификационный подход может быть использован и для оценивания показателей бизнес-процессов данных хозяйств. Так очевидно, что при увеличении на полигоне железной дороги объема грузооборота потребуются, например, увеличение рабочего парка электровозов, грузовых вагонов, а также увеличение объемов потребления электроэнергии, расходуемой на тягу поездов и ряд других мероприятий. Таким образом, при известных значениях показателей грузооборота, значений других названных показателей и вычисленных методами идентификации функционалов, определяющих их взаимосвязь, можно определять и потребное значение «Расхода электроэнергии на тягу поездов». В целом формализованное выражение для оценки вектора показателей i -го территориального хозяйства дирекции Трансэнерго $X_{\text{ТТЭ}}(i)$ будет иметь следующий вид:

$$X_{\text{ТТЭ}}^*(i) = F_{\text{ТТЭ}}(i) (Y_{\text{РЦКУ}}(i), X_{\text{ЦФТО}}(i), X_{\text{ЦДИ}}(i), X_{\text{ЦДТ}}(i), \dots, X_{\text{ЦДУД}}(i)) + \xi_{\text{ТТЭ}}(i), \quad (3)$$

где $X_{\text{ТТЭ}}^*(i)$ – вектор расчетных показателей цифровой модели (цифровой двойник) вектора фактических показателей $X_{\text{ТТЭ}}(i)$ для i -го территориального хозяйства дирекции Трансэнерго;

$F_{\text{ТТЭ}}(i)$ – вектор функционалов взаимосвязи между векторами наблюдаемых фактических показателей $X_{\text{ТТЭ}}(i)$, показателей $X_{\text{ЦФТО}}(i), X_{\text{ЦДИ}}(i), X_{\text{ЦДТ}}(i), \dots, X_{\text{ЦДУД}}(i)$ других территориальных хозяйств Центральные дирекции и фактических показателей грузового движения $Y_{\text{РЦКУ}}(i)$ на i -м территориальном полигоне;

$\xi_{\text{ТТЭ}}(i)$ – вектор стохастической составляющей влияния на качество цифровой модели из-за неучтенных факторов на i -м территориальном полигоне.

Выражение (3) по отношению к выражению (1) является обратным. Для повышения устойчивости решений обратных уравнений, как правило, используются методы их регуляризации, например, метод регуляризации по А. Н. Тихонову.

С учетом доводов, приведенных при формировании выражения (2), могут быть определены векторы расчетных показателей любых цифровых моделей (цифровых двойников) для Центральные дирекции в целом по коридору (направлению). Так вектор показателей для дирекции Трансэнерго по коридору (направлению) в целом $X_{\text{ТТЭ}}(1 \div N)$ может быть определен из выражения:

$$X_{\text{ТТЭ}}^*(1 \div N) = F_{\text{ТТЭ}}(1 \div N) \begin{pmatrix} Y_{\text{РЦКУ}}(1 \div N), X_{\text{ЦФТО}}(1 \div N), X_{\text{ЦДИ}}(1 \div N), X_{\text{ЦДТ}}(1 \div N), \dots \\ \dots, X_{\text{ЦДУД}}(1 \div N) \end{pmatrix} + \xi_{\text{ТТЭ}}(1 \div N), \quad (4)$$

где $X_{\text{ТТЭ}}^*(1 \div N)$ – вектор расчетных показателей цифровой модели (цифровой двойник) вектора фактических показателей $X_{\text{ТТЭ}}(1 \div N)$ для дирекции Трансэнерго по коридору (направлению) в целом;

$F_{(1 \div N)}$ – вектор функционалов взаимосвязи между векторами наблюдаемых фактических показателей $Y_{(1 \div N)}$ и показателей всех от 1 до N территориальных хозяйств Центральные дирекции;

$\xi_{(1 \div N)}$ – вектор стохастической составляющей влияния на качество цифровой модели из-за неучтенных факторов по коридору (направлению).

К целевым значениям для КПЭ бизнес-процессов грузовых перевозок на электротяге для РЦКУ, как правило, относят 5 (пять) следующих показателей: «Погрузка грузов», «Грузооборот, всего», «Средний вес поезда, брутто грузового движения», «Средняя участковая скорость грузового поезда», «Среднесуточная производительность локомотива рабочего парка в грузовом движении». В качестве КПЭ бизнес-процессов, как правило, устанавливается один показатель – «Удельный расход электроэнергии на тягу поездов», который является показателем использования расхода электроэнергии на тягу поездов электроподвижным составом (ЭПС), отнесенной к единице измерения выполняемой ЭПС тонно-километровой работы – 10 тыс. ткм брутто.

В данный состав КПЭ ОАО «РЖД» не был включен ряд важных показателей деятельности хозяйства «Электрификации и электроснабжения» дирекции Трансэнерго, таких как объемные показатели расхода электроэнергии на тягу поездов и потери электроэнергии, которые сопровождают процесс транспортировки электроэнергии от тяговых подстанций до токоприемников ЭПС. Потери электроэнергии в системе показателей дирекции Трансэнерго определяются как разница или небаланс показаний счетчиков расхода электроэнергии на тяговых подстанций (ТП) и показаний счетчиков расхода электроэнергии на ЭПС. Оценку уровня небаланса (потерь) следует проводить в процентном отношении именно к объемным показателям расхода электроэнергии на тягу поездов по показаниям счетчиков ТП.

Обоснованность включения названных показателей в список контролируемых КПЭ бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов определяется следующим:

1 Планирование расхода электроэнергии на тягу на филиалах ОАО «РЖД» осуществляется именно в объемных показателях и может составлять около 2,5–3 млрд кВтч/год на один территориальный филиал направления тяжеловесного движения (рис. 1), что требует финансовых расходов до 12 млрд рублей/год. Ошибка в планировании на 1 % может привести к ошибке в 120 млн рублей.

2 Небалансы тягового электропотребления зависят от наличия как технологически обоснованных потерь электроэнергии при её транспортировке, так и от коммерчески необоснованных потерь электроэнергии и могут по одному филиалу ОАО «РЖД» на участках постоянного тока достигать значений 20 %. Это означает, что в подобных филиалах ОАО «РЖД» будет наблюдаться неэффективное использование пятой части тягового электропотребления, то есть около 2,5 млрд рублей/год. Отсутствие контроля за данным КПЭ и увеличение показателя небаланса на 1 % может привести к необоснованным финансовым затратам до 120 млн рублей/год.

На основании вышеизложенного предложено использовать расширенный список КПЭ бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов, представленный в табл. 1.

Таблица 1

Содержание и обозначение ключевых показателей эффективности Трансэнерго

	Наименование КПЭ бизнес-процессов	Единица измерения	Сокращенное обозначение КПЭ
1	Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП	кВтч	(Расход Вт тп)
2	Удельный расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП	кВтч/10тыс ткм бр	(Уд Расход Wуд тп)
3	Небаланс электроэнергии (ТП – ЭПС) / ТП	%	(Wнеб)

На основании теоретических изысканий для оценки влияния на энергообеспечение тяги поездов было предложено использовать расширенный список из четырнадцати бизнес-процессов – КПЭ грузовых перевозок и КПЭ хозяйств по их обеспечению. В табл. 2 представлены примеры КПЭ из оценки деятельности РЦКУ; в табл. 3 – КПЭ деятельности локомотивного хозяйства; в таблице 4 – КПЭ деятельности вагонного хозяйства ЦДИ.

Таблица 2

Содержание и обозначение ключевых показателей эффективности РЦКУ бизнес-процессов грузовых перевозок

	Наименование КПЭ бизнес-процессов	Единица измерения	Сокращенное обозначение КПЭ
1	Погрузка	тонны	(Погрузка)
2	Грузооборот тарифный	ткм нетто	(ГруОбТар Grt)
3	Средняя участковая скорость грузового поезда	км/час	(V уч. – скорость)
4	Средний вес грузового поезда	тонны	(Q – ср. вес поезда)

Проведенный анализ подтвердил наличие влияния КПЭ бизнес-процессов грузовых перевозок и бизнес-процессов других хозяйств на КПЭ бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов и позволил выявить «приоритетные» КПЭ. К «приоритетным» КПЭ могут быть отнесены такие показатели, которые из множества исследуемых КПЭ (табл. 2–4) будут наиболее сильно влиять на изменение КПЭ бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов. Выявление подобных КПЭ основано на построении парных коэффициентов корреляции (R) между анализируемым КПЭ из группы бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов и КПЭ бизнес-процессов грузовых перевозок и других обеспечивающих хозяйств.

Таблица 3

**Содержание и обозначение ключевых показателей эффективности
локомотивного хозяйства ЦДТ**

	Наименование КПЭ бизнес-процессов	Единица измерения	Сокращенное обозначение КПЭ
5	Работа в электротяге	ткм брутто	(Работа Аэ)
6	Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ЭПС	квтч	(Расход Wэпс)
7	Рабочий парк электровозов в грузовом движении	ед	(Раб. Парк Эл-зов)
8	Среднесуточный пробег электровоза рабочего парка	км	(S–Средн. Сут.Проб.Эл-за)
9	Производительность электровоза рабочего парка	ткм брутто	(Произв. Эл-за Pr)

Таблица 4

**Содержание и обозначение ключевых показателей эффективности вагонного хозяйства
ЦДИ (В)**

	Наименование КПЭ бизнес-процессов	Единица измерения	Сокращенное обозначение КПЭ
10	Простой вагона на 1-й технической станции	час	(Прост. ваг/1 ст.)
11	Оборот грузового вагона	сутки	(Оборот гр. Ваг.)
12	Производительность вагона	ткм нетто	(Произв. Ваг.)
13	Рабочий парк грузовых вагонов	ваг	(Раб. Парк. Гр. Ваг.)
14	Статическая нагрузка	тонн/ваг	(Стат. нагр.)

На рис. 2 представлен пример построения гистограммы коэффициентов корреляции R между КПЭ «Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП» (Расход W_t тп) и другими КПЭ из подпроцесса «Производство и безопасность», обозначенных в табл. 1–4.

Так, среди КПЭ по оценке энергообеспечения (табл. 1) «приоритетным» КПЭ будет «Небаланс электроэнергии», поскольку $R = 0,39$. Однако данная взаимосвязь определяется как «слабая», исходя из принадлежности её к критериальному диапазону $0,3 < R < 0,5$. Взаимосвязь КПЭ Расход W_t тп с КПЭ «Удельный расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП» (Уд Расход $W_{уд}$ тп) отсутствует, поскольку $R = 0,14$.

Среди КПЭ, отнесенных к показателям РЦКУ по грузовым перевозкам (табл. 2), «приоритетным» КПЭ будет «Грузооборот тарифный» (ГруОбТар Grt), поскольку его $R = 0,68$. Данная взаимосвязь определяется как «средняя», исходя из принадлежности её к критериальному диапазону $0,5 < R < 0,7$.

Среди КПЭ, отнесенных к показателям локомотивного хозяйства ЦДТ (табл. 3), «приоритетным» КПЭ будет «Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ЭПС» (Расход $W_{эл}$) – $R = 0,92$, а также КПЭ «Работа в электротяге» (Работа $A_{э}$) – $R = 0,88$. Данные взаимосвязи определяются как «сильные», исходя из принадлежности их к критериальному диапазону $0,7 < R < 1,0$.

Среди КПЭ, отнесенных к показателям вагонного хозяйства (табл. 4) «приоритетным» КПЭ будет «Производительность вагона» (Произв. Ваг.), поскольку его коэффициент корреляции с «Расход $W_{тп}$ » наибольший в группе $R = 0,34$.

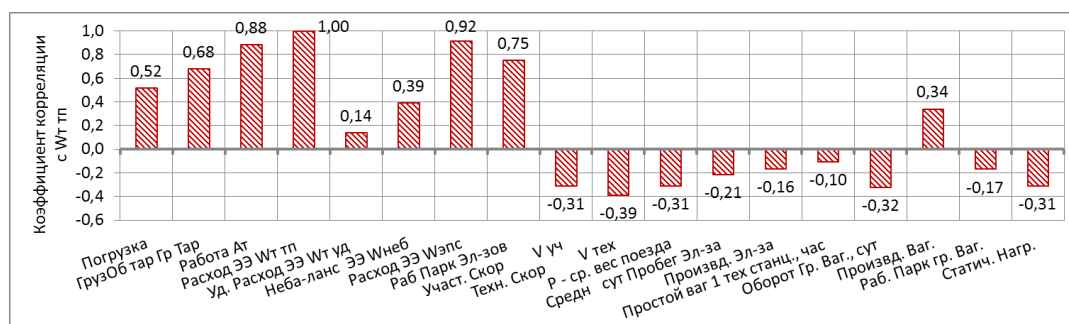


Рис. 2. Пример гистограммы коэффициентов корреляции КПЭ «Расход электроэнергии на тягу поездов по показаниям на ТП» с бизнес-процессами грузовых перевозок

Использование выявленных представленным образом «приоритетных» КПЭ в структуре цифровых двойников предложенной формы позволит выполнять операции оценивания граничных значений или прогнозирования количественных значений КПЭ энергообеспеченности тяги поездов на предстоящий период [3, 6].

Для повышения информативности выявления «приоритетных» КПЭ относительно сразу всех КПЭ энергообеспечения тяги поездов, предложено использовать кластерные методы анализа. На рис. 3 представлены в виде дендрограммы результаты обработки КПЭ семнадцати бизнес-процессов из приведенного выше списка КПЭ.

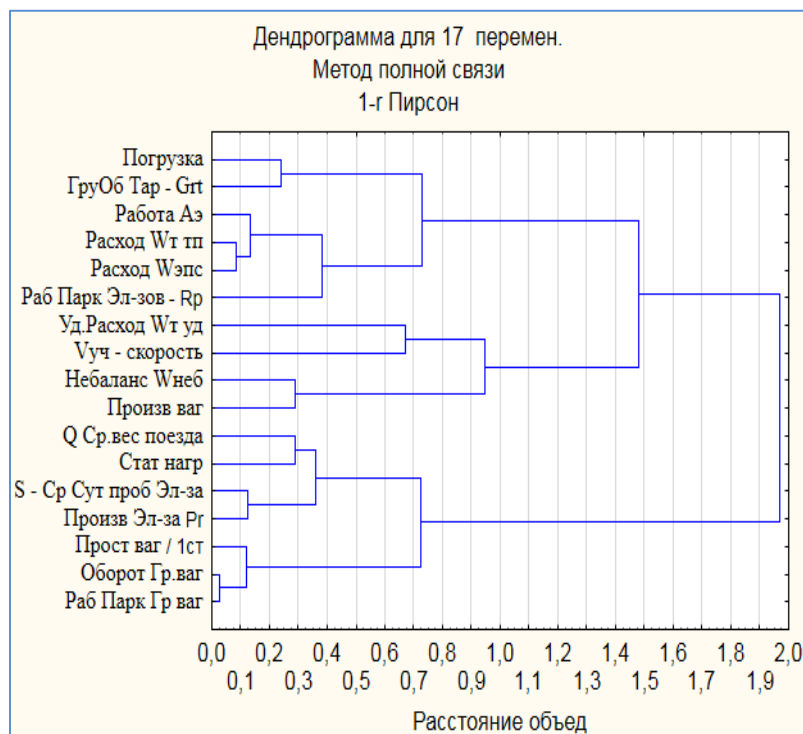


Рис. 3. Дендрограммы результатов обработки КПЭ семнадцати бизнес-процессов

В дендрограмме степень близости КПЭ изображается в виде одиночных «уровней взаимосвязи» или их групп – кластеров, отстоящих от нулевой оси абсцисс «Расстояние объединений» на расстояния, пропорциональные разнице между единицей и коэффициентом корреляции R по Пирсону, то есть согласно метрике $(1 - R \text{ Пирсон})$. При этом, если «уровень взаимосвязи» КПЭ или их кластеров находится по оси

«Расстояние объединений» на уровне 0, то это соответствует полной положительной взаимосвязи между КПЭ, то есть $R = 1$. Если «уровень к взаимосвязи» КПЭ по оси равен 1, то это соответствует полному отсутствию взаимосвязи между КПЭ, то есть $R = 0$. Если «уровень взаимосвязи» КПЭ по оси равен 2, то это соответствует полной отрицательной взаимосвязи между КПЭ, то есть $R = -1$.

Так на рис. 3 ранее выявленная взаимосвязь между КПЭ «Расход W_t тп» и КПЭ «Расход $W_{эпс}$ », которая находится на уровне $R = 0,92$, отображается «уровнем взаимосвязи», значительно приближенной к нулевой оси «Расстояние объединений». Следующей по силе наблюдается взаимосвязь КПЭ «Расход W_t тп» с КПЭ «Работа $A_{э}$ » – $R = 0,88$ и с КПЭ «ГруОбТар Grt », – около $R = 0,7$.

На дендограмме КПЭ «Небаланс $W_{неб}$ » наиболее взаимосвязан с КПЭ «Производительность вагона». Уровень их связи по оси «Расстояние объединений» составляет 0,3, что соответствует $R = 0,7$. Из дендограммы установлено, что показатель «Уд. Расход W_t уд» наиболее сильно взаимосвязан с КПЭ «Участковая скорость» ($V_{уч}$ – скорость). Уровень их связи по оси «Расстояние объединений» составляет 0,65, что соответствует $R = 0,35$.

Выводы

1 В условиях широкого использования на железнодорожном транспорте цифровых технологий принятие решений об эффективности бизнес-процессов грузовых перевозок и энергообеспечения тяги поездов должно осуществляться с использованием моделей цифровых двойников анализируемых бизнес-процессов.

2 Исходя из матричного представления характера грузовых перевозок по направлениям тяжеловесного движения, предложено осуществлять формирование моделей цифровых двойников бизнес-процессов, в том числе и бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов на основании использования формата функционалов. Параметрическая оценка функционалов осуществляется методами идентификации.

3 Обоснование выбора ключевых показателей деятельности бизнес-процессов энергообеспечения тяги поездов на полигонах тяжеловесного движения, которые целесообразно использовать при построении цифровых двойников должно быть основано на анализе физической обоснованности и корреляционной взаимосвязи бизнес-процессов. КПЭ бизнес-процессов грузовых перевозок и других территориальных и обеспечивающих хозяйств, имеющие наиболее тесные взаимосвязи с КПЭ энергообеспечения тяги поездов – «приоритетные КПЭ», имеют большее предпочтение для включения их в «цифровую модель» исследуемого бизнес-процесса.

Список литературы

1 Распоряжение правительства от 19 марта 2019 года №466-р «Об утверждении долгосрочной Программы развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года». – URL: <http://d-russia.ru/utverzhdyon-plan-perehoda-rzhd-na-tsifrovuyu-zheleznuyu-dorogu.html> (дата обращения: 20.05.2023).

2 Якунин, В. Новая матрица управления холдингом / В. Якунин // РЖД-Партнер. – 2013. – № 3. – С. 12–15. – URL: <http://www.rzd-partner.ru/publications/rzd-partner/247/novaia-matritsa-upravleniia-kholdingom/> (дата обращения: 01.09.2023).

3 Митрофанов, А. Н. Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов: монография / А. Н. Митрофанов; М-во трансп. Российской Федерации, Федеральное агентство ж.-д. трансп., ГОУ ВПО СамГАПС. – Самара : СамГАПС, 2005. – 174 с. – ISBN 5-98941-020-4.

4 Усиление системы тягового электроснабжения при проведении поездов повышенной массы и длины : монография / А. Н. Митрофанов,

References

1 Government Decree dated March 19, 2019 No. 466-r “On Approval of the Long-Term Development Program of JSC Russian Railways until 2025”. – URL: <http://d-russia.ru/utverzhdyon-plan-perehoda-rzhd-na-tsifrovuyu-zheleznuyu-dorogu.html> (date of access: 05/20/2023).

2 Yakunin, V. New holding management matrix / V. Yakunin // RZD-Partner. – 2013. – No. 3. – P. 12–15. – URL: <http://www.rzd-partner.ru/publications/rzd-partner/247/novaia-matritsa-upravleniia-kholdingom/> (date of access: 09/01/2023).

3 Mitrofanov, A. N. Modeling of processes of forecasting and control of electric power consumption of train traction: monograph / A. N. Mitrofanov; M-in transp. Russian Federation, Federal Agency for railway transp., GOU VPO SamGAPS. – Samara : SamGAPS, 2005. – 174 p. – ISBN 5-98941-020-4.

4 Strengthening the system of traction power supply when carrying trains of increased mass and length : monograph / A. N. Mitrofanov, M. A. Garanin, E.

М. А. Гаранин, Е. В. Добрынин [и др.]; М-во трансп. Российской Федерации, Федеральное агентство ж.-д. трансп., ГОУ ВПО СамГАПС. – Самара : СамГАПС, 2006. – 156 с. – ISBN 5-98941-040-9.

5 Моделирование процессов электропотребления тяги поездов по участкам смежных железных дорог : монография / Е. В. Добрынин, А. Н. Митрофанов, О. В. Табаков; ФГБОУ ВО СамГУПС. – Самара : СамГУПС, 2011. – 88 с. – ISBN 978-5-98941-150-4.

6 Методика идентификации граничных эксплуатационных показателей пропускания тяжеловесных поездов по условиям электроснабжения / А. Н. Митрофанов, К. К. Утарбаев, С. А. Митрофанов, Н. С. Козлова // Вестник транспорта Поволжья. – № 2(80). Самара, 2020. – С. 27–35. – EDN WDYDUR.

7 Прогнозирование показателей энергообеспеченности перевозочного процесса на базе многофакторных моделей / А. Н. Митрофанов, Г. М. Третьяков, С. В. Копейкин // Электротехника. – № 3. – Москва : СамГУПС, 2017. – С. 12–17. – EDN XWVTVN.

8 Автоматизация диагностирования систем релейной защиты и автоматики электроустановок: монография / Ю. И. Жарков, В. Г. Лысенко, Е. А. Стороженко. – Москва : Маршрут, 2005. – 175 с. – ISBN 5-89035-253-9.

9 Цифровые технологии в автоматизированных системах электроснабжения железных дорог / Н. А. Попова, Ю. И. Жарков, О. В. Кубкина [и др.] // Транспорт : наука, образование, производство (Транспорт – 2019) : сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 23–26 апреля 2019 года. Том 4. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 110–114. – EDN TOAIAL.

10 **Жарков, Ю. И.** Система мониторинга, прогнозирования, раннего обнаружения и профилактики опасных внешних воздействий и дефектов в системах электроснабжения (проблемы и концепция) / Ю. И. Жарков, Е. П. Фигурнов // Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте : Тезисы докладов Третьего Международного симпозиума Eltrans'2005, Санкт-Петербург, 15–17 ноября 2005 года / Редакционная коллегия : д.т.н. В. В. Сапожников, д.т.н. А. Т. Бурков, д.т.н. А. В. Плакс, начальник службы технической политики Октябрьской ж.д. В. Н. Егоров. – Санкт-Петербург : Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 2005. – С. 75. – EDN WKBKIN.

V. Dobrynin [et al.]; M-in transp. Russian Federation, Federal Agency for railway transp., GOU VPO SamGAPS. – Samara : SamGAPS, 2006. – 156 p. – ISBN 5-98941-040-9.

5 Modeling of train traction power consumption processes for sections of adjacent railways: monograph / E. V. Dobrynin, A. N. Mitrofanov, O. V. Tabakov; FGBOU VO SamGUPS. – Samara : SamGUPS, 2011. – 88 p. – ISBN 978-5-98941-150-4.

6 The methodology for identifying the boundary operational indicators of the passage of heavy trains according to the conditions of power supply / A. N. Mitrofanov, K. K. Utarbaev, S. A. Mitrofanov / Bulletin of Transport of the Volga Region. – No. 2(80). – Samara, 2020. – P. 27–35. – EDN WDYDUR.

7 Forecasting indicators of the energy supply of the transportation process on the basis of multifactorial models / A. N. Mitrofanov, G. M. Tretyakov, S. V. Kopeykin // Electrical engineering. – No. 3. – Moscow : SamGUPS, 2017. – P. 12–17. – EDN XWVTVN.

8 Automation of diagnosing systems of relay protection and automation of electrical installations : monograph / Yu. I. Zharkov, V. G. Lysenko, E. A. Storozhenko. – Moscow : Route, 2005. – 175 p. – ISBN 5-89035-253-9.

9 Digital technologies in automated railway power supply systems / N. A. Popova, Yu. I. Zharkov, O. V. Kubkina [et al.] // Transport : science, education, production (Transport – 2019) : collection of scientific papers, Rostov-on-Don, April 23–26, 2019. V. 4. – Rostov-on-Don : RSTU, 2019. – P. 110–114. – EDN TOAIAL.

10 **Zharkov, Yu. I.** System of monitoring, forecasting, early detection and prevention of dangerous external influences and defects in power supply systems (problems and concept) / Yu. I. Zharkov, E. P. Figurnov // Electrification and development of energy-saving infrastructure and electric rolling stock on railway transport: Abstracts of the Third International Symposium Eltrans'2005, St. Petersburg, November 15–17, 2005 / Editorial Board : Dr.Sc. V. V. Sapozhnikov, Doctor of Technical Sciences A. T. Burkov, Doctor of Technical Sciences A. V. Plaks, Head of the Technical Policy Service of the Oktyabrskaya Railway V. H. Egorov. – Saint Petersburg : Emperor Alexander I Petersburg State University of Communications, 2005. – P. 75. – EDN WKBKIN.

11 Комплексное решение прикладных технологических задач автоматизации тягового электро-снабжения / Ю. И. Жарков, О. В. Кубкина, В. Г. Лысенко, Н. А. Попова // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 1(81). – С. 130–139. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_130.

12 Предиктивный анализ работы технических средств электрифицированных железных дорог в целях повышения их надежности / П. А. Бодров, Ю. И. Жарков, А. Л. Ганашек // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 3(56). – С. 4–6. – EDN PEXXUJ.

13 Дисперсионная идентификация / Н. С. Райбман, В. В. Капитоненко, Ф. А. Овсепян, П. М. Варлаки; под редакцией Н. С. Райбмана. – Москва : Наука. Гл. ред. физико-математической литературы, 1981. – 336 с.

14 Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния / П. Эйкхофф, В. А. Лотоцкий, А. С. Мандель; под редакцией Н. С. Райбмана. – Москва : Мир, 1975. – 686 с.

11 Complex solution of applied technological problems of automation of traction power supply / Yu. I. Zharkov, O. V. Kubkina, V. G. Lysenko, N. A. Popova // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 1(81). – P. 130–139. – DOI 10.46973/0201-727X_2021_1_130.

12 Predictive analysis of the work of technical means of electrified railways in order to improve their reliability / P. A. Bodrov, P. A. Bodrov, Yu. I. Zharkov, A. L. Ganashek // Trudy Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2021. – No. 3(56). – P. 4–6. – EDN PEXXUJ.

13 Dispersion identification / N. S. Raibman, V. V. Kapitonenko, F. A. Ovsepyan, P. M. Varlaki; edited by N. S. Raibman. – Moscow : Science. Ch. ed. Physics and Mathematics Literature, 1981. – 336 p.

14 Fundamentals of Identification of Control Systems. Estimation of parameters and state / P. Eickhoff, V. A. Lototsky, A. S. Mandel; edited by N. S. Raibman. – Moscow : Mir, 1975. – 686 p.

A. N. Mitrofanov, Yu. I. Zharkov, S. A. Okladov

APPROACH TO BUILDING DIGITAL TWIN MODELS OF BUSINESS PROCESSES OF ENERGY SUPPLY FOR TRAIN TRACTION

Abstract. The paper presents an approach to building digital twins of business processes for energy supply of train traction at railway ranges. The approach is based on a matrix structure for representing the business processes of freight transportation and their provision by the central directorates of Russian Railways. It is proposed to use functionals as a form of constructing digital twins (models), and as parameters of the digital model are indicators that have the highest level of correlation with the actual indicator of energy supply for train traction. The following indicators of business processes were considered as electricity consumption for traction of trains; specific energy consumption for traction of trains; power imbalance; work in electric traction; local speed; average weight of a freight train and others.

Keywords: business-processes, energy supply for train traction, electricity consumption, digital twins, correlation analysis, identification methods.

For citation: Mitrofanov, A. N. Approach to building digital twin models of business processes of energy supply for train traction / A. N. Mitrofanov, Yu. I. Zharkov, S. A. Okladov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 3. – P. 92–102. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_3_92.

Сведения об авторах

Митрофанов Александр Николаевич

Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», доктор технических наук, профессор, e-mail: almit77@mail.ru

Information about the authors

Mitrofanov Alexander Nikolaevich

Samara State Transport University (SSTU), Chair «Power Supply of Railway Transport», Doctor of Engineering Sciences, Professor, e-mail: almit77@mail.ru

Жарков Юрий Иванович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Автоматизированные системы
электрообеспечения»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: zharkov43@gmail.com

Окладов Сергей Анатольевич

Самарский государственный университет путей
сообщения (СамГУПС),
кафедра «Электрообеспечение железнодорожного
транспорта»,
старший преподаватель,
e-mail: okladov@samgups.ru

Zharkov Yury Ivanovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Automated Power Supply Systems»,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
e-mail: zharkov43@gmail.com

Okladov Sergey Anatolievich

Samara state transport university (SSTU),
Chair «Power Supply of Railway Transport»,
Senior Lecturer,
e-mail: okladov@samgups.ru