

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА
ПО ВИДАМ ТРАНСПОРТА МЕТОДОМ ВЗВЕШЕННЫХ
ГРУППОВЫХ ОЦЕНОК**

**СОЦИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СРЕДНЕСРОЧНОЙ ДИНАМИКИ
ОРГАНИЗОВАННОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА
НА ГОРОДСКИХ АВТОБУСНЫХ МАРШРУТАХ ТЮМЕНИ**



**ЛОГИЧЕСКАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ
ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
ПЕРЕРАБОТКИ ВАГОНПОТОКОВ
НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ**

**ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ
СИСТЕМЫ RFID-КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯТОРОВ**



МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1. Галкин Александр Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, главный редактор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
2. Буйносов Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, УрГУПС, Екатеринбург, Россия
3. Козлов Петр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, научно-производственный холдинг «СТРАТЕГ», Москва, Россия
4. Симармата Джулиатер, доктор менеджмента, Институт транспорта и логистики Трисакти, Джакарта, Индонезия
5. Цяо Цун, канд. техн. наук, Чжэнчжоуский железнодорожный профессиональный технический институт, Чжэнчжоу, Китай

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1. Александров Александр Эрнстович, д-р техн. наук, доцент, научный редактор, Екатеринбург
2. Бородин Андрей Федорович, д-р техн. наук, профессор, Москва
3. Галиев Ильхам Исламович, д-р техн. наук, профессор, Омск
4. Гриценко Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент, Челябинск
5. Куренков Петр Владимирович, д-р экон. наук, профессор, Москва
6. Лапшин Василий Федорович, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
7. Ларин Олег Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Москва
8. Ледяев Александр Петрович, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербург
9. Локтев Алексей Алексеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва
10. Неволин Дмитрий Германович, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
11. Румянцев Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, с. н. с., Екатеринбург
12. Сай Василий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, зам. главного редактора, Екатеринбург
13. Сирина Нина Фридриховна, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
14. Смольянинов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, Екатеринбург
15. Тушин Николай Андреевич, д-р техн. наук, доцент, Екатеринбург
16. Хоменко Андрей Павлович, д-р техн. наук, профессор, Иркутск
17. Якунин Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, Оренбург

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

1. Galkin Alexander Gennadyevich, DSc, professor, editor-in-chief, USURT, Ekaterinburg, Russia
2. Buynosov Alexander Petrovich, DSc, professor, USURT, Ekaterinburg, Russia
3. Kozlov Petr Alexeevich, DSc, professor, Research & Production Holding STRATEG, Moscow, Russia
4. Simarmata Juliater, DSc, Trisakti Institute of Transportation and Logistics, Jakarta, Indonesia
5. Qiao Cong, PhD, Zhengzhou Railway Vocational and Technical Institute, Zhengzhou, China

EDITORIAL BOARD

1. Alexandrov Alexander Ernstovich, DSc, associate professor, science editor, Ekaterinburg
2. Borodin Andrey Fedorovich, DSc, professor, Moscow
3. Galiev Ilkham Islamovich, DSc, professor, Omsk
4. Gritsenko Alexander Vladimirovich, DSc, associate professor, Chelyabinsk
5. Kurenkov Petr Vladimirovich, DSc, professor, Moscow
6. Lapshin Vasily Fedorovich, DSc, professor, Ekaterinburg
7. Larin Oleg Nikolaevich, DSc, professor, Moscow
8. Ledyev Alexander Petrovich, DSc, professor, St. Petersburg
9. Loktev Alexey Alexeevich, DSc, professor, Moscow
10. Nevolin Dmitriy Germanovich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
11. Rumyantsev Sergey Alexeevich, DSc, senior staff scientist, Ekaterinburg
12. Say Vasily Mikhaylovich, DSc, professor, deputy editor-in-chief, Ekaterinburg
13. Sirina Nina Fridrikhovna, DSc, professor, Ekaterinburg
14. Smolyaninov Alexander Vasilyevich, DSc, professor, Ekaterinburg
15. Tushin Nikolay Andreevich, DSc, associate professor, Ekaterinburg
16. Khomenko Andrey Pavlovich, DSc, professor, Irkutsk
17. Yakunin Nikolay Nikolaevich, DSc, professor, Orenburg

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

Г. А. Тимофеева, А. Д. Хазимуллин.
Моделирование расщепления пассажиропотока по видам транспорта методом взвешенных групповых оценок 3

А. И. Петров. **Социологические аспекты среднесрочной динамики организованности перевозочного процесса на городских автобусных маршрутах Тюмени** 9

А. Э. Александров, И. А. Ковалев, В. Ю. Пермикин, А. В. Сурин, В. В. Лесных.
Логическая верификация оптимизационной модели переработки вагонопотоков на сортировочной станции 17

Н. Ф. Сирина, В. А. Сисин, О. А. Сисина. **Разработка алгоритмической модели процесса реагирования подсистем обеспечения безопасности функционирования железнодорожного транспорта** 23

Д. В. Ефанов, А. В. Пашуков. **Синтез устройств управления напольным технологическим оборудованием железнодорожной автоматики с обнаружением неисправностей на программируемых логических интегральных схемах** 31

Р. З. Галинуров, А. Н. Попов. **Исследование параметров работы переэздной сигнализации на основе стохастического моделирования** 42

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА

А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров, А. А. Пугачев, В. О. Корчагин, Е. В. Николаев. **Классификация магнитных усилителей сцепления и поиск новых решений тягового привода** 50

ГРУЗОВЫЕ И ПАССАЖИРСКИЕ ПЕРЕВОЗКИ

Н. А. Тушин, К. М. Тимухин, Т. А. Смородинцева.
Динамические резервы ускорения оборота вагона на малодеятельных участках 59

А. А. Кошечев, Е. Н. Тимухина, Н. В. Кащеева, Н. Е. Окулов, Н. В. Якушев. **Формирование множества альтернативных решений по выбору параметров структуры и технологии работы железнодорожных станций** 65

А. А. Кошечев, Е. Н. Тимухина, Н. В. Кащеева, Н. Е. Окулов, Н. В. Якушев. **Методика уточнения множества Парето на основе учета стохастичности критериальных функций** 71

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

А. В. Гриценко, К. В. Глемба, Г. Н. Салимоненко, А. Н. Медведев.
Контроль системы выпуска двигателя внутреннего сгорания по параметрам его выбега 77

А. В. Гриценко, К. В. Глемба, Г. Н. Салимоненко. **Диагностирование двигателя методом селективного газоанализа отработавших газов** 84

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

А. П. Буйносов, М. Г. Дурандин, О. И. Тутынин.
Увеличение жизненного цикла аккумуляторных батарей, используемых на технических средствах железнодорожного транспорта, путем защиты от глубокого разряда 92

Е. А. Третьяков, Е. Г. Авдиенко. **Определение параметров поезда в пути следования по данным бортовых измерительных систем грузовых электровозов** 97

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Т. А. Несенюк, В. Н. Соколов, П. С. Гончар.
Опытно-промышленные испытания системы RFID-контроля изоляторов 103

Ю. П. Неугодников, И. П. Неугодников. **Анализ методов и устройств диагностики и защиты полупроводниковых преобразователей тяговых подстанций железных дорог** 111

GENERAL TRANSPORT PROBLEMS

G. A. Timofeeva, A. D. Khazimullin.
Modeling of passenger traffic splitting by modes of transport by method of weighted group assessments 3

A. I. Petrov. **Sociological aspects of middle-term dynamics of transportation process organization on bus city routes in Tyumen** 9

A. E. Alexandrov, I. A. Kovalev, V. Yu. Permikin, A. V. Surin, V. V. Lesnykh.
Logic verification of optimization model of car traffic processing at marshalling station 17

N. F. Sirina, V. A. Sisin, O. A. Sisisina. **Development of algorithmic model for reaction process of subsystems targeted on provision of railway transport safety** 23

D. V. Efanov, A. V. Pashukov.
Synthesis of control devices for wayside technological equipment of railway automation with fault detection on FPGA 31

R. Z. Galinurov, A. N. Popov. **Study of level crossing safety installation operation parameters on the basis of stochastic modeling** 42

ROLLING STOCK AND TRACTION

A. S. Kosmodamianskiy, V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov, A. A. Pugachev, V. O. Korchagin, E. V. Nikolaev. **Classification of magnetic adhesion boosters and search for new decisions for traction drive** 50

CARGO AND PASSENGER TRANSPORTATION

N. A. Tushin, K. M. Timukhin, T. A. Smorodintseva.
Dynamic reserves for acceleration of car turnover on low-active sections 59

A. A. Koshcheev, E. N. Timukhina, N. V. Kashheeva, N. E. Okulov, N. V. Yakushev. **Development of variety of alternative solutions for selection of structural and technological parameters of railway stations** 65

A. A. Koshcheev, E. N. Timukhina, N. V. Kashheeva, N. E. Okulov, N. V. Yakushev. **Method for clarification of Pareto set on the basis of consideration for stochasticity of criterial functions** 71

MOTOR TRANSPORT

A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, G. N. Salimonenko, A. N. Medvedev.
Monitoring of the internal combustion engine exhaust system according to the parameters of its inertial stop 77

A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, G. N. Salimonenko. **Engine diagnostics by selective gas analysis of exhaust gases** 84

ELECTRIC TRACTION

A. P. Buynosov, M. G. Durandin, O. I. Tutynin.
Increase of life cycle of storage batteries used on technical means of railway transport by protection from deep discharge 92

E. A. Tret'yakov, E. G. Avdienko. **Determination of train parameters on route according to data from on-board measurement systems on freight electric locomotives** 97

ELECTRIC SUPPLY

T. A. Nesenjuk, V. N. Sokolov, P. S. Gonchar.
Pilot tests of system for RFID-control of insulators 103

Yu. P. Neugodnikov, I. P. Neugodnikov.
Analysis of methods and equipment for diagnostics and protection of semi-conductor converters of railway traction substations 111

УДК 656.23:519.816

Галина Адольфовна Тимофеева, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Артем Дамирович Хазимуллин, аспирант кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА ПО ВИДАМ ТРАНСПОРТА МЕТОДОМ ВЗВЕШЕННЫХ ГРУППОВЫХ ОЦЕНОК

Galina Adolfovna Timofeeva, DSc in Physics and Mathematics, Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Artem Damirovich Khazimullin, postgraduate student, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Modeling of passenger traffic splitting by modes of transport by method of weighted group assessments

Аннотация

Рассматриваются методы моделирования расщепления пассажиропотоков при наличии на маршруте различных конкурирующих видов транспорта. Предложена методика, основанная на гипотезе, что пассажиры различных групп населения делают выбор, исходя из оценки важности параметров маршрута (типа транспорта), таких как время перемещения, стоимость, комфортность проезда. На первом этапе исследования с использованием данных о среднедушевых доходах населения пассажиры разбиваются на группы, и для каждой группы потребителей транспортных услуг вычисляются коэффициенты значимости критериев. Полученный алгоритм моделирования расщепления потоков позволяет анализировать привлекательность для населения вновь вводимых маршрутов и обоснованность повышения цены при повышении уровня комфортности поездки.

Ключевые слова: расщепление пассажиропотока, многокритериальная оптимизация, весовые коэффициенты, групповые предпочтения.

Abstract

The paper considers methods for modeling passenger traffic splitting at presence on a route of various competing modes of transport. The authors suggest a method based on a hypothesis that passengers of various population groups make decisions based on assessment of importance of route (mode of transport) parameters such as ride time, cost and comfort. On the first stage of the study with the use of data on average income of the population the authors split passengers on groups and for each group they determine coefficients of criteria significance. The algorithm of modeling passenger traffic splitting allows analysing attractiveness for population of newly introduced routes and validity of fares at increase of comfort.

Keywords: passenger traffic splitting, multi-criterion optimization, weight coefficients, group preferences.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-3-8

ВВЕДЕНИЕ

Теоретической базой для моделирования расщепления пассажиропотоков является, как правило, рассмотрение задачи выбора пассажиром вида транспорта или маршрута. Факторы, влияющие на выбор того или иного вида транспорта либо способа передвижения, можно разделить на основные и второстепенные. Основные — это время и стоимость поездки. К числу менее значимых факторов следует отнести комфорт при поездке.

Логично предположить, что у разных категорий пассажиров будут различные приоритеты при выборе ключевого фактора. Значимость сокращения времени поездки определяется для пассажира в зависимости от уровня его дохода, целей поездки и возможности использовать время в пути для удовлетворения определенных потребностей [1, 2]. Таким образом, предприниматели и высокооплачиваемые работники выделяют в качестве ключевого фактора время и выбирают вариант с минимальными временными затратами. Для среднестатистического клиента время и цена проезда имеют примерно равное значение, поэтому при наличии альтернатив их выбор будет неоднозначным. Однако если стоимость и время проезда этих альтернатив близки, то для пассажиров более важным фактором станет комфортность поездки.

ОБЗОР МЕТОДОВ РАСЩЕПЛЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА

Рассмотрим методы моделирования расщепления пассажиропотоков. В статьях [3, 4] предложена модель оптимизации обобщенной стоимости поездки, зависящей от случайного параметра. Предполагается, что пассажир при выборе вида транспорта из конечного множества альтернатив учитывает значения двух ключевых критериев — времени перемещения и стоимости проезда, а также параметра, отражающего его личные предпочтения. Следовательно, выбор осуществляется на основе функции обобщенной стоимости поездки:

$$\varphi(k, \theta) = C_k + \theta \cdot T_k$$

где C_k — цена проезда с использованием k -го вида транспорта;
 T_k — время, которое требуется для перемещения этим маршрутом;

$\theta > 0$ — индивидуальная ценность единицы времени, которая зависит от пассажира.

Таким образом, получается задача минимизации одного критерия, зависящего от случайного параметра θ :

$$\min_{k \in \{1, \dots, N\}} \varphi(k, \theta) = \min_{k \in \{1, \dots, N\}} (C_k + \theta \cdot T_k), \quad (1)$$

где минимум находится на конечном множестве альтернативных маршрутов $\{1, \dots, N\}$ (видов транспорта).

Если ценность единицы времени θ у всех пассажиров была бы одинаковой, то они бы выбрали одно и то же решение $k^*(\theta)$, т.е. один вид транспорта. Однако такого не происходит, поэтому рассматриваются модели, в которых ценность временных затрат для разных пассажиров различна. Будем предполагать, что доход отдельного пассажира определяет ценность единицы времени, а это, в свою очередь, определяет тип транспорта в соответствии с решением задачи. При таком подходе случайная величина θ имеет вид

$$\theta = aB, \quad (2)$$

где B — случайная величина, описывающая доход случайно выбранного пассажира, а для определения вероятности выбора того или иного вида транспорта следует оценить только один параметр — коэффициент пропорциональности a , который находится на основании данных о реальных пассажиропотоках.

ЛОГИТ-МОДЕЛЬ ДИСКРЕТНОГО ВЫБОРА

В ситуациях, когда пассажир выбирает из набора различных альтернатив, можно использовать модели дискретного выбора. Одной из них является логит-модель [5], применяемая для описания выбора пассажиром вида городского транспорта на основе значения обобщенной стоимости поездки φ_k . Логит-модель предполагает, что схема принятия решения «использовать k -й вид транспорта» описывается логистической зависимостью. То есть решение принимается, если значение логит-функции $F(\varphi_k)$ больше некоторого критического уровня F^* , где

$$F(\varphi_k) = e^{-\lambda \varphi_k}.$$

Здесь коэффициент λ описывает чувствительность к различиям (часто берется равным 1), обобщенная стоимость поездки:

$$\varphi_k = \mu C_k + \tau T_k, \quad (3)$$

где C_k и T_k — стоимость и время проезда на виде транспорта k ;
 μ — коэффициент чувствительности пассажира к стоимости поездки;
 τ — коэффициент чувствительности пассажира к затраченному на проезд времени.

Тогда вероятность выбора k -го вида транспорта для отдельного взятого пассажира может быть описана формулой

$$P_k = \frac{e^{-\lambda \varphi_k}}{e^{-\lambda \varphi_1} + e^{-\lambda \varphi_2} + \dots + e^{-\lambda \varphi_N}}. \quad (4)$$

В данной модели, в отличие от модели (1)–(2), коэффициенты чувствительности рассматриваются как детерминированные (неслучайные) величины, они характеризуют чувствительность к изменению показателей среднестатистического пассажира. Анализ формулы показывает, что коэффициент μ является излишним, а обобщенная стоимость поездки может быть записана в форме, аналогичной (1). Таким образом, формула для вычисления вероятности выбора пассажиром k -го вида транспорта для фиксированного маршрута будет иметь вид

$$P_k = \frac{e^{-\lambda(C_k + \tau T_k)}}{e^{-\lambda(C_1 + \tau T_1)} + e^{-\lambda(C_2 + \tau T_2)} + \dots + e^{-\lambda(C_N + \tau T_N)}}. \quad (5)$$

Для применения формулы (5) следует разработать методу вычисления коэффициента чувствительности λ и параметра τ , который играет роль ценности единицы времени для пассажиров.

Параметр τ может быть выбран пропорциональным среднему доходу для каждой группы населения. Так как коэффициент τ отражает значимость для пассажира затраченного в пути времени, можно предположить, что для каждой категории клиентов транспорта в зависимости от ценности времени коэффициент будет различен.

МЕТОД ВЗВЕШЕННОЙ СУММЫ КРИТЕРИЕВ С РАЗБИВКОЙ НА ГРУППЫ

При описании поведения и предпочтений клиентов транспорта будем использовать метод взвешенных оценок для многокритериальных задач, который применяется рядом авторов при анализе выбора маршрутов [6]. Особенностью метода экспертных оценок является субъективность оценок критериев, которые в конечном счете определяют веса критериев. Сложности возникают из-за неоднородности потребительского спроса: в зависимости от платежеспособности, целей и удельной стоимости времени поездки пассажиры имеют разные предпочтения и поэтому выбирают разные решения.

В отличие от стандартного подхода разобьем потребителей транспортных услуг на группы по типу предпочтений.

Каждый маршрут (вид транспорта) будем оценивать по трем критериям: стоимости, времени и комфортности поездки. Тогда обобщенный критерий для пассажиров j -й группы для k -го вида транспорта будет иметь вид

$$F_j(k) = \alpha_{1j} C_k + \alpha_{2j} T_k - \alpha_{3j} K_k, \quad (6)$$

где C_k — стоимость поездки k -м видом транспорта ($k = 1, \dots, N$);
 T_k — время перемещения на k -м виде транспорта;
 K_k — оценка комфорта поездки;

α_{mj} — коэффициенты учета значений критериев поездок ($m = 1, \dots, 3$), т.е. цены, времени, комфорта, для j -й группы пассажиров.

Отметим, что традиционно оценка комфортности проезда K_k рассчитывается таким образом, что наибольшее значение соответствует более комфортному маршруту. Поскольку остальные два критерия (стоимость поездки и время) минимизируются, то коэффициент при значении критерия комфорта следует выбирать отрицательным. Итоговый обобщенный критерий $F_j(k)$ минимизируется по видам транспорта k . Номер альтернативы $k^* = k^*(j)$, на которой достигается минимум $F_j^* = \min_k F_j(k)$, зависит от коэффициентов (весов) α_{mj} различных для разных групп населения, таким образом, мы получаем номер оптимального маршрута для каждой группы потребителей транспортной услуги.

Алгоритм расчета расщепления пассажиропотока

1. Разбиение пассажиров на группы (например, по доходам), определение доли каждой группы в составе потребителей услуги.

2. Анализ критериев.

2.1. Нормализация критериев для каждой пары пунктов отправления-назначения, т.е. приведение значений критериев к единой шкале со значениями от 0 до 1, причем 1 соответствует наихудшему значению критерия. Нормализация проводится одинаково для всех групп потребителей.

2.2. Составление таблицы важности критериев на основе анализа предпочтений, нахождение коэффициентов важности критериев для каждой группы потребителей отдельно.

3. Анализ конкретного маршрута.

3.1. Вычисление обобщенных значений критерия для каждого вида транспорта, нахождение оптимального решения (вида транспорта) для каждой группы потребителей.

3.2. Получение итогового распределения пассажиров.

4. Анализ чувствительности решения к небольшим изменениям показателей маршрута.

Нормализация критериев

Нахождение коэффициентов в формуле (6) проведем в два этапа: нормализация критериев для каждого из двух пунктов отправления-назначения отдельно и вычисление коэффициентов значимости методом анализа иерархий [7].

Для нормализации критериев будем использовать распространенный метод нормализации в многокритериальных задачах на минимум [8]. Нормализованное значение \tilde{K}_{mk} 1-го и 2-го критериев для k -й альтернативы (маршрута, вида транспорта) вычисляется по формуле

$$\tilde{K}_{mk} = \frac{K_{mk} - \min_k K_{mk}}{\max_k K_{mk} - \min_k K_{mk}}, \quad m = 1, 2. \quad (7)$$

Поскольку исходно показатель комфорта (третий критерий) имеет положительную направленность, т.е. его наилучшим значением является наибольшее, проведем сразу несколько действий над критерием:

задачу на максимум заменим задачей на минимум путем умножения на -1 ;

ко всем значениям прибавим наибольшее значение критерия по всем возможным видам транспорта, чтобы избежать отрицательных чисел;

полученные значения нормализуем с учетом того, что минимальное значение преобразованного критерия равно 0, а максимальное равно $\max_k K_{3k} - \min_k K_{3k}$.

Получим следующую формулу нормализации для критерия «качество обслуживания»:

$$\tilde{K}_{3k} = \frac{\max_k K_{3k} - K_{3k}}{\max_k K_{3k} - \min_k K_{3k}}. \quad (8)$$

Таким образом, значения всех трех критериев приведены к единой шкале со значениями в интервале $[0; 1]$, а наилучшими по каждому критерию являются альтернативы с минимальными значениями всех трех критериев.

Нахождение коэффициентов значимости критериев

Предполагается, что пассажиры j -й группы выбирают тот вид транспорта, который имеет минимум обобщенной стоимости:

$$F_j(k) = \lambda_{1j}\tilde{C}_k + \lambda_{2j}\tilde{T}_k + \lambda_{3j}\tilde{K}_k \rightarrow \min_{k \in \{1, \dots, N\}}, \quad (9)$$

где коэффициенты важности критериев удовлетворяют условиям

$$\lambda_{mj} \geq 0, \quad m = 1, \dots, 3, \quad \lambda_{1j} + \lambda_{2j} + \lambda_{3j} = 1,$$

а значения критериев нормализованы, т.е. приведены к единой шкале по формулам, и минимизируются.

Коэффициенты значимости критериев λ_{mj} найдем на основе метода анализа иерархий [7]. Такой подход позволит сформировать методику прогнозирования выбора вида транспорта с учетом расщепления спроса, при помощи которой можно спрогнозировать пассажиропоток на новом маршруте. Для каждой j -й группы потребителей отдельно составим таблицу сравнения критериев оценки альтернатив (маршрутов или видов транспорта) и получим свои значения коэффициентов важности критериев.

Составим $M \times M$ -матрицу сравнений по девятибалльной шкале для каждой группы населения, где M — количество критериев оценки маршрута. В нашем случае $M = 3$, так как рассматриваются три критерия (цена, время перемещения, комфортность проезда).

Элементом матрицы a_{im} является отношение критерия i относительно критерия m , оцениваемое по шкале интенсивности от 1 до 9, где оценки имеют следующий вид:

- равная значимость критериев i и m — 1;
- умеренное превосходство i -го критерия — 3;
- значительное превосходство i -го критерия — 5;
- сильное превосходство i -го критерия — 7;
- очень сильное превосходство i -го критерия — 9.

В промежуточных случаях ставятся четные оценки: 2, 4, 6, 8 (например, 4 — между умеренным и значительным превосходством).

Элемент матрицы a_{mi} симметричный к a_{im} согласно подходу [7] выбираем равным

$$a_{mi} = 1/a_{im}.$$

Далее находим среднее геометрическое для элементов каждой строки

$$A_m = \sqrt[M]{a_{m1} \cdot a_{m2} \cdot \dots \cdot a_{mM}}, \quad (10)$$

вычисляем их сумму A и находим коэффициенты важности критериев по формулам:

$$\lambda_m = \frac{A_m}{A}, \text{ где } A = \sum_{m=1}^M A_m. \quad (11)$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА РАСЩЕПЛЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА

Рассмотрим группы пассажиров по уровню дохода на основании данных, представленных Росстатом о распределении доходов населения Российской Федерации за 2019 г. [9].

На основании полученных данных выделим три группы пассажиров согласно их платежеспособности. Первая категория — низкий уровень дохода с заработком до 19 тыс. руб., вторая категория — средний уровень дохода с заработком от 19 до 60 тыс. руб., третья категория — высокий уровень дохода с заработком более 60 тыс. руб. (табл. 1).

Таблица 1

Доля населения по уровню дохода

Номер группы j	Уровень дохода	Граница дохода, руб.	Доля, %
1	Низкий	Менее 19 000	31,8
2	Средний	От 19 000 до 60 000	54
3	Высокий	Более 60 000	14,2

Далее для каждой группы с помощью метода экспертных оценок определим оптимальный вид транспорта. В качестве примера возьмем категорию населения с низким доходом. Отличительной чертой для данной категории будет наибольший приоритет по отношению к стоимости проезда, поэтому матрица попарных сравнений примет вид, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Матрица попарных сравнений критериев

	Цена	Время	Комфорт
Цена	1	5	9
Время	0,2	1	2
Комфорт	0,11	0,5	1

По формулам (10)–(11) рассчитаем коэффициенты важности критериев. Результаты расчетов для первой группы пассажиров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты важности критериев для первой группы пассажиров

Номер критерия m	Критерий	Цена	Время	Комфорт	Среднее геометрическое	Вес критерия λ_{m1}
1	Цена	1,00	5,00	9,00	3,56	0,76
2	Время	0,20	1,00	2,00	0,74	0,16
3	Комфорт	0,11	0,50	1,00	0,38	0,09

На примере маршрута Екатеринбург — Пермь рассмотрим задачу выбора транспорта. В табл. 4 приведена информация о сообщении Екатеринбург — Пермь, включающая в себя стоимость, время и комфорт по каждому виду транспорта.

Таблица 4

Значения критериев для маршрута Екатеринбург — Пермь

Номер k	Вид транспорта	Цена C_k , руб.	Время T_k , ч	Комфорт K_k , балл
1	Автобус	900	6,25	4
2	Железнодорожный	1300	5,3	9
3	Личный автомобиль	1550	5	7

Из табл. 4 видно, что каждый критерий маршрута представлен в разной размерности. Чтобы исключить феномен замещения неблагоприятных показателей по одним критериям маленькими значениями других критериев, нормализуем критерии «цена» и «время» по формуле (7), а критерий «комфорт» по формуле (8).

Затем рассчитаем взвешенную оценку, используя полученные ранее коэффициенты λ_{mj} , $m = 1, 2, 3$, и формулу (9). Нормализованные значения критериев и вычисленные значения обобщенного критерия для пассажиров с низким доходом приведены в табл. 5.

Таблица 5

Нормализованные значения критериев

Номер k	Вид транспорта	Цена \tilde{C}_k	Время \tilde{T}_k	Комфорт \tilde{K}_k	Обобщенный критерий для 1-й группы $F_1(k)$
1	Автобус	0	1	1	0,25
2	Железнодорожный	0,61	0,24	0,17	0,52
3	Личный автомобиль	1	0	0,5	0,805

На основании значения обобщенного критерия для категории пассажиров с низким доходом оптимальным выбором на маршруте Екатеринбург — Пермь будет автобусный транспорт, имеющий наименьшую стоимость сообщения. Такой результат обусловлен сильным смещением веса критерия в пользу цены проезда, поэтому более низкие показатели времени

и комфорта, чем у конкурирующих видов транспорта, на ситуацию не повлияли.

Аналогичные вычисления проведем для остальных групп населения. Отметим, что при большем уровне заработной платы значимость стоимости проезда снижается, в то время как значимость времени и комфорта увеличивается [1, 2]. С учетом этого определены коэффициенты важности для групп пассажиров со средним и высоким доходом (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты важности критериев для второй и третьей групп пассажиров

Номер критерия m	Критерий	Цена	Время	Комфорт	Среднее геометрическое	Вес критериев λ_{mj}
2-я группа ($j = 2$)						
1	Цена	1	0,4	0,5	0,58	0,17
2	Время	4	1	1	1,59	0,46
3	Комфорт	2	1	1	1,26	0,37
3-я группа ($j = 3$)						
1	Цена	1	0,2	0,25	0,37	0,10
2	Время	6	1	1,5	2,08	0,54
3	Комфорт	4	0,66	1	1,38	0,36

В табл. 7 приведены значения обобщенного критерия для всех трех групп населения при выборе различных видов транспорта.

Таблица 7

Обобщенные критерии по трем группам населения

Номер k	Вид транспорта	Значение обобщенного критерия $F_j(k)$		
		1-я группа ($j = 3$)	2-я группа ($j = 2$)	3-я группа ($j = 3$)
1	Автобус	0,25	0,83	0,9
2	Железнодорожный	0,52	0,28	0,25
3	Личный автомобиль	0,805	0,35	0,28
Оптимальный вариант		Автобус	Железнодорожный	Железнодорожный

Для групп населения со средним и высоким уровнем дохода происходит смещение приоритетов в сторону критериев времени и комфорта, причем уровень дохода прямо пропорционален важности критерия «время». Таким образом, оптимальным транспортом для указанных групп населения является железнодорожный. Для клиентов с высоким уровнем дохода решение задачи максимально приблизилось к решению с вариантом выбора такого вида транспорта, как личный автомобиль, однако экономия по времени не смогла покрыть разницу в уровне комфорта.

В целом предлагаемая методика расчета расщепления пассажиропотока на маршруте Екатеринбург — Пермь дает следующий результат: пассажиры 1-й группы населения (31,8 %) выбирают автобусное сообщение, пассажиры второй и третьей групп (68,2 %) выбирают железнодорожное сообщение. Отметим, что в расчетах не учитывалось поведение пассажиров, которые при выборе вида транспорта руководствуются не общими для группы критериями оптимальности, а собственными субъективными предпочтениями.

Стоит обратить внимание, что результат существенно зависит от параметров маршрута, продолжительности, цены и комфортности поездки. При других значениях этих параметров предпочтения групп пассажиров распределяются иначе.

ВЫВОДЫ

В статье исследуются методы моделирования расщепления пассажиропотока на основе многокритериального подхода и оптимизации обобщенной стоимости поездки в форме линейной свертки критериев. Предложена методика расчета расщепления, основанная на делении пассажиров на группы по уровню доходов и на вычислении значений обобщенного критерия для каждого вида транспорта и каждой группы пассажиров отдельно. Предложенная модель является упрощенной, поскольку предполагает, что все пассажиры, принадлежащие одной группе по уровню доходов, выбирают один тип транспорта. На самом деле это не так, поэтому в дальнейшем авторы будут рассматривать и другие параметры (цель поездки и т.п.), а также уточнять методику с учетом различного уровня доходов населения в разных регионах. Для выбора наиболее подходящей методики планируется провести верификацию и калибровку модели на основе реальных данных о пассажиропотоках.

Литература

1. Лавриненко П. А. Сравнение эффективности видов транспорта на основе прямых и косвенных издержек потребителя // Проблемы прогнозирования. 2017. № 4 (163). С. 115–120. ISSN 0868–6351.
2. Романов А. С. Современный этап развития высокоскоростного железнодорожного транспорта в мире // Экономика железных дорог. 2020. № 8. С. 70–78. ISSN 1727–6500.
3. Timofeeva G., Martynenko A., Zavalishchin D. Probabilistic modeling of passengers and carriers preferences via bicriterial approach // 17th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization (CAO 2018), IFAC-PapersOnLine. 2018. 51 (32). Pp. 496–498.
4. Timofeeva G. Investigation of mathematical model of passenger preferences // Proceedings of the 45th International Conference on Application of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'19) AIP Conf. Proc. 2172, 080001-1-080001-7. <https://doi.org/10.1063/1.5133559>.
5. De Dios Ortuzar J., Willumsen L. G. Modelling Transport / 4th edition. Wiley, 2011. 586 p.
6. Бродецкий Г. Л., Руденко Я. Ю. Выбор наилучшего маршрута в цепях поставок как задача многокритериальной оптимизации // Логистика и управление цепями поставок. 2009. № 6. С. 54–68. ISSN 2587–6775.
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва : Радио и связь, 1993. 278 с.
8. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. Москва : Радио и связь, 1992. 504 с.
9. Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru> (дата обращения: 24.10.2021).

Объем статьи 0,58 авторских листа

References

1. Lavrinenko P. A. Comparison of the efficiency of different means of transport by direct and indirect consumer costs [Sravnenie effektivnosti vidov transporta na osnove pryamykh i kosvennykh izderzhok potrebitelya] // Studies on Russian Economic Development. 2017. No. 4 (163). Pp. 115–120. ISSN 0868–6351.
2. Romanov A.S. The present high-speed rail development phase in the world [Sovremennyy etap razvitiya vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta v mire] // Railway Economy. 2020. No. 8. Pp. 70–78. ISSN 1727–6500.
3. Timofeeva G., Martynenko A., Zavalishchin D. Probabilistic modeling of passengers and carriers preferences via bicriterial approach // 17th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization (CAO 2018), IFAC-PapersOnLine. 2018. 51 (32). Pp. 496–498.
4. Timofeeva G. Investigation of mathematical model of passenger preferences // Proceedings of the 45th International Conference on Application of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'19) AIP Conf. Proc. 2172, 080001–1–080001–7. <https://doi.org/10.1063/1.5133559>.
5. De Dios Ortuzar J., Willumsen L. G. Modelling Transport / 4th edition. Wiley, 2011. 586 p.
6. Brodetskiy G. L., Rudenko Ya. A. Selection of the best route in supply chains as a multi-criterion optimization task [Vybor nailuchshego marshruta v tsepyakh postavok kak zadacha mnogokriterial'noy optimizatsii] // Logistics and supply chain management. 2009. No. 6. Pp. 54–68. ISSN 2587–6775.
7. Saaty T. Decision-making. The Analytic Hierarchy Process [Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy]. Moscow : Radio and communications, 1993. 278 p.
8. Steuer R. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, And Application [Mnogokriterial'naya optimizatsiya. Teoriya, vychisleniya i prilozheniya]. Moscow : Radio and communications, 1992. 504 p.
9. Federal State Statistics Service [Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki]. URL: <https://rosstat.gov.ru> (access date: 24.10.2021).

УДК 656.132

Артур Игоревич Петров, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта» Тюменского индустриального университета (ТИУ), Тюмень, Россия

СОЦИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СРЕДНЕСРОЧНОЙ ДИНАМИКИ ОРГАНИЗОВАННОСТИ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА НА ГОРОДСКИХ АВТОБУСНЫХ МАРШРУТАХ ТЮМЕНИ

Artur Igorevich Petrov, PhD in Engineering, Associate Professor, Exploitation of Automobile Transport Department, Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russia

Sociological aspects of middle-term dynamics of transportation process organization on bus city routes in Tyumen

Аннотация

В статье представлены результаты исследований, посвященных влиянию структуры пассажиров, перевозимых городским общественным транспортом, на организованность транспортного процесса, оцениваемую относительной энтропией H_r . На примере анализа структуры перевозок двух типичных автобусных маршрутов Тюмени установлено, что при увеличении доли пассажиров-льготников общая организованность перевозочного процесса растет. Однако, как показали исследования, среднесрочные тренды организованности (2017–2021 гг.) неблагоприятны — уровень системного хаоса повышается.

Ключевые слова: городской пассажирский общественный транспорт (ГПОТ), организованность, энтропия, относительная энтропия, динамика, структура перевозочного процесса, группы пассажиров, социологические аспекты.

Abstract

The paper presents results of studies dedicated to influence of structure of passengers transported by city public transport on transportation process organization that is assessed by relative entropy H_r . On the example of analysis of transportation structure for two typical bus routes in Tyumen the author has established that at increase of share of privileged passengers general organization of transportation process grows. However, the studies show that middle-term organization trends (2017–2021) are unfavourable — the level of system chaos increases.

Keywords: city public transport, organization, entropy, relative entropy, dynamics, structure of transportation process, passenger groups, sociological aspects.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-9-16

ВВЕДЕНИЕ

Текущий год (2022-й) вряд ли будет обычным для организаторов транспортного обслуживания населения российских городов и непосредственно перевозчиков. Многие публичные экономисты, например Н. В. Зубаревич [1], прогнозируют общее усложнение социально-экономической ситуации в стране, дальнейшее снижение величины валового внутреннего продукта и сжатие бюджетов. И это в ситуации, когда последние два года (2020–2021 гг.) экономика России находилась под прессингом COVID-ограничений. В сложившихся условиях вряд ли приходится говорить о благоприятной атмосфере для развития систем городского транспорта. Это замечание касается не только общественного, но и индивидуального транспорта, не только дорогих и технических сложных инфраструктурных проектов, но и обычных маршрутных систем городского пассажирского общественного транспорта (ГПОТ).

Проблемы обеспечения устойчивости систем ГПОТ выходят сейчас на первый план. Для этого есть весь набор предпосылок: ожидаемая общая экономическая депрессия и необходимость кардинальной перестройки российской экономики, потенциально приводящие к структурным изменениям всего рынка обеспечения транспортной подвижности горожан. В то же время хотелось бы понимать общие тренды последних лет в данной сфере.

В статье рассматриваются вопросы изменения общей организованности перевозочного процесса как в целом по городской транспортной системе, так и на типичных маршрутах ГПОТ в течение среднесрочного периода (2017–2021 гг.). При этом основной акцент делается на социологических аспектах организованности, т.е. на специфике структуры перевозимых ГПОТ пассажиров и на ее связи с итоговой организованностью перевозочного процесса.

В рамках статьи под организованностью перевозочного процесса понимается фундаментальное свойство транспортно-технологической системы ГПОТ, идентифицирующее результат практической реализации управленческих решений, направленных на структуризацию системы перевозок на маршруте и ограничивающих свободу ее изменений.

Организованность, оцениваемая относительной энтропией H_r , позволяет идентифицировать качество управленческих решений по снижению вероятности проявления конфликтов всех видов в системе

«пассажир — перевозчик — организатор перевозок — внешняя среда». Уровень относительной энтропии H_n количественно характеризует организованность перевозочного процесса. В свою очередь, организованность перевозочного процесса идентифицирует вариативность спроса-предложения и позволяет оценивать (хотя бы в качественных категориях) устойчивость перевозочного процесса ГПОТ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В статье [2] рассматривалась методика оценки относительной энтропии H_n перевозочного процесса на маршрутах ГПОТ и сравнивались в плане организованности типичные диаметральный, радиальный, тангенциальный и кольцевой автобусные маршруты Тюмени.

Аналитические и экспериментальные исследования относительной энтропии H_n перевозочного процесса, проводимые автором для различных типов маршрутов ГПОТ, показали, что ключевой момент, определяющий различный уровень организованности перевозок пассажиров, — структура объемов перевозок, т.е. качественная характеристика именно состава перевозимых пассажиров. Проще говоря, вероятность совершения гарантированных каждодневных поездок выше для тех пассажиров, у которых есть льготы, по сравнению с пассажирами, оплачивающими проезд. Многолетние наблюдения за перевозочным процессом показали, что достаточно большое число пассажиров-льготников ежедневно совершают поездки в одно и то же время по одним и тем же маршрутам. Вероятность пользования услугами ГПОТ для таких пассажиров-льготников стремится к максимально возможным значениям ($P_{\text{ГПОТ}} \rightarrow 1$). Иначе обстоит дело с пассажирами, оплачивающими проезд. Для них вероятность совершения поездки варьируется в широком диапазоне значений ($P_{\text{ГПОТ}} = [0; 1]$), причем наиболее вероятный диапазон значений такой вероятности $P_{\text{ГПОТ}} < 0,5$. Для них не работает тезис «всегда один и тот же маршрут ГПОТ и достаточно унифицированное время поездки».

С учетом вышесказанного исследовательская гипотеза сформулирована следующим образом: на организованность перевозочного процесса ГПОТ оказывают влияние социологические аспекты, а именно социология структуры объемов перевозок. Эта гипотеза проверялась эмпирически: на основе количественной оценки относительной энтропии H_n перевозочного процесса как для всей системы маршрутов ГПОТ Тюмени, так и для маршрутов различного типа и идентификации причин различия полученных результатов.

Отметим, что в системе ГПОТ Тюмени (население 816,7 тыс. чел.) 110 автобусных маршрутов, общая протяженность маршрутной сети ГПОТ (на 2022 г.) составляет 609,4 км (рис. 1).

Плотность маршрутной сети ГПОТ с учетом административной (698 км²) и селитебной (256 км²) площади города составляет соответственно $\delta_{\text{мс1ГПОТ}} = 0,87$ км/км² и $\delta_{\text{мс2ГПОТ}} = 2,38$ км/км². Плановое количество эксплуатируемого подвижного состава ГПОТ $A_M = 1280$ ед. Изменение годовых объемов перевозок в целом по системе ГПОТ Тюмени в течение последних пяти лет (2017–2021 гг.) было весьма значительным и определялось в первую очередь COVID-ограничениями (табл. 1).

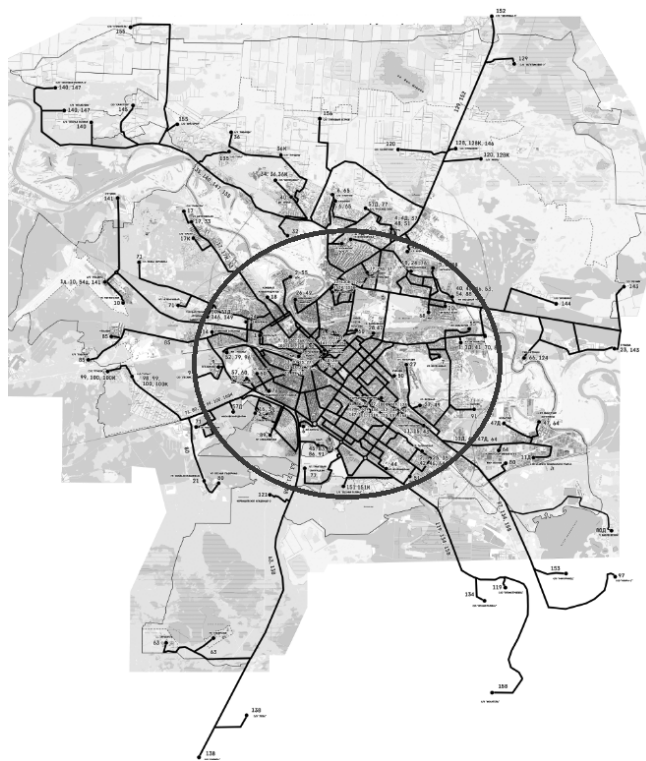


Рис. 1. Схема и характеристика маршрутной сети ГПОТ Тюмени: кругом очерчена селитебная площадь (256 км²), ограничивающая основные фокусы транспортного притяжения населения города

Таблица 1

Динамика общего годового объема перевозок пассажиров (2017–2021 гг.)

Показатель	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Годовой объем перевозок пассажиров силами ГПОТ Тюмени $Q_{\text{ГПОТ год}}$ тыс. пасс.	139931,6	146567,9	150301,7	100489,0	116840,1

На рис. 2 представлены схемы двух очень разных по назначению и роли в системе ГПОТ Тюмени автобусных маршрутов.

Диаметральный маршрут № 11 является одним из магистральных и обслуживает очень значительные объемы перевозок: в последние несколько лет годовой объем перевозок $Q_{\text{год}}$ достигает 2,5–3,8 млн пасс. и составляет около 2,5 % от общих объемов перевозок в городе (при том, что всего в городе, как уже отмечено, 110 маршрутов ГПОТ). Тангенциальный маршрут № 53 обслуживает пространственно периферийные районы Тюмени, и его вес в общегородских объемах перевозок почти никогда не превышает 0,25 % ($Q_{\text{год}} = 0,25\text{--}0,40$ млн пасс.). В табл. 2 приведены некоторые данные за 2019 г., характеризующие эти маршруты.

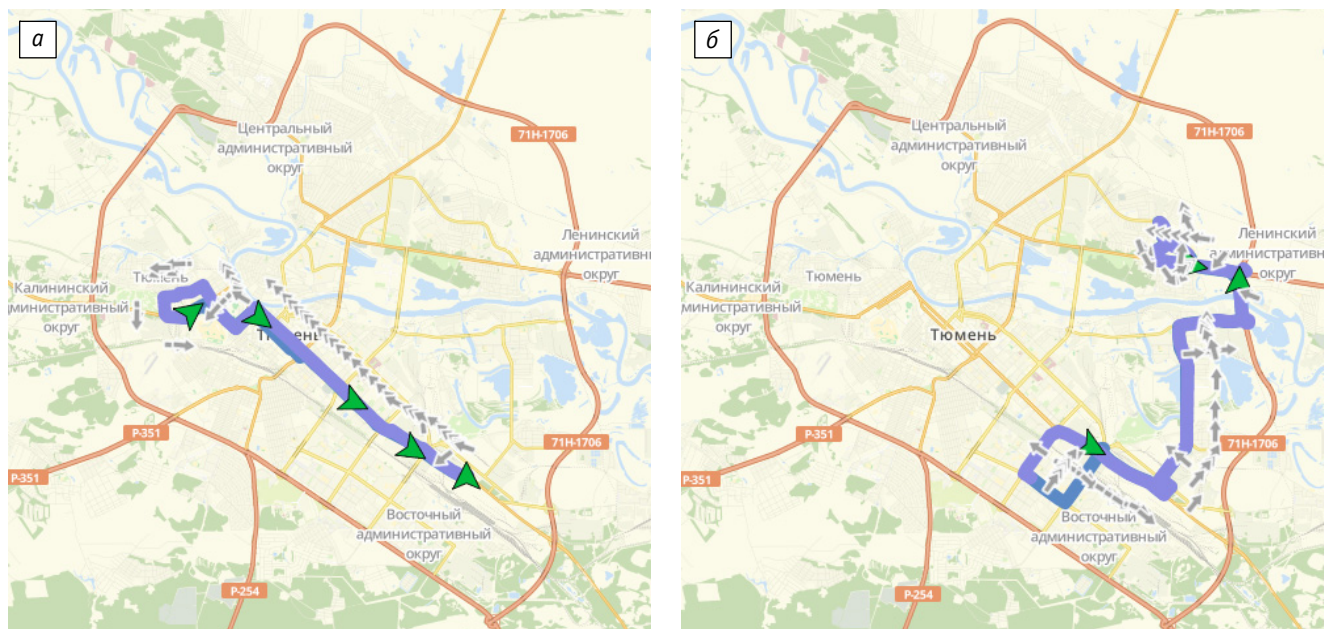


Рис. 2. Схемы сравниваемых по структурной организованности состава перевозимых пассажиров маршрутов ГПОТ Тюмени в пространстве городской территории:
а — маршрут № 11 (диаметральный); б — маршрут № 53 (тангенциальный)

Таблица 2

Основные характеристики перевозочного процесса маршрутов № 11 и № 53 ГПОТ Тюмени в 2019 г.

Показатель	Маршрут № 11 (диаметральный)	Маршрут № 53 (тангенциальный)
Длина маршрута L_M , км	29,95	43,31
Число автобусов A_M , ед.	12 больших, 4 особо больших	2 средних, 2 больших
Годовое число рейсов $Z_{\text{р}}$, ед.	82361	12143
Годовой объем перевозок на маршруте $Q_{\text{м,год}}$, пасс.	3676661	399036
Коэффициент сменности $\eta_{\text{см}}$	5,4	1,8

Цель исследования — оценить общие тренды изменения организованности, оцениваемой относительной энтропией H_n , всей системы ГПОТ Тюмени и отдельных специфических маршрутов; найти связь между структурными особенностями объемов перевозок пассажиров и итоговыми значениями H_n . Важно выполнить эту работу в отношении определенного временного отрезка (для среднесрочного периода 2017–2021 гг.) и сделать выводы о социологических аспектах среднесрочной динамики организованности перевозочного процесса на этих сравниваемых маршрутах.

ИДЕОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭНТРОПИИ H_n ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА В ОТНОШЕНИИ СИСТЕМЫ ГПОТ И ОТДЕЛЬНЫХ МАРШРУТОВ

Основные идеи и методика оценки относительной энтропии H_n перевозочного процесса ранее были рассмотрены в работе [2]. Главное, на чем основана эта методика, — формирование причинно-следственной цепочки [3], для блоков которой

определяются значения переходных коэффициентов K_i и оценивается их относительная значимость в формировании итоговых результатов перевозок. Набор блоков причинно-следственной цепочки может варьироваться в зависимости от целей исследования [4].

Как будет выглядеть эта цепочка применительно к оценке структурной устойчивости транспортного процесса всей системы ГПОТ, показано на рис. 3.

Для оценки структурной устойчивости транспортного процесса на отдельном маршруте необходимо использовать причинно-следственную цепочку, представленную на рис. 4.

Отметим, что число звеньев цепочки может варьироваться. В первом случае (для системы ГПОТ города, см. рис. 3) это число равно 3, т.е. рассматривается трехзвенная причинно-следственная цепочка формирования объемов перевозок. Для отдельного маршрута ГПОТ цепочка модифицируется до четырехзвенной (см. рис. 4). Разумеется, это важный факт, оказывающий влияние на результаты расчета относительной энтропии H_n перевозочного процесса в данных рассматриваемых случаях.

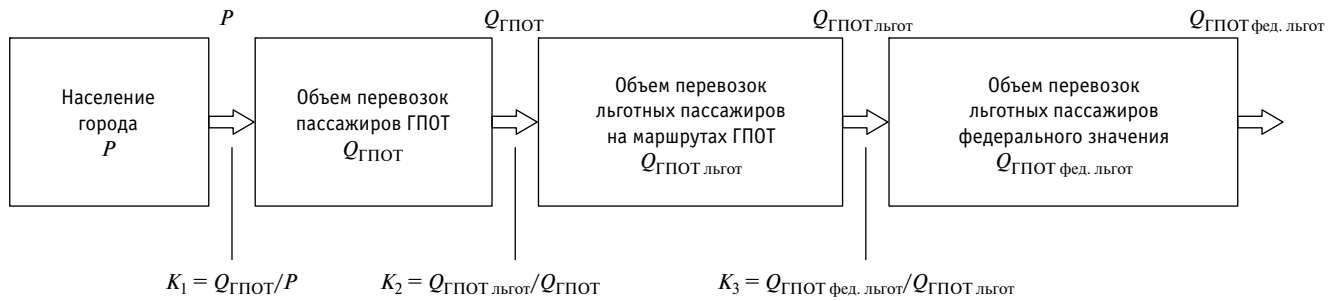


Рис. 3. Причинно-следственная цепочка формирования структуры перевозочного процесса для системы ГПОТ

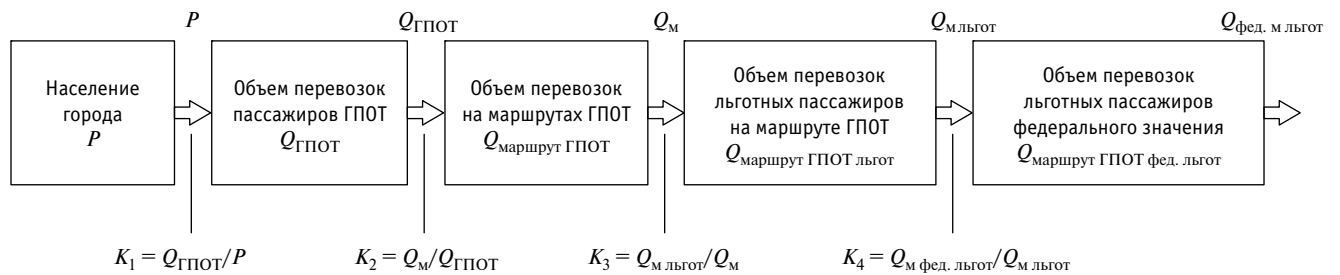


Рис. 4. Причинно-следственная цепочка формирования структуры перевозочного процесса для отдельного маршрута

Процесс формирования итоговой результативности перевозочного процесса ГПОТ можно представить как последовательное соединение трех (или четырех) этапов транспортно-технологического процесса с коэффициентами информационной передачи K_i . Под коэффициентом информационной передачи i -го звена традиционно понимается отношение его выхода A_{out} ко входу A_{in} :

$$K_i = A_{out}/A_{in}. \quad (1)$$

Вес или относительная значимость звеньев причинно-следственной цепочки в общем процессе формирования объемов перевозок зависят от величины передаточных коэффициентов K_i между звеньями цепочки и определяются следующим образом: для варианта «система ГПОТ»

$$w_1 = \frac{Q_1}{\sum_{i=1}^3 Q_i} = \frac{\ln(1/K_1)}{\ln(1/K_1) + \ln(K_2) + \ln(K_3)};$$

$$w_{2,3} = \frac{Q_{2,3}}{\sum_{i=1}^3 Q_i} = \frac{\ln(K_{2,3})}{\ln(1/K_1) + \ln(K_2) + \ln(K_3)}; \quad (2)$$

для варианта «отдельный маршрут»

$$w_1 = \frac{Q_1}{\sum_{i=1}^4 Q_i} = \frac{\ln(1/K_1)}{\ln(1/K_1) + \ln(K_2) + \ln(K_3) + \ln(K_4)};$$

$$w_{2,3,4} = \frac{Q_{2,3,4}}{\sum_{i=1}^4 Q_i} = \frac{\ln(K_{2,3,4})}{\ln(1/K_1) + \ln(K_2) + \ln(K_3) + \ln(K_4)}. \quad (3)$$

Смысловая нагрузка составляющих $Q_1 = \ln(1/K_1)$ или $Q_{2,3,4} = \ln(K_{2,3,4})$ — оценка позитива Q отдельных звеньев всей цепочки, т.е. оценка вклада определенного звена цепочки в формирование итоговой величины организованности изучаемого процесса.

Зная расчетные значения веса или значения относительной значимости звеньев причинно-следственной цепочки «население — <...> — объемы перевозок пассажиров, имеющих федеральные льготы», по известной методике К. Шеннона [5–7] можно определить и энтропию H , и относительную энтропию H_n :

$$H = -\sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln w_i; \quad (4)$$

$$H_n = H/H_{\max} = H/\ln(n), \quad (5)$$

где n — число передаточных звеньев процесса формирования итоговых объемов перевозок;

w_i — коэффициенты значимости или веса каждого звена процесса формирования итогов перевозок, отвечающие условию нормировки

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1.$$

Для варианта причинно-следственной цепочки формирования структуры перевозочного процесса ГПОТ (см. рис. 3) число звеньев цепочки $n = 3$; для варианта отдельного маршрута ГПОТ (см. рис. 4) число звеньев цепочки $n = 4$.

Также важно отметить, что организованность перевозочного процесса можно оценивать только для выбранной системы координат (трехзвенной H_n-3 или четырехзвенной H_n-4).

Таблица 3

Исходные данные для расчета относительной энтропии H_n -3 перевозочного процесса в системе ГПОТ Тюмени в 2017–2021 гг. (110 маршрутов)

Показатель	Год				
	2017	2018	2019	2020	2021
Население Тюмени, чел.	744554	768358	788666	807271	816700
Годовой объем перевозок ГПОТ $Q_{\text{ГПОТ}}$, пасс.	139931596	146567891	150301735	100489018	116840100
Годовой объем перевозок пассажиров-льготников на маршрутах ГПОТ $Q_{\text{М.льгот}}$, пасс.	62866879	64936713	66822970	40829276	51529608
Годовой объем перевозок пассажиров — федеральных льготников на маршрутах ГПОТ $Q_{\text{М.фед.льгот}}$, пасс.	29803271	29599461	29256534	17189818	20908584

Например, можно оценивать организованность перевозочного процесса ГПОТ для разных городов или одного города в течение нескольких лет, но нельзя сравнивать организованность ГПОТ города и организованность перевозочного процесса на отдельном маршруте ГПОТ.

Таблица 4

Передаточные коэффициенты исследуемой причинно-следственной цепочки перевозочного процесса ГПОТ Тюмени в 2017–2021 гг.

ДАнные И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ H_n ДЛя СИСТЕМЫ ГПОТ ТЮМЕНИ В ЦЕЛОМ

В табл. 3 приведены исходные данные для определения величин относительной энтропии H_n -3 системы ГПОТ Тюмени (2017–2021 гг.).

В табл. 4 приведены значения коэффициентов цифровой трансформации K_i (соотношения специфических характеристик) объемов перевозок.

Именно эти коэффициенты определяют в итоге структурные особенности изучаемого процесса.

Динамика изменения величины H_n -3 представлена на рис. 5.

Анализ рис. 5 позволяет понять, что относительная энтропия H_n перевозочного процесса ГПОТ Тюмени в течение последних лет постоянно росла (особенно резко в 2019–2020 гг.), т.е. уровень организованности перевозочного процесса снижался. Происходило это по причине изменения веса различных компонентов (элементов) системы. Резкий рост H_n в 2020 г. объясняется значительным снижением коэффициента K_2 (с уровня $K_{2\ 2017} = 0,4493$ до уровня $K_{2\ 2020} = 0,4063$) и постепенным уменьшением веса или значимости пассажиров со статусом федеральных льготников (K_3 снизился с $K_{3\ 2017} = 0,4741$ до $K_{3\ 2020} = 0,4210$). Сокращение удельной доли именно льготников в общем числе пассажиров влияло на снижение гарантированности поездки (увеличивалась дисперсия показателя Q_p) и, как следствие, уровня организованности перевозочного процесса. В 2021 г. ситуация несколько изменилась: K_3 снизился еще больше — до 0,4057, но при этом выросло значение K_2 — до 0,4410.

В целом главный вывод по данному разделу заключается в том, что организованность перевозочного процесса определяется вероятностью гарантированности поездки, т.е. устойчивостью спроса со стороны потребителей транспортных услуг, которая во многом связана с экономической перевозок. Люди, имеющие право на льготу, т.е. пользующиеся услугами ГПОТ бесплатно, востребуют транспортные услуги более стабильно,

Год	Коэффициенты K_i		
	K_1	K_2	K_3
2017	187,9402	0,4493	0,4741
2018	190,7547	0,4430	0,4558
2019	190,5772	0,4446	0,4378
2020	124,4799	0,4063	0,4210
2021	143,0636	0,4410	0,4057

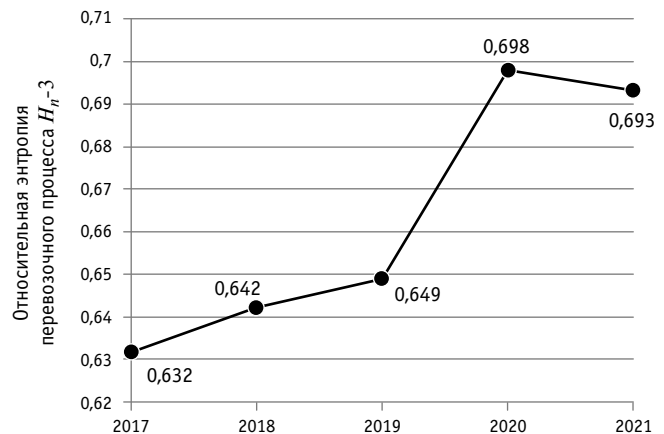


Рис. 5. Динамика изменения величины относительной энтропии H_n -3 перевозочного процесса ГПОТ Тюмени (110 маршрутов)

каждодневно, зачастую на одном и том же маршруте и в одно и то же время.

Вероятность отказа таких людей от поездки значительно ниже, чем для категории пассажиров, оплачивающих проезд. В связи с этим можно сделать вывод, что высокая организованность транспортного процесса ГПОТ характерна для систем с высокой долей поездок пассажиров, имеющих право на льготу, т.е. на бесплатный проезд. В ином случае организованность транспортного процесса снижается.

С позиций математической статистики полученный результат объясняется особенностями распределения статистической величины. Для случая нормального закона распределения величины энтропия H процесса возрастает и организованность снижается [4, 8].

ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ H_n ПО ОТДЕЛЬНЫМ МАРШРУТАМ ГПОТ ТЮМЕНИ

В табл. 5 приведены исходные данные для определения относительной энтропии H_n-4 двух сравниваемых маршрутов (на примере 2019 г.). Аналогичные данные собирались и анализировались также и для других экспериментальных лет (2017, 2018, 2020, 2021).

Таблица 5

Исходные данные для расчета относительной энтропии H_n-4 перевозочного процесса на маршрутах № 11 и № 53 ГПОТ Тюмени в 2019 г.

Показатель	Маршрут № 11	Маршрут № 53
Население Тюмени N , чел.	788667	788667
Годовой объем перевозок ГПОТ $Q_{\text{ГПОТ}}$, пасс.	150301735	150301735
Годовой объем перевозок на маршруте Q_M , пасс.	3676661	399036
Годовой объем перевозок пассажиров-льготников на маршруте $Q_{\text{М.льготн}}$, пасс.	1634883	111284
Годовой объем перевозок пассажиров — федеральных льготников на маршруте $Q_{\text{М.фед.льготн}}$, пасс.	733819	41716

В табл. 6 приведены значения коэффициентов цифровой трансформации K_i объемов перевозок.

Таблица 6

Передаточные коэффициенты исследуемой причинно-следственной цепочки перевозочного процесса ГПОТ Тюмени в 2019 г.

Маршрут	Коэффициенты K_i			
	K_1	K_2	K_3	K_4
№ 11	190,5769	0,0245	0,4447	0,4489
№ 53	190,5769	0,0027	0,2789	0,3749

Обратим внимание, что значения коэффициентов K_2 , K_3 , K_4 для сравниваемых маршрутов существенно различаются.

Численные значения относительной энтропии перевозочного процесса H_n-4 для сравниваемых диаметального (№ 11) и тангенциального (№ 53) маршрутов за 2019 г. приведены в табл. 7. Аналогичным образом значения H_n-4 рассчитаны и для 2017, 2018, 2020, 2021 гг.

Таблица 7

Относительная энтропия H_n-4 перевозочного процесса в 2019 г. на диаметральном (№ 11) и тангенциальном (№ 53) маршрутах ГПОТ Тюмени

Маршрут	Значение относительной энтропии H_n-4 перевозочного процесса
№ 11	0,799
№ 53	0,824

На рис. 6 представлена динамика изменения относительной энтропии H_n-4 перевозочного процесса на сравниваемых маршрутах в 2017–2021 гг.

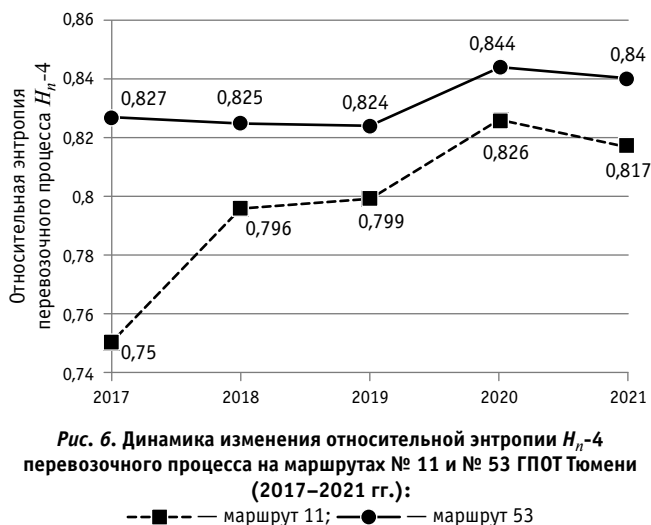


Рис. 6. Динамика изменения относительной энтропии H_n-4 перевозочного процесса на маршрутах № 11 и № 53 ГПОТ Тюмени (2017–2021 гг.):

--■-- маршрут 11; —●— маршрут 53

Уровень организованности перевозочного процесса выше для диаметального маршрута № 11, чем для тангенциального № 53, прежде всего по причине весьма ощутимой разницы в долях (весе) льготных групп пассажиров. На диаметральном маршруте № 11 (магистральном, одном из самых значимых в общей маршрутной системе) перевозится намного больше льготных пассажиров (44,5 % от общего числа), чем на тангенциальном маршруте № 53 (27,9 % от общего числа). То же самое касается и доли льготников федерального значения (44,9 % против 37,5 %). А это влияет на вариативность спроса на перевозки. В случае высокой доли льготников в общем объеме перевозок на маршруте уровень относительной энтропии H_n перевозочного процесса будет ниже.

Имеющая значение разница в уровнях организованности перевозочного процесса сравниваемых маршрутов ГПОТ определяется прежде всего именно структурными особенностями состава пассажиров. Обычно диаметральными маршрутами пользуются пассажиры самого разного статуса, доля льготников среди них, как правило, больше, чем на тангенциальных маршрутах, которые весьма своеобразны именно в плане структуры обслуживаемых пассажиров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы управления сложными социально-техническими системами в последнее время выходят на первый план, что главным образом обусловлено необходимостью повышения общей системной эффективности. Один из инструментов решения этой задачи в сфере ГПОТ — идентификация причин и итоговой величины характеристики организованности (относительной энтропии H_n) процесса транспортного обслуживания населения. Системная организованность есть следствие стохастичности процессов, протекающих в этой системе. В частности, стохастичность перевозочного процесса во многом определяется особенностями поведения пассажиров (гарантированностью спроса на поездку).

Исследования показали, что для различных типов автобусных маршрутов ГПОТ (в данном случае для магистрального диаметрального и периферийного тангенциального) характерны различные уровни организованности. Конечно же, перевозчикам значительно проще осуществлять перевозки на маршрутах, для которых характерен более высокий уровень организованности ($H_n \rightarrow \min$). Выше при этом и показатели эффективности перевозок. А это возможно, как показано в статье, для случая большей доли среди пассажиров тех, кто имеет право на льготу по оплате транспортной услуги.

Является ли это причиной того, что в Минтрансе России сегодня рассматривается возможность организации бесплатного общественного транспорта в городах начиная с 2035 г., неизвестно [9].

Скорее всего, это результат интуитивного понимания проблемы нерациональности безудержных экономически малообоснованных вложений в дорожно-транспортную инфраструктуру городов, что уже давно замечено и российскими [10, 11], и зарубежными исследователями [12].

В рамках данной статьи представлены соображения по логическому обоснованию введения бесплатного общественного транспорта в городах как основы снижения уровня стохастичности параметров перевозочного процесса и повышения его организованности.

В заключение в табл. 8 дадим прогнозную оценку (на 2035 г.) влияния структуры состава перевозимых пассажиров на уровень организованности перевозочного процесса на маршруте № 11 ГПОТ Тюмени.

Таблица 8

Исходные данные и итог прогнозного расчета относительной энтропии H_n-4 перевозочного процесса на маршруте № 11 ГПОТ Тюмени для 2035 г.

Показатель	Значение показателя
Население Тюмени H , чел.	1 000 000
Годовой объем перевозок ГПОТ $Q_{\text{ГПОТ}}$, пасс.	300 000 000
Годовой объем перевозок на маршруте $Q_{\text{М11}}$, пасс.	9 000 000
Годовой объем перевозок пассажиров-льготников на маршруте $Q_{\text{М.льгот.11}}$, пасс.	8 500 000
Годовой объем перевозок пассажиров — федеральных льготников на маршруте $Q_{\text{М.фед.льгот.11}}$, пасс.	8 000 000
K_1	300,0000
K_2	0,0300
K_3	0,9444
K_4	0,9412
Расчетное значение относительной энтропии H_n-4 перевозочного процесса	0,524

Разумеется, какой-то, и значительный по величине, уровень стохастичности будет присутствовать в формировании спроса на услуги ГПОТ всегда. Тем не менее, сравнение современного уровня организованности H_n-4 транспортного процесса на магистральном маршруте № 11 ($H_n-4_{2017-2021} \approx 0,750-0,826$) с прогнозным уровнем $H_n-4_{2035} \approx 0,524$ свидетельствует в пользу постепенного перехода к бесплатному общественному транспорту.

Литература

1. Зубаревич Н. Рост цен и потеря привычек: как новый кризис изменит жизнь в российских регионах. URL: <https://www.forbes.ru/mneniya/458915-rost-cen-i-potera-privyчек-kak-novyj-krizis-izmenit-zhizn-v-rossijskih-regionah> (дата обращения: 16.03.2022).
2. Петров А. И. Особенности энтропийной организованности перевозочного процесса на типичных маршрутах городского общественного транспорта // Транспорт Урала. 2020. № 2 (65). С. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-3-9. ISSN 1815–9400.
3. Вильсон А. Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. Москва : Наука, 1978. 248 с.
4. Цветков О. В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии и технике : монография. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 202 с.
5. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell Systems Technical Journal. 1948. Vol. 27. July. Pp. 379–423. October. Pp. 623–656.
6. Shannon C. E. Communication in the presence of noise // Proc. IRE. 1949. Vol. 37. No. 1. Pp. 10–21.
7. Shannon C. E. Communication Theory of Secrecy Systems // Bell Systems Technical Journal. 1949. Vol. 28. October. Pp. 656–715.
8. Лазарев В. Л. Исследование периодических процессов с учетом фактора состояния неопределенности анализируемого параметра // Мягкие измерения и вычисления. 2021. Т. 44. № 7. С. 5–15. DOI: 10.36871/2618-9976.2021.07.001. ISSN 2618–9976.
9. Минтранс предложил готовиться к бесплатному транспорту и платным дорогам. URL: <https://www.rbc.ru/society/11/09/2020/5f58d4489a7947771a7c09e1> (дата обращения: 21.02.2022).
10. Ануреев С. В. Столкновение теорий бюджетного субсидирования, платных государственных услуг и фискальной монополии (на примере Московского метрополитена и в контексте мирового опыта) // Бухгалтерский учет в бюджетных и некоммерческих организациях. 2020. № 4 (484). С. 13–38. ISSN 2079–6714.
11. Блинкин М. Я., Решетова Е. М. Безопасность дорожного движения: история вопроса, международный опыт, базовые институты. Москва : Издательский дом Высшей школы экономики, 2013. 240 с.
12. Winston C. Efficient Transportation Infrastructure Policy // Journal of Economic Perspectives. 1991. 5 (1). Pp. 113–127. DOI: 10.1257/jep.5.1.113.

Объем статьи 0,73 авторских листа

References

1. Zubarevich N. Price growth and loss of habits: how new crisis will change life in Russian regions [Rost tsen i poterya privyчек: kak novyy krizis izmenit zhizn' v rossijskih regionakh]. URL: <https://www.forbes.ru/mneniya/458915-rost-cen-i-potera-privyчек-kak-novyj-krizis-izmenit-zhizn-v-rossijskih-regionah> (access date: 16.03.2022).
2. Petrov A. I. Features of entropy orderliness of transportation process for typical routes of urban public transport [Osobennosti entropiynoy organizovannosti perevochnogo protsesssa na tipichnykh marshrutakh gorodskogo obshhestvennogo transporta] // Transport of the Urals. 2020. No. 2 (65). Pp. 3–9. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-2-3-9. ISSN 1815–9400.
3. Wilson A. G. Entropy in urban and regional modelling [Entropiynnye metody modelirovaniya slozhnykh sistem]. Moscow : Science, 1978. 248 p.
4. Tsvetkov O. V. Entropy analysis of data in physics, biology and engineering [Entropiynnyy analiz dannykh v fizike, biologii i tekhnike]: monograph. St. Petersburg : Publishing House of ETU «LETI», 2015. 202 p.
5. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication // Bell Systems Technical Journal. 1948. Vol. 27. July. Pp. 379–423. October. Pp. 623–656.
6. Shannon C. E. Communication in the presence of noise // Proc. IRE. 1949. Vol. 37. No. 1. Pp. 10–21.
7. Shannon C. E. Communication Theory of Secrecy Systems // Bell Systems Technical Journal. 1949. Vol. 28. October. Pp. 656–715.
8. Lazarev V. L. Study of periodic processes taking into account the uncertainty state factor of the analyzed parameter [Issledovanie periodicheskikh protsessov s uchetoм faktora sostoyaniya neopredelennosti analiziruемого параметра] // Soft Measurements and Computing. 2021. Vol. 44. No. 7. Pp. 5–15. DOI: 10.36871/2618-9976.2021.07.001. ISSN 2618–9976.
9. Ministry of Transportation of the Russian Federation suggested to get ready to free transport and toll roads [Mintrans predlozhit gotovit'sya k besplatnomu transportu i platnym dorogam]. URL: <https://www.rbc.ru/society/11/09/2020/5f58d4489a7947771a7c09e1> (access date: 21.02.2022).
10. Anureev S. V. Collision of theories of budget financing, paid state services and fiscal monopoly (on example of the Moscow Metro and in context of world experience) [Stolknovenie teoriy byudzhnogo subsidirovaniya, platnykh gosudarstvennykh uslug i fiskal'noy monopolii (na primere Moskovskogo metropolitena i v kontekste mirovogo opyta)] // Accounting in budget and nonprofit organizations. 2020. No. 4 (484). Pp. 13–38. ISSN 2079–6714.
11. Blinkin M. Ya., Reshetova E. M. Road safety: background, international experience, basic institutions [Bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya: istoriya voprosa, mezhdunarodnyy opyt, bazovye institutsii]. Moscow : Publishing House of Higher School of Economics, 2013. 240 p.
12. Winston C. Efficient Transportation Infrastructure Policy // Journal of Economic Perspectives. 1991. 5 (1). Pp. 113–127. DOI: 10.1257/jep.5.1.113.

УДК 656.212.5

Александр Эрнстович Александров, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Игорь Александрович Ковалев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Вадим Юрьевич Пермикин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Александр Владимирович Сурин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Владислав Владиславович Лесных, аспирант кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ЛОГИЧЕСКАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕРАБОТКИ ВАГОНПОТОКОВ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ

Alexander Ernstovich Alexandrov, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Igor Alexandrovich Kovalev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Vadim Yuryevich Permikin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Alexander Vladimirovich Surin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Vladislav Vladislavovich Lesnykh, postgraduate student, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Logic verification of optimization model of car traffic processing at marshalling station

Аннотация

В настоящее время в исследованиях, посвященных оперативному планированию на железнодорожном транспорте, широко применяется математическое моделирование. При планировании работы сортировочных станций в краткосрочном периоде, как правило, используются эвристические алгоритмы и имитационное моделирование, вместе с тем улучшить качество планирования возможно на основе моделей строгой оптимизации. Авторами при помощи метода частично целочисленного линейного программирования (Mixed Integer Linear Program — MILP) построены математическая и компьютерная модели процесса переработки вагонопотоков на сортировочной станции. В статье рассмотрена верификация этой модели, нацеленная в первую очередь на выявление содержательных ошибок в технологии работы сортировочной станции. Для верификации использован логический подход.

Ключевые слова: сортировочная станция, автоматизация оперативного планирования, математическая модель, частично целочисленное линейное программирование, компьютерная модель, численное решение, оптимальное решение, верификация.

Abstract

Mathematical modeling is widely spread among studies dedicated to operational planning on the railway transport. In short-term planning of marshalling station operation heuristic algorithms and simulation modeling are mainly used. It is possible to improve the quality of planning on the basis of models of strict optimization. The authors have created both a mathematical and a computer model of car traffic processing at a marshalling station with the use of mixed integer linear programming. For the realization of the computer model the authors have used a package of applied programs. The paper considers verification of the model. This procedure is necessary for revealing possible technical and content mistakes in a computer realization of a mathematical model. The authors have made the emphasis on revealing content mistakes in marshalling station operation. For the verification of the model the authors have used a logic approach.

Keywords: marshalling station, automation of operational planning, mathematical model, mixed integer linear programming, computer model, numerical solution, optimal solution, verification.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-17-22

ВВЕДЕНИЕ

Метод частично целочисленных задач линейного программирования (Mixed Integer Linear Program — MILP) довольно широко применяется для решения практических проблем при управлении транспортными потоками [1–5].

Так, в [1] приведен пример успешного использования MILP для составления и корректировки расписания движения поездов на железнодорожной сети в южной области Швейцарии.

В работе [2], где рассмотрен альтернативный способ доставки грузов — вместо автомобильного транспорта изучены возможности существующей пригородной железной дороги, модель MILP предназначена, чтобы минимизировать время ожидания ежедневных поставок. Как подтвердили численные эксперименты, для случаев умеренной размерности модель позволяет найти решение в очень короткий срок.

В [3] предложено использовать MILP для решения задач управления железнодорожным движением на инфраструктуре с недостаточным развитием, а именно для минимизации задержек пассажирских и грузовых поездов. Результаты проведенного исследования показали, что этот подход может оказать эффективную поддержку диспетчерам в принятии решения при управлении движением поездов в режиме реального времени.

Авторами была разработана оптимизационная потоковая модель переработки вагонопотоков на сортировочной станции [6] на основе MILP, а данная статья посвящена описанию процесса верификации оптимизационной модели.

Существует множество подходов к верификации математической модели [7–12]. Выбор того или иного из них зависит от цели проекта, этапа его реализации и ограничений различной природы (экономических, организационных, технологических).

В статье для верификации, которая понимается авторами как проверка соответствия поведения модели предположениям исследователя, используется логический подход. Он предполагает анализ численного решения на правильность отображения технологии переработки вагонопотоков и соответствия его свойствам, заложенным в математическую модель. Для этого используется направленное тестирование, т. е. расчет на специально подготовленных исходных данных, которые позволяют контролировать точность отображения технической структуры и технологии работы моделируемого объекта.

ЛОГИЧЕСКАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Функционал математической модели имеет вид

$$F = F_1 + F_2, \quad (1)$$

$$F_1 = \sum_i \sum_j \sum_t c_i(t) x_{ij}^{wto}(t) + \sum_i \sum_j \sum_t c_i(t) x_{ij}^{to}(t) + \\ + \sum_i \sum_j \sum_t c_i(t) x_{ij}^{wr}(t) + \sum_i \sum_j \sum_t c_i(t) x_{ij}^r(t) + \\ + \sum_j \sum_t c_j(t) x_j^n(t) + \sum_j \sum_t c_j(t) x_j^f(t) \rightarrow \min;$$

$$F_2 = \sum_j \sum_k \sum_t c_k(t) x_{jk}^{wto}(t) + \sum_j \sum_k \sum_t c_k(t) x_{jk}^{to}(t) + \\ + \sum_j \sum_k \sum_t c_k(t) x_{jk}^{wg}(t) + \sum_j \sum_t c_j(t) x_j^n(t) + \\ + \sum_j \sum_t c_j(t) x_j^f(t) \rightarrow \min.$$

В функционале и в ограничениях, которые будут рассмотрены ниже, используются следующие обозначения переменных: $Q_i(t)$ — величина прибывшего на i -й путь поезда в момент времени t ,

$$Q_i(t) = \begin{cases} \sum_j q_{ij}(t), & \text{если поезд прибыл в момент } t \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где q_{ij} — количество вагонов j -го назначения на i -м пути.

Для описания продвижения потока введем в задачу переменные, отображающие основные этапы технологии обработки вагонопотока в подсистеме:

$x_{ij}^{wto}(t)$ — количество вагонов j -го назначения, ожидающих осмотра по прибытии на i -м пути;

$x_{ij}^{to}(t)$ — количество вагонов j -го назначения, с которыми выполняется осмотр по прибытии на i -м пути;

$x_{ij}^{or}(t)$ — количество вагонов j -го назначения, ожидающих отпуска на i -м пути;

$x_{ij}^r(t)$ — количество вагонов j -го назначения, с которыми производится отпуск с i -го пути.

Поскольку каждый этап технологии (кроме простоя под накоплением) состав должен пройти целиком, введем в задачу булевы переменные:

$b_i^{wto}(t)$ — состав ожидает осмотра по прибытии на i -м пути,

$$b_i^{wto}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает осмотра;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_i^{to}(t)$ — состав проходит осмотр по прибытии на i -м пути,

$$b_i^{to}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав проходит осмотр;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_i^{wr}(t)$ — состав ожидает расформирования на i -м пути,

$$b_i^{wr}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает расформирования;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_i^r(t)$ — состав расформируется с i -го пути;

$$b_i^r(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав расформируется;} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

Чтобы отобразить накопление и формирование составов в сортировочном парке, для каждого j -го назначения введем переменные:

$x_j^n(t)$ — количество вагонов j -го назначения на пути сортировочного парка под накоплением;
 $x_j^f(t)$ — количество вагонов j -го назначения, с которыми производится формирование после завершения накопления;
 $b_j^f(t)$ — состав j -го назначения формируется,

$$b_j^f(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав формируется} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Обозначим расходы (затраты) на простой вагонов в парке прибытия как $c_i(t)$, а расходы (затраты) на простой вагонов j -го назначения в сортировочном парке — как $c_j(t)$.

Для отображения основных этапов технологии обработки состава в подсистеме формирования и отправления введем в задачу следующие переменные:

$x_j^n(t)$ — количество вагонов j -го назначения на пути сортировочного парка под накоплением;

$x_{jk}^f(t)$ — количество вагонов j -го назначения, с которыми выполняются формирование и последующая перестановка на k -й путь отправления;

$x_{jk}^{to}(t)$ — количество вагонов j -го назначения в ожидании осмотра по отправлению состава на k -м пути;

$x_{jk}^{io}(t)$ — количество вагонов j -го назначения, с которыми производится осмотр по отправлению на k -м пути;

$x_{jk}^{wg}(t)$ — количество вагонов j -го назначения в ожидании отправления (нитки графика) на k -м пути.

Поскольку каждый этап обработки (кроме простоя под накоплением) состав должен пройти целиком, введем в задачу булевы переменные:

$b_k^{wto}(t)$ — состав ожидает осмотра по отправлению на k -м пути,

$$b_k^{wto}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает осмотра} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_k^{to}(t)$ — состав проходит осмотр по отправлению на k -м пути,

$$b_k^{to}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав проходит осмотр} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_k^{wg}(t)$ — состав ожидает отправления (нитки графика) на k -м пути,

$$b_k^{wg}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав ожидает отправления} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases};$$

$b_{jk}^f(t)$ — состав j -го назначения формируется с последующей перестановкой на k -й путь отправления,

$$b_{jk}^f(t) = \begin{cases} 1, & \text{если состав формируется} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Чтобы отобразить отправление поездов по ниткам графика для каждого k -го пути, на который возможна перестановка составов j -го назначения, введем переменные:

$x_{jk}^g(t)$ — количество вагонов j -го назначения, отправляемых по нитке графика с k -го пути парка отправления в момент времени t ;

$b_{jk}^g(t)$ — поезд j -го назначения отправлен с k -го пути,

$$b_{jk}^g(t) = \begin{cases} 1, & \text{если поезд отправлен} \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Обозначим расходы (затраты) на простой вагонов в парке отправления как $c_k(t)$, а расходы (затраты) на простой вагонов j -го назначения в сортировочном парке — как $c_j(t)$.

За правильное отображение технологии работы станции в математической модели отвечают ограничения. Они должны обеспечить выполнение следующих требований к численному решению:

состав должен проходить все этапы обработки последовательно;

на каждом этапе состав должен обрабатываться целиком; количество ресурсов технического обслуживания (например, бригад осмотра) может быть ограничено;

одновременно со всех путей парка прибытия может выполняться только одно расформирование;

перестановка всего состава должна быть возможна только на один путь парка отправления;

количество путей парка отправления, специализированных для отправления поездов конкретного назначения, может быть ограничено (например, по вместимости пути, возможности отправить поезд конкретного назначения с данного пути и т.п.).

Ограничения для каждого i -го пути парка прибытия:

$$\sum_j x_{ij}^{wto}(t) + \sum_j x_{ij}^{io}(t) - \sum_j x_{ij}^{wto}(t-1) = Q_i(t); \quad (2)$$

$$\sum_j x_{ij}^{wr}(t) + \sum_j x_{ij}^r(t) - \sum_j x_{ij}^{wr}(t-1) - \sum_j x_{ij}^{to}(t-t_{io}) = 0. \quad (3)$$

Ограничения, необходимые для отображения задачи по обработке состава на каждом этапе целиком:

$$\sum_j x_{ij}^{wto}(t) - N_i b_i^{wto}(t) = 0, \quad (4)$$

где N_i — величина состава на i -м пути;

$$\sum_j x_{ij}^{to}(t) - N_i b_i^{to}(t) = 0; \quad (5)$$

$$\sum_j x_{ij}^{wr}(t) - N_i b_i^{wr}(t) = 0; \quad (6)$$

$$\sum_j x_{ij}^r(t) - N_i b_i^r(t) = 0; \quad (7)$$

$$b_i^{wto}(t) + b_i^{to}(t) + b_i^{wr}(t) + b_i^r(t) \leq 1. \quad (8)$$

Ограничения, необходимые для расформирования только одного состава в каждый момент t :

$$\sum_i b_i^r(t) \leq 1. \quad (9)$$

Ограничения, необходимые для выполнения технического обслуживания имеющимся количеством ресурсов (например, бригад осмотра) в каждый момент t на всех путях парка прибытия:

$$\sum_i b_i^{to}(t) \leq K^{to}, \quad (10)$$

где K^{to} — количество ресурсов для выполнения технического обслуживания в парке прибытия.

Ограничения на накопление и формирование составов для каждого j -го назначения:

$$\begin{aligned} \sum_i x_{ij}^r(t) + x_j^n(t-1) - x_j^n(t) - \\ - \sum_k x_{jk}^f(t) = 0; \end{aligned} \quad (11)$$

$$x_{jk}^f(t) - N_j b_{jk}^f(t) = 0; \quad (12)$$

$$x_j^n(t) \leq V_j, \quad (13)$$

где N_j — величина формируемого состава j -го назначения;

V_j — емкость (вместимость) путей накопления j -го назначения в сортировочном парке.

Остальные ограничения будут такими.

Для каждого k -го пути парка отправления:

$$x_{jk}^{wto}(t-1) + x_{jk}^f(t-1) - x_{jk}^{wto}(t) = 0; \quad (14)$$

$$\begin{aligned} x_{jk}^{to}(t-t_{to}) + x_{jk}^{wg}(t-1) - \\ - x_{jk}^{wg}(t) - x_{jk}^g(t) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Для отображения задачи обработки состава на каждом этапе целиком служат ограничения:

$$x_{jk}^{wto}(t) - N_j b_k^{wto}(t) = 0, \quad (16)$$

где N_j — величина сформированного состава j -го назначения в вагонах;

$$x_{jk}^{to}(t) - N_j b_k^{to}(t) = 0; \quad (17)$$

$$x_{jk}^{wg}(t) - N_j b_k^{wg}(t) = 0; \quad (18)$$

$$x_{jk}^g(t) - N_j b_k^g(t) = 0; \quad (19)$$

$$b_k^{wto}(t) + b_k^{to}(t) + b_k^{wg}(t) + b_k^g(t) \leq 1. \quad (20)$$

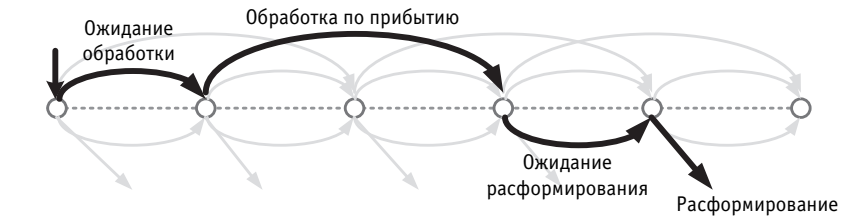


Рис. 1. Фрагмент решения, соответствующий обработке состава на пути парка приема

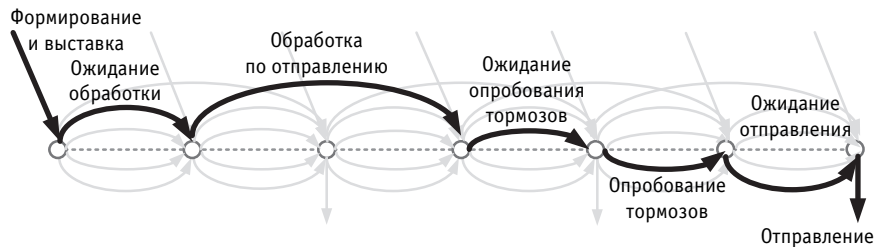


Рис. 2. Фрагмент решения, соответствующий обработке состава на пути парка отправления

Следующие ограничения необходимы для:

перестановки только одного сформированного состава в каждый момент t со всех путей накопления на k -й путь парка отправления

$$\sum_j b_{jk}^f(t) \leq 1; \quad (21)$$

выполнения технического обслуживания имеющимся количеством ресурсов (например, бригадами осмотра) в каждый момент t на всех путях парка отправления

$$\sum_k b_k^{to}(t) \leq K_o^{to}, \quad (22)$$

где K_o^{to} — количество ресурсов для выполнения технического обслуживания в парке отправления;

соблюдения вместимости пути парка отправления

$$x_{jk}^{wto}(t) + x_{jk}^{to}(t) + x_{jk}^{wg}(t) \leq V_k, \quad (23)$$

где V_k — емкость (вместимость) k -го пути парка отправления в вагонах.

Если компьютерная модель работает в соответствии с идеями, заложенными авторами в математическую модель, то основные элементы решения, относящиеся к обработке составов в подсистемах станции, должны выглядеть подобно рис. 1 и 2. Если в решении поток пойдет по дугам, обозначенным сплошными жирными линиями, то по остальным дугам прохождение потока будет невозможно. Это позволит преобразовать решение

в технологически корректный оперативный план работы станции.

Для верификации численного решения был составлен набор исходных данных. Рассматривалась сортировочная станция с последовательным расположением парка прибытия (8 путей), сортировочного парка (28 путей) и парка отправления (15 путей). Период расчета принят равным 6 ч. Модель описывалась на специализированном языке программирования OPL. Длительность такта принята 15 мин, что практически соответствует величине горочного технологического интервала на рассматриваемой сортировочной станции. Период планирования в задаче равен 24 тактам. Размерность полученной задачи составила 72504 переменные и 41395 ограничений. Время расчета на компьютере с процессором Intel Core i7 — до 12 мин.

На первом этапе проверки численного решения внимание было сосредоточено на формальном выполнении ограничений математической модели. Все ограничения были соблюдены. Следующая проверка стала наиболее важной с точки зрения конечной цели проекта, т.е. численное решение было необходимо трансформировать в технологическую форму, пригодную для использования диспетчерским аппаратом сортировочной станции. Для этого была выбрана графическая форма представления технологического процесса (рис. 3). В поле графика использованы следующие условные обозначения: вертикальная стрелка в парке прибытия — это прибытие поезда на путь;

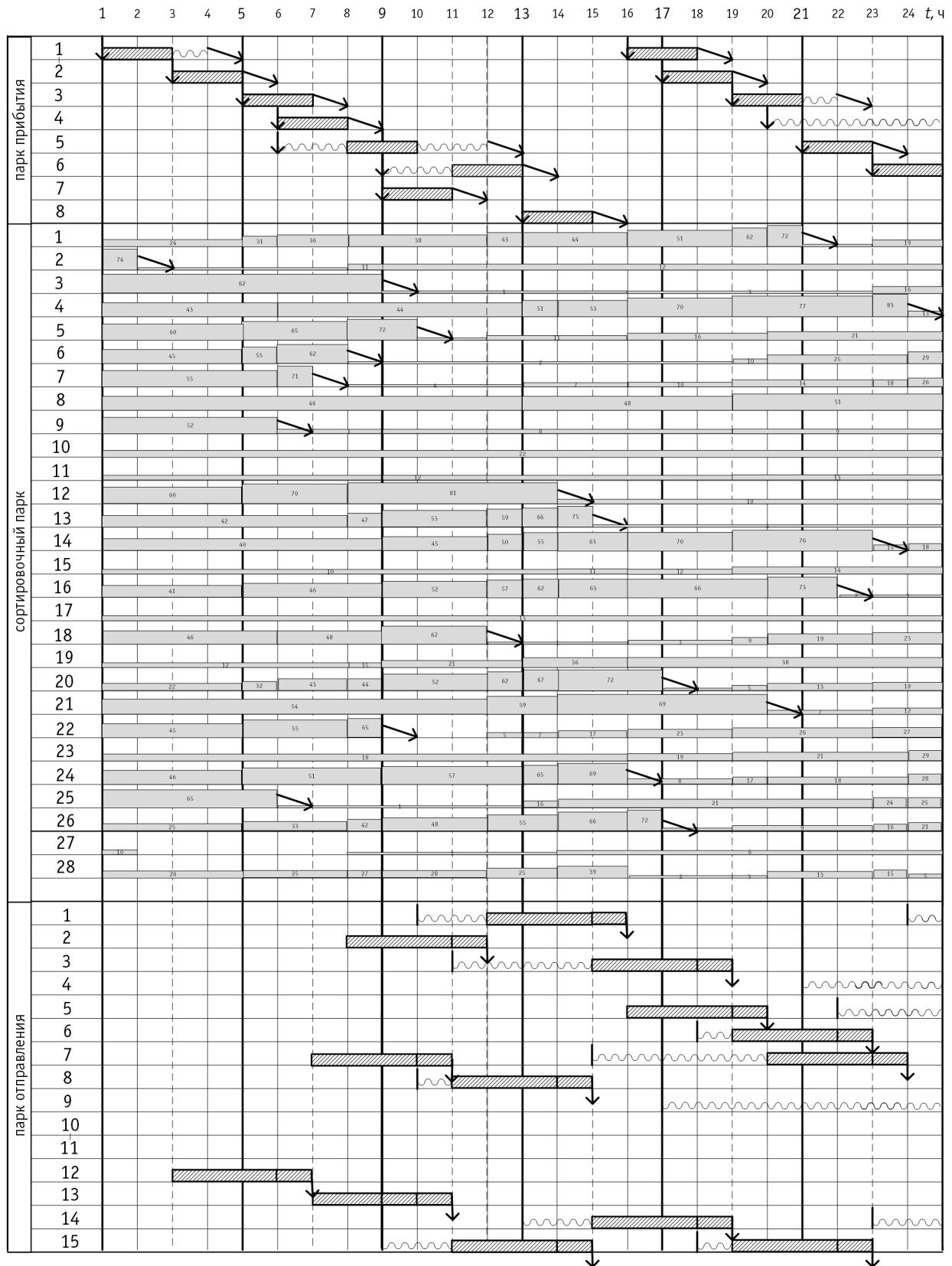


Рис. 3. Графическая форма представления решения в виде технологического процесса

заштрихованные прямоугольники в парках прибытия и отправления — технологические операции обработки составов;
волнистые линии — периоды ожидания технологических операций;

наклонная стрелка в парке прибытия — расформирование составов;

ступенчатые диаграммы в сортировочном парке — накопление составов;

наклонная стрелка в сортировочном парке — формирование и перестановка составов;

вертикальная стрелка в парке отправления — готовность поезда к отправлению со станции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоинством предлагаемой оптимизационной модели MILP является то, что в ней правильно отображены сложная струк-

тура транспортного потока и его трансформация в процессе переработки на сортировочной станции. При этом минимизируется время нахождения вагонов на станции и обеспечивается отправление поездов по заданному расписанию.

Представленную модель можно использовать в АСУ сортировочной станцией, что повысит уровень определенности сложной транспортной системы, улучшит натуральные и экономические показатели работы.

Численная модель успешно прошла логическую верификацию. При этом на первом этапе было проверено соответствие решения ограничениям математической модели. На втором этапе подтверждена возможность содержательной технологической трактовки численного решения, которое может быть преобразовано в технологический график плана работы сортировочной станции, причем авторы видят перспективы для автоматизации такого преобразования.

Литература

1. Khoshniyat F. F., Krasemann J. T. Analysis of Strengths and Weaknesses of a MILP Model for Revising Railway Traffic Timetables // 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2017). Article No. 10. Pp. 10:1–10:17. DOI: 10.4230/OASICS.ATMOS.2017.10.
2. Behiri W., Ozturk O., Belmokhtar-Berraf S. Urban Freight by Rail: A MILP Modeling for Optimizing the Transport of Goods // Proceedings of the 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, Bordeaux, France, 1–4 June 2016. Pp. 2–9.
3. Infrastructure Modeling and Optimization to Solve Real-time Railway Traffic Management Problems / L. Lindenmaier, I. F. Lövétei, G. Lukács, S. Aradi // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. 2021. 49 (3). Pp. 270–282. DOI: 10.3311/PPtr.18582.
4. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling / V. Cacchiani, D. Huisman, M. Kidd [et al.] // Transportation Research. Part B: Methodological. 2014. Vol. 63. Pp. 15–37. DOI: 10.1016/j.trb.2014.01.009.
5. Railway track allocation: models and methods / R. Lusby, J. Larsen, M. Ehrgott, D. Ryan // OR Spectrum. 2011. 33(4). Pp. 843–883. DOI: 10.1007/s00291-009-0189-0.
6. Optimization flow model for handling car flows at the marshalling yard / A. Alexandrov, A. Galkin, E. Timukhina, N. Tushin // MATEC Web of Conferences X International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems», Tomsk, Russia, 15–16 November 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201821602024.
7. Clarke E. M., Kurshan R. P. Computer-aided verification // IEEE Spectrum. 1996. Vol. 33. Issue 6. Pp. 61–67. DOI: 10.1109/6.499951.
8. Hu A. J. Formal hardware verification with BDDs: An introduction // Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. 1997. Pp. 677–682.
9. Kern C., Greenstreet M. R. Formal verification in hardware design: A survey // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems. 1999. Vol. 4. Issue 2. Pp. 123–193. DOI: 10.1145/307988.307989.
10. Agalya R., Saravanan S. Recent trends on Post-Silicon validation and debug: An overview // International Conference on Networks and Advances in Computational Technologies (NetACT), Trivandrum, Kerala, 20–22 July 2017. Pp. 56–63. DOI: 10.1109/NETACT.2017.8076741.
11. Temel M., Slobodova A., Hunt Jr. W. A. Automated and Scalable Verification of Integer Multipliers // Proceedings of the 32nd International Conference on Computer Aided Verification (CAV 2020), Los Angeles, 21–24 July 2020. Pp. 485–507. DOI: 10.1007/978-3-030-53288-8_23.
12. Liu K., Wang P., Li Q. Research on Verification and Validation of Turbofan Engine Performance Model // Proceedings of the 40th Chinese Control Conference (CCC), Shanghai, 26–28 July 2021. Pp. 6662–6667. DOI: 10.23919/CCC 52363.2021.9550650.

References

1. Khoshniyat F. F., Krasemann J. T. Analysis of Strengths and Weaknesses of a MILP Model for Revising Railway Traffic Timetables // 17th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2017). Article No. 10. Pp. 10:1–10:17. DOI: 10.4230/OASICS.ATMOS.2017.10.
2. Behiri W., Ozturk O., Belmokhtar-Berraf S. Urban Freight by Rail: A MILP Modeling for Optimizing the Transport of Goods // Proceedings of the 6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, Bordeaux, France, 1–4 June 2016. Pp. 2–9.
3. Infrastructure Modeling and Optimization to Solve Real-time Railway Traffic Management Problems / L. Lindenmaier, I. F. Lövétei, G. Lukács, S. Aradi // Periodica Polytechnica Transportation Engineering. 2021. 49 (3). Pp. 270–282. DOI: 10.3311/PPtr.18582.
4. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling / V. Cacchiani, D. Huisman, M. Kidd [et al.] // Transportation Research. Part B: Methodological. 2014. Vol. 63. Pp. 15–37. DOI: 10.1016/j.trb.2014.01.009.
5. Railway track allocation: models and methods / R. Lusby, J. Larsen, M. Ehrgott, D. Ryan // OR Spectrum. 2011. 33(4). Pp. 843–883. DOI: 10.1007/s00291-009-0189-0.
6. Optimization flow model for handling car flows at the marshalling yard / A. Alexandrov, A. Galkin, E. Timukhina, N. Tushin // MATEC Web of Conferences X International Scientific and Technical Conference «Polytransport Systems», Tomsk, Russia, 15–16 November 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201821602024.
7. Clarke E. M., Kurshan R. P. Computer-aided verification // IEEE Spectrum. 1996. Vol. 33. Issue 6. Pp. 61–67. DOI: 10.1109/6.499951.
8. Hu A. J. Formal hardware verification with BDDs: An introduction // Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing. 1997. Pp. 677–682.
9. Kern C., Greenstreet M. R. Formal verification in hardware design: A survey // ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems. 1999. Vol. 4. Issue 2. Pp. 123–193. DOI: 10.1145/307988.307989.
10. Agalya R., Saravanan S. Recent trends on Post-Silicon validation and debug: An overview // International Conference on Networks and Advances in Computational Technologies (NetACT), Trivandrum, Kerala, 20–22 July 2017. Pp. 56–63. DOI: 10.1109/NETACT.2017.8076741.
11. Temel M., Slobodova A., Hunt Jr. W. A. Automated and Scalable Verification of Integer Multipliers // Proceedings of the 32nd International Conference on Computer Aided Verification (CAV 2020), Los Angeles, 21–24 July 2020. Pp. 485–507. DOI: 10.1007/978-3-030-53288-8_23.
12. Liu K., Wang P., Li Q. Research on Verification and Validation of Turbofan Engine Performance Model // Proceedings of the 40th Chinese Control Conference (CCC), Shanghai, 26–28 July 2021. Pp. 6662–6667. DOI: 10.23919/CCC 52363.2021.9550650.

Объем статьи 0,67 авторских листа

УДК 656.254.5:656.265:656.086.2

Нина Фридриховна Сирина, доктор технических наук, профессор кафедры «Вагоны» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Валерий Александрович Сисин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Ольга Андреевна Сисина, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской части Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕАГИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Nina Fridrikhovna Sirina, DSc in Engineering, Professor, Railway Cars Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Valeriy Alexandrovich Sisin, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Olga Andreevna Sisina, PhD in Engineering, Researcher, Research Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Development of algorithmic model for reaction process of subsystems targeted on provision of railway transport safety

Аннотация

Для объектов железнодорожной инфраструктуры и железнодорожных транспортных средств характерна высокая вероятность возникновения как угроз и актов незаконного вмешательства в производственный процесс, так и иных чрезвычайных, нестандартных ситуаций. Объекты и транспортные средства инфраструктуры железнодорожного транспорта являются более доступными для проникновения и совершения противоправных действий в силу особенностей их производственного процесса, связанного с перевозками и соответственно необходимостью допуска большого количества людей.

Из-за невозможности полностью исключить на объектах инфраструктуры и транспортных средствах возникновение рассмотренных ситуаций минимизация их последствий остается актуальной проблемой.

Ключевые слова: транспортная безопасность, чрезвычайная ситуация, объекты транспортной инфраструктуры, перевозочный процесс, имитационная модель.

Abstract

Objects of railway infrastructure and railway vehicles are characterized by high probability of occurrence of both acts of unlawful interference into production process and other emergency and abnormal situations. Railway infrastructure objects are easily accessible for trespassing, which is caused by peculiarities of production process connected with transportation and, therefore, with necessity to allow access to many people.

As it is impossible to completely eliminate the occurrence of considered situations on infrastructure objects and transport vehicles, minimization of their consequences is an actual problem.

Keywords: transport safety, emergency situation, transport infrastructure objects, transportation process, simulation model.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-23-30

Минимизировать последствия от угроз и актов незаконного вмешательства (АНВ) в производственный процесс железнодорожного транспорта возможно при незамедлительном реагировании подразделений и сил обеспечения транспортной безопасности; должностных лиц, ответственных за транспортную безопасность; работников структурных подразделений железной дороги и иных структурных единиц системы обеспечения безопасности в Российской Федерации, а также при своевременной передаче ими сведений о сложившейся ситуации в вышестоящие уполномоченные органы обеспечения безопасности функциональных подсистем [1].

Структуру обеспечения безопасности железнодорожного транспорта Российской Федерации в зависимости от функций по защите объектов и средств транспортной инфраструктуры (ОТИиТС) можно разделить:

на подсистему единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций Российской Федерации (РСЧС), структурной единицей которой является подсистема РСЧС ОАО «РЖД»; подсистему противодействия терроризму в Российской Федерации;

подсистему транспортной безопасности Российской Федерации, структурной единицей которой является подсистема транспортной безопасности ОАО «РЖД».

Все подсистемы взаимодействуют друг с другом на пяти уровнях реагирования РСЧС [2, 3]. Каждый уровень определяется масштабами и ущербом от произошедшей ситуации. Органы взаимодействия, ответственные за реагирование, определяются уровнями реагирования.

Один из основополагающих компонентов процесса реагирования — доведение информации об угрозах и иных чрезвычайных, нештатных ситуациях до структурных единиц подсистем обеспечения безопасности, требуемых к привлечению для предупреждения угроз и/или ликвидации таких ситуаций.

Доведение информации при реагировании на угрозы и иные чрезвычайные, нештатные ситуации называется процессом информационного реагирования (ИР).

Под структурными единицами подсистем понимаются должностные лица служб, структурных подразделений функциональных подсистем, ответственных за ИР.

Разработанная для железных дорог Российской Федерации алгоритмическая модель ИР подсистем обеспечения безопасности представлена на рис. 1 и 2.

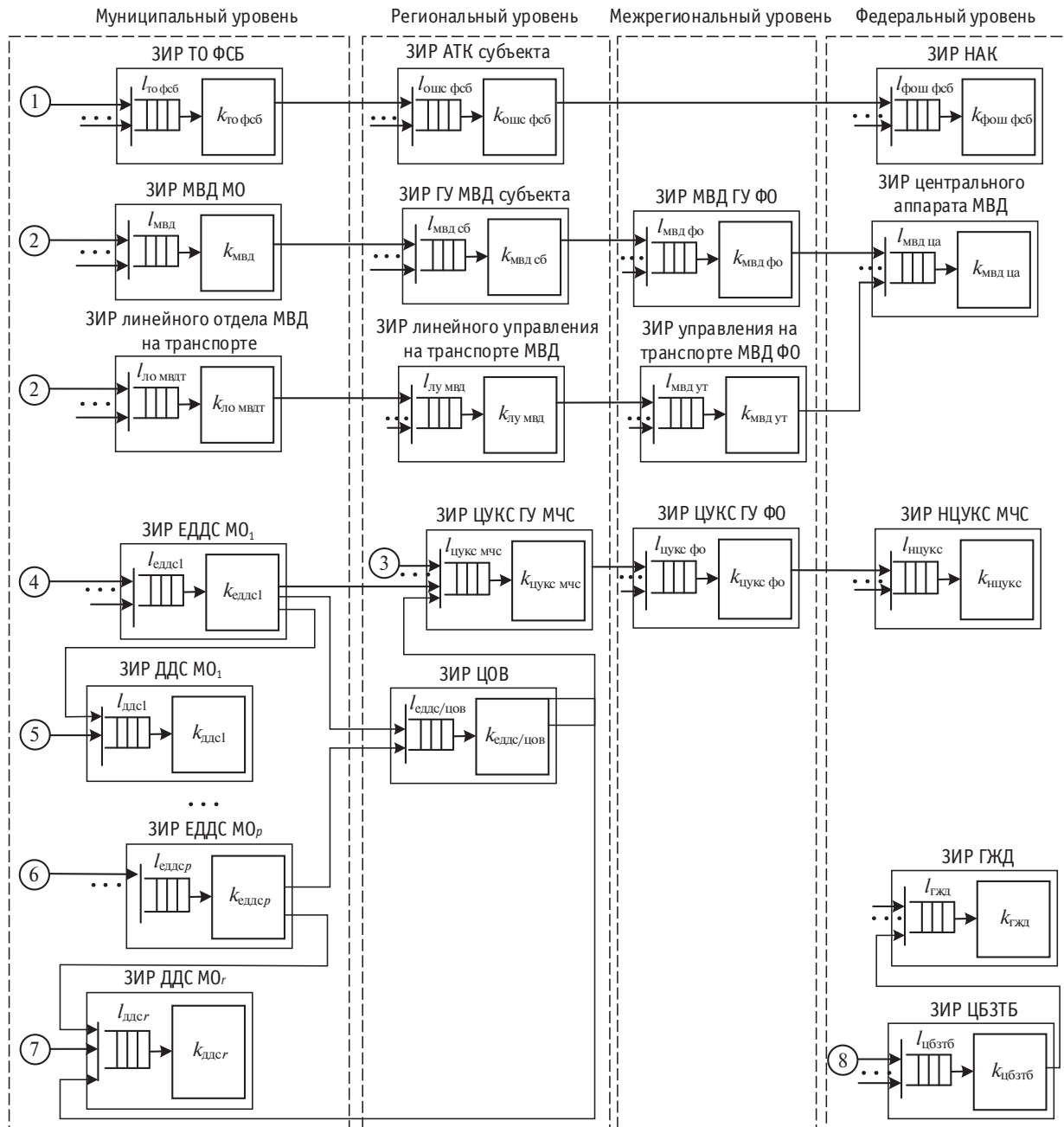


Рис. 1. Модель информационного реагирования структурных единиц функциональных подсистем, обеспечивающих безопасность железнодорожного транспорта

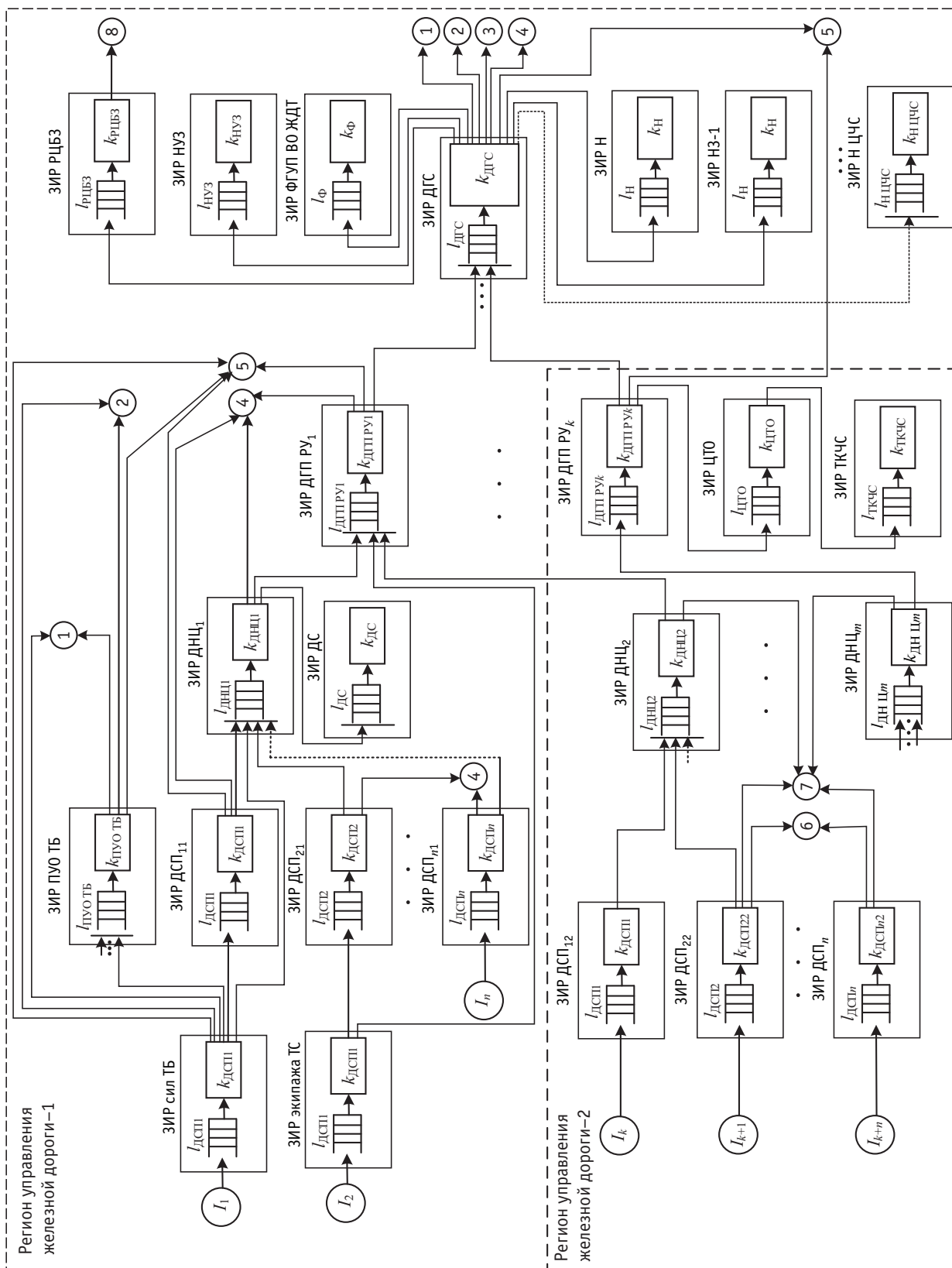


Рис. 2. Модель информационного реагирования структурных единиц подсистемы обеспечения безопасности железнодорожного транспорта, существующих в границах железных дорог

Архитектура системы ИР структурных единиц подсистем обеспечения безопасности железнодорожного транспорта разрабатывалась в соответствии с регламентами и иными нормативно-правовыми документами, утверждающими порядок действий должностных лиц рассматриваемых подсистем [4–7].

К структурным единицам ИР подсистем обеспечения безопасности железнодорожного транспорта относятся:

1. Диспетчерский состав филиалов производственных подразделений железных дорог и дочерних компаний ОАО «РЖД»: дежурные по станции, поездные диспетчеры, дорожные диспетчеры районов управления, старшие дорожные диспетчеры и иные диспетчеры служб, структур, хозяйств, обеспечивающих производственный процесс, в том числе диспетчеры ситуационного центра мониторинга и управления чрезвычайными ситуациями, региональных дирекций здравоохранения, подразделений транспортной безопасности ООО «РЖД — транспортная безопасность».

2. Руководящий состав подразделений ОАО «РЖД»: начальники железных дорог, заместители начальников железных дорог по территориальному управлению и иные начальники дирекций, служб и хозяйств. Руководящий состав входит в комиссию по ликвидации чрезвычайных ситуаций соответственно уровням реагирования РСЧС.

3. Внешние по отношению к ОАО «РЖД» структурные единицы, входящие в состав: федерального государственного предприятия «Ведомственная охрана железнодорожного транспорта Российской Федерации» (ФГУП ВО ЖДТ); центров управления в кризисных ситуациях главных управлений (ЦУКС ГУ МЧС, ЦУКС ГУ МЧС ФО) и национальных центров (НЦУКС) Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС); управлений и центрального аппарата Министерства внутренних дел Российской Федерации (МВД), в том числе на транспорте; Федеральной службы безопасности (ФСБ).

Дополнения к алгоритмической модели ИР структурных единиц подсистем обеспечения безопасности функционирования железнодорожного транспорта (см. рис. 1 и 2) в части, касающейся порядка их взаимодействия, представлены на рис. 3.

В разработанной модели (см. рис. 1 и 2) структурные единицы подсистем представлены звеньями информационного реагирования (ЗИР), организующими во взаимосвязи открытую систему ИР (СИР). В такой системе вызовы поступают от внешних источников и по завершении обслуживания уходят из нее.

ЗИР представляют собой системы массового обслуживания, состоящие из накопителей вызовов l и каналов обслуживания k .

ЗИР, на которые будут поступать сообщения о АНВ и иных чрезвычайных, нештатных ситуациях от источников первичных сообщений I (см. рис. 2), называются первоочередными ЗИР.

Поток вызовов на первоочередные ЗИР случайный и обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последействия.

На последующие ЗИР поступает входной поток вызовов $\lambda_{в1} \dots \lambda_{вk}$ и поток повторных вызовов $\lambda_{п}$, возникающих из-за потери вызова либо при переполнении накопителя, либо при прерывании вызова (рис. 4).

Интенсивность потока повторных вызовов определяется следующим образом:

$$\lambda_{п} = \lambda_{прп} + \sum_{i=1}^k \lambda_{прв}, \quad (1)$$

где $\lambda_{п}$ — интенсивность повторно поступающего на обслуживание потока вызовов;

$\lambda_{прп}$ — интенсивность потока вызовов, поступающих на обслуживание в случае переполнения накопителя l ;

$\lambda_{прв}$ — интенсивность потока вызовов, поступающих на дообслуживание в случае прерывания вызова;

k — количество каналов обслуживания.

При одинаковых законах распределения потоков вызовов, входящих в суммарный поток, последний, согласно центральной предельной теореме, будет приближаться к нормальному (пуассоновскому) закону распределения. Таким образом, суммарный выходной поток с последующих ЗИР будет стационарным, неординарным и с ограниченным последствием:

$$\lambda_{вых} = \sum_{i=1}^N \lambda_{вi}, \quad (2)$$

где $\lambda_{вых}$ — интенсивность потока обслуженных вызовов;

$\lambda_{вi}$ — интенсивность входного потока вызовов;

N — количество структурных единиц подсистем (ЗИР), с которых поступают вызовы.

На первоочередные ЗИР будет поступать поток вызовов, задаваемый экспоненциальным законом распределения:

$$f_{выз}(t) = 4,288 \cdot e^{-0,2131t}. \quad (3)$$

Это распределение получено по результатам обработки статистических данных о потоках вызовов на диспетчерские службы МЧС России в пакете прикладных программ MATLAB (рис. 5).

Интенсивность обслуживания вызовов ЗИР μ также определяется показательным законом распределения:

$$f_{обсл}(t) = 14,26 \cdot e^{-0,03655t}. \quad (4)$$

Аппроксимирующая статистических данных времени обслуживания вызовов представлена на рис. 6.

Дисциплина поступления вызовов, интенсивность их обслуживания, число каналов обслуживания и емкость накопителя определяют тип ЗИР.

По нотации Д. Кендалла, ЗИР, моделирующие работу диспетчерского состава филиалов производственных подразделений железных дорог, имеют тип

$$GI/M/1/1, \quad (5)$$

где GI — рекуррентный входящий поток вызовов;

M — экспоненциальный закон распределения времени обслуживания;

1 — число каналов обслуживания в ЗИР;

1 — число мест ожидания (емкость) накопителя.

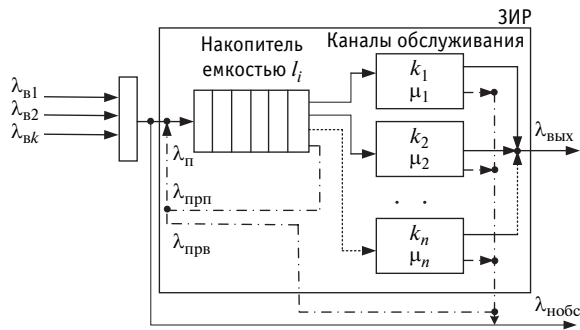


Рис. 4. Модель поступления потоков вызовов на ЗИР

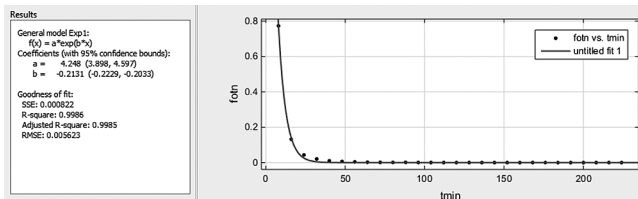


Рис. 5. Аппроксимирующая статистических данных о промежутках времени между поступающими вызовами

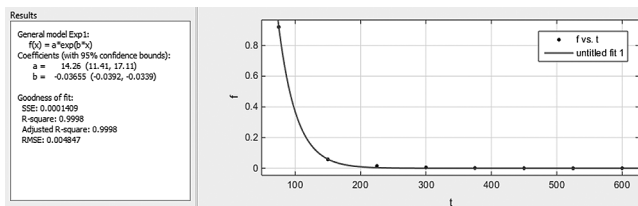


Рис. 6. Аппроксимирующая статистических данных времени обслуживания вызовов

Для первоочередных ЗИР:

$$M/M/1/1. \quad (6)$$

Конфигурация ЗИР внешних относительно структуры железнодорожного транспорта структурных единиц:

$$GI/M/n/\infty. \quad (7)$$

В ЗИР всех рассмотренных типов вызовы обслуживаются в порядке поступления, т.е. дисциплина обслуживания вызовов является беспriorитетной.

Архитектура ЗИР определяется структурой формирования временных задержек ИР.

Так, на рис. 7 показана модель формирования временных задержек при информационном реагировании пунктов управления обеспечением транспортной безопасности (ПУО ТБ) на угрозы совершения и совершение АНВ на объектах и средствах транспортной инфраструктуры по сетям телефонной связи [5, 8, 9].

На рис. 8 представлена модель временных задержек ИР диспетчеров структурных подразделений железной дороги.

Информационное реагирование операторами (диспетчерами) подсистем РСЧС, не входящих в структуру железнодорожного транспорта, осуществляется в автоматизированном режиме (рис. 9).

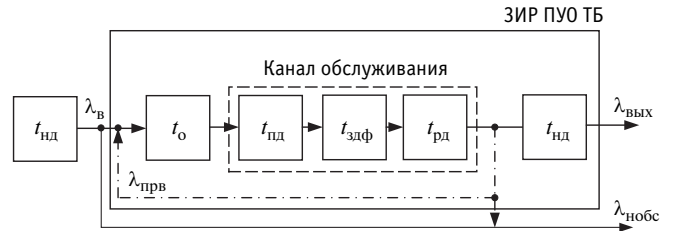


Рис. 7. Архитектура звеньев информационного реагирования, моделирующих работу ПУО ТБ при угрозах совершения и совершении АНВ на объектах и средствах транспортной инфраструктуры по сетям телефонной связи:

$t_{нд}$ — задержки, связанные с набором номера вызываемого ЗИР;
 $t_о$ — задержки вызова, связанные с ожиданием до момента получения ответа вызываемым ЗИР; $t_{пд}$ — задержки, связанные с прослушиванием передаваемой по сетям телефонной связи информации;
 $t_{здф}$ — задержки, связанные с записью полученной информации согласно установленной форме; $t_{рд}$ — задержки, связанные с принятием решения; $\lambda_{прв}$ — интенсивность потока вызовов, поступающих на дообслуживание в случае прерывания вызова;
 $\lambda_{вых}$ — интенсивность потока обслуженных вызовов;
 $\lambda_{в}$ — интенсивность входного потока вызовов;
 $\lambda_{нобс}$ — интенсивность необслуженного потока вызовов

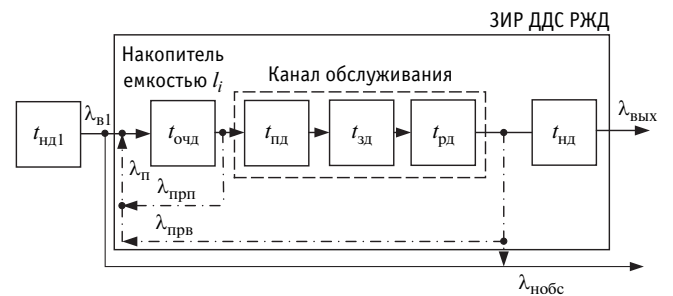


Рис. 8. Модель формирования временных задержек информационного реагирования диспетчеров структурных подразделений железной дороги:

$t_{нд1}$ — задержки, связанные с набором номера вызываемого ЗИР;
 $t_{очд}$ — задержки вызова, связанные с нахождением в очереди на обслуживание до момента получения ответа вызываемым ЗИР;
 $t_{зд}$ — задержки, связанные с записью полученной информации в журнал регистрации; $\lambda_{п}$ — интенсивность повторно поступающего на обслуживание потока вызовов; $\lambda_{прп}$ — интенсивность потока вызовов, поступающих на обслуживание в случае переполнения накопителя; $\lambda_{вых}$ — интенсивность потока обслуженных вызовов;
 $\lambda_{в1}$ — интенсивность входного потока вызовов

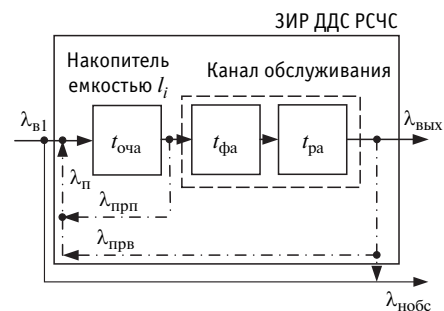


Рис. 9. Модель формирования временных задержек автоматизированного информационного реагирования диспетчерами структурных подразделений РСЧС, не входящих в структуру железнодорожного транспорта

В статье представлены основные теоретические выкладки формализованной и алгоритмизированной модели системы информационного реагирования на угрозы, акты незаконного вмешательства и иные чрезвычайные, нештатные ситуации на ОТИиТС железных дорог.

Следует отметить, что процесс информационного реагирования является сложным для моделирования из-за множества параметров, описывающих принципы функционирования организационной структуры. Данное обстоятельство не позволяет исследовать параметры разработанной модели без значительного упрощения и излишних допущений. Чтобы исключить чрезмерное упрощение модели, а также для ее верификации и интерпретации результатов, в последующем при изучении процессов, происходящих в модели, и параметров ИР пред-

полагается имитационное моделирование в пакете прикладных программ MATLAB.

Дальнейшее исследование разработанной алгоритмической модели процесса реагирования подсистем обеспечения безопасности железнодорожного транспорта позволит получить, проанализировать, интерпретировать результаты моделирования и сформулировать рекомендации по минимизации параметров реагирования.

Исследование выполнено при поддержке средств федерального бюджета в рамках проекта «Разработка концепции цифрового взаимодействия организационной структуры при чрезвычайных ситуациях и обеспечении транспортной безопасности субъектов железнодорожного транспорта».

Литература

1. Об утверждении Положения об организации обеспечения транспортной безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств железнодорожного транспорта в ОАО «РЖД»: приказ ОАО «РЖД» от 03.04.2019 г. № 38. URL: <https://docs.cntd.ru/document/560852000> (дата обращения: 17.02.2022).
2. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: федеральный закон от 21.12.1994 г. № 68 (с изменениями на 03.08.2018 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/9009935> (дата обращения: 17.02.2022).
3. Об утверждении Положения о функциональной подсистеме предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 23.01.2009 г. № 12. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902148736> (дата обращения: 17.02.2022).
4. Сирина Н. Ф., Сисина О. А. Моделирование информационного обмена для случая возникших нештатных и чрезвычайных ситуаций во время перевозочного процесса на железнодорожном транспорте // Вестник УрГУПС. 2020. № 1 (45). С. 58–68. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-1-58-68. ISSN 2079–0392.
5. О Порядке информирования субъектами транспортной инфраструктуры и перевозчиками об угрозах совершения и о совершении актов незаконного вмешательства на объектах транспортной инфраструктуры и транспортных средствах: приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 16.02.2011 г. № 56. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902264643> (дата обращения: 17.02.2022).
6. Об утверждении Регламента взаимодействия подразделений ОАО «РЖД» и перевозчиков в случае возникновения нештатных ситуаций при перевозке пассажиров в поездах дальнего следования на инфраструктуре ОАО «РЖД»: распоряжение ОАО «РЖД» от 09.12.2019 г. № 2780/р. URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-09122019-n-2780r-ob-utverzhenii/> (дата обращения: 17.02.2022).
7. Об оптимизации системы информационного реагирования ОАО «РЖД» на чрезвычайные ситуации: приказ ОАО «РЖД» от 16.01.2008 г. № 6 (в редакции от 01.10.2010 г. № 156). URL:

References

1. On approval of Statement on organization of provision of transport safety on railway infrastructure objects and vehicles in the JSC «RZD» [Ob utverzhenii Polozheniya ob organizatsii obespecheniya transportnoy bezopasnosti ob"ektov transportnoy infrastruktury i transportnykh sredstv zheleznodorozhnogo transporta v OAO «RZhD»]: Order of the JSC «RZD» dated 03.04.2019 No. 38. URL: <https://docs.cntd.ru/document/560852000> (access date: 17.02.2022).
2. On protection of population and territories from emergency situations of natural and technogenic character [O zashhite naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnoy i tekhnogennoy kharakter]: Federal Law dated 21.12.1994 No. 68 (with amendments on 03.08.2018). URL: <http://docs.cntd.ru/document/9009935> (access date: 17.02.2022).
3. On approval of Statement on functional subsystem for prevention and elimination of emergency situations on railway transport as a part of the united state system for prevention and elimination of emergency situations [Ob utverzhenii Polozheniya o funktsional'noy podsysteme preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy na zheleznodorozhnom transporte edinoy gosudarstvennoy sistemy preduprezhdeniya i likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy]: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 23.01.2009 No. 12. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902148736> (access date: 17.02.2022).
4. Sirina N. F., Sisina O. A. Modeling of information exchange in case of emergencies during railway transport process [Modelirovanie informatsionnogo obmena dlya sluchaya voznikshikh neshtatnykh i chrezvychaynykh situatsiy vo vremya perevoznogo protsessna na zheleznodorozhnom transporte] // Herald of USURT. 2020. No. 1 (45). Pp. 58–68. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-1-58-68. ISSN 2079–0392.
5. On Order of informing by subjects of transport infrastructure and carriers about treats of commision and about commissions of unlawful interference acts on objects of transport infrastructure and transport vehicles [O Poryadke informirovaniya sub"ektami transportnoy infrastruktury i perevozhnikami ob ugrozakh soversheniya i o sovershenii aktov nezakonnoy vmeshatel'stva na ob"ektakh transportnoy infrastruktury i transportnykh sredstvakh]: Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 16.02.2011 No. 56. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902264643> (access date: 17.02.2022).
6. On approval of Regulations of interaction between departments of the JSC «RZD» and carriers in condition of occurrence of emergency situations during transportation of passengers in long distance trains on the JSC «RZD» infrastructure [Ob utverzhenii Reglamenta vzaimodeystviya podrazdeleniy OAO «RZhD» i perevozhnikov v sluchae vozniknoveniya neshtatnykh situatsiy pri perevozke passazhiroy v poezdakh dal'nego sledovaniya na infrastrukture OAO «RZhD»]: Order of the JSC «RZD» dated 09.12.2019 No. 2780/r. URL: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-oao-rzhd-ot-09122019-n-2780r-ob-utverzhenii/> (access date: 17.02.2022).
7. On optimization of system for information response of the JSC «RZD» on emergency situations [Ob optimizatsii sistemy informatsionnogo reagirovaniya OAO «RZhD» na chrezvychaynye situatsii]: Order of the JSC

<https://docs.cntd.ru/document/902259095> (дата обращения: 17.02.2022).

8. Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для различных категорий объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта: постановление Правительства Российской Федерации от 08.10.2020 г. № 1633. URL: <http://www.consultant.ru/search/?q=%D0%BE%D1%82+8+%D0%BE%D0%BA%D1%82%D1%8F%D0%B1%D1%80%D1%8F+2020+%D0%B3.+N+1633> (дата обращения: 17.02.2022).
9. Об утверждении требований по обеспечению транспортной безопасности, в том числе требований к антитеррористической защищенности объектов (территорий), учитывающих уровни безопасности для объектов транспортной инфраструктуры железнодорожного транспорта, не подлежащих категорированию: постановление Правительства Российской Федерации от 08.10.2020 г. № 1635. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74665492/> (дата обращения: 17.02.2022).

«RZD» dated 16.01.2008 No. 6 (in edition dated 01.10.2010 No. 156). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902259095> (access date: 17.02.2022).

8. On approval of requirements on provision of transport safety including requirements to anti-terrorist security of objects (territories) considering levels of safety for various categories of objects of railway infrastructure [Ob utverzhdenii trebovaniy po obespecheniyu transportnoy bezopasnosti, v tom chisle trebovaniy k antiterroristicheskoy zashhishhennosti ob'ektov (territoriy), uchityvayushhikh urovni bezopasnosti dlya razlichnykh kategoriy ob'ektov transportnoy infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta]: Order of the Government of the Russian Federation dated 08.10.2020 No. 1633. URL: <http://www.consultant.ru/search/?q=%D0%BE%D1%82+8+%D0%BE%D0%BA%D1%82%D1%8F%D0%B1%D1%80%D1%8F+2020+%D0%B3.+N+1633> (access date: 17.02.2022).
9. On approval of requirements on provision of transport safety including requirements to anti-terrorist security of objects (territories) considering levels of safety for objects of railway infrastructure not subject to categorization [Ob utverzhdenii trebovaniy po obespecheniyu transportnoy bezopasnosti, v tom chisle trebovaniy k antiterroristicheskoy zashhishhennosti ob'ektov (territoriy), uchityvayushhikh urovni bezopasnosti dlya ob'ektov transportnoy infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta, ne podlezhashhikh kategorirovaniyu]: Order of the Government of the Russian Federation dated 08.10.2020 No. 1635. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74665492/> (access date: 17.02.2022).

Объем статьи 0,9 авторских листа

УДК 656.253

Дмитрий Викторович Ефанов, доктор технических наук, доцент, профессор Высшей школы транспорта Института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), Санкт-Петербург, профессор кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Артем Валерьевич Пашуков, аспирант, старший преподаватель кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

СИНТЕЗ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ НАПОЛЬНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ С ОБНАРУЖЕНИЕМ НЕИСПРАВНОСТЕЙ НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

Dmitriy Viktorovich Efanov, DSc in Engineering, Professor, Higher School of Transport, Institute of Mechanical Engineering, Materials and Transport, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), St. Petersburg, Professor, Railway Automation, Remote Control and Communication Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Artem Valeryevich Pashukov, postgraduate student, Senior Lecturer, Railway Automation, Remote Control and Communication Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Synthesis of control devices for wayside technological equipment of railway automation with fault detection on FPGA

Аннотация

Описаны особенности синтеза устройств управления напольным технологическим оборудованием сигнализации, централизации и блокировки на программируемых логических интегральных схемах. При этом рассмотрен простейший пример реализации схемы управления маневровым светофором, демонстрирующий саму методику синтеза. Важнейшим этапом является определение всех взаимодействующих объектов, входных и выходных данных, состояний и условий перехода между состояниями. На основании этой исходной информации формируется граф переходов. Далее выбирается функциональный базис для реализации (в рассматриваемом случае это программируемые логические интегральные схемы), а затем — способ кодирования для защиты автомата в процессе функционирования. С целью реализации надежных и безопасных устройств применяют известные методы обеспечения данных свойств для технических объектов. Предложенная методика позволяет не только синтезировать устройства управления объектами автоматизации, но и реализовывать программные средства их рабочего и тестового диагностирования.

Ключевые слова: железнодорожная автоматика и телемеханика, сигнализация, централизация и блокировка, напольное технологическое оборудование, маневровый светофор, схема управления, обнаружение неисправностей и ошибок в вычислениях, взвешенный код с суммированием.

Abstract

The paper describes features of synthesis of control devices for wayside technological equipment of signalling, interlocking and block systems on field-programmable gate array (FPGA). In the work the authors consider the simplest example of implementation of a shunting light signal control circuit that demonstrates the synthesis technique. The most important stage is the definition of all interacting objects, input and output data, states and conditions of transition between states. Based on this initial information, a transition graph is formed. Next, a functional basis for implementation is selected (in this case, these are FPGA), and then a coding method to protect the automaton in operation is determined. In order to implement reliable and secure devices, well-known methods are used to ensure these properties for technical objects. The technique allows not only synthesizing control devices for automation objects, but also implementing software tools for their operation and test diagnostics.

Keywords: railway automation and remote control, signalling, interlocking and block system, wayside technological equipment, shunting light signal, control circuit, detection of errors, weight-based sum code.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-31-41

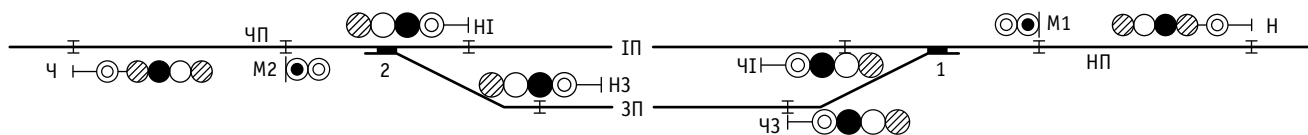


Рис. 1. Одноточный план произвольной станции

ВВЕДЕНИЕ

Для безопасного управления движением поездов на железных дорогах применяются устройства и системы железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) [1]. Независимо от того, что эти системы могут быть созданы на любой элементной базе, они имеют единые принципы построения [2–4]. Системы ЖАТ включают в себя вполне конкретный набор напольного технологического оборудования, определяемый топологией станции (или конфигурацией перегона), а также постоянную часть, реализующую схемы управления и контроля напольным технологическим оборудованием [5]. Несмотря на скачок в развитии информационных и компьютерных технологий, произошедший с момента разработки первых систем электрической централизации (ЭЦ) стрелок и сигналов, возникших в нашей стране почти век назад, сама логика реализации схемных решений фактически никак не изменилась (разве что несколько модифицировалась в соответствии с типом применяемой системы ЭЦ).

Схемные решения ЖАТ реализуют цепочки логических условий и поэтому могут быть синтезированы по ним на любой элементной базе [6, 7]. В зависимости от выбранной элементной базы будут определяться требования к надежности и функциональной безопасности конечных устройств. Для синтеза схемных решений достаточно иметь полное множество входных данных (а это как раз состояния напольного технологического оборудования и технических средств воздействия на них), полное множество выходных состояний (исправных, работоспособных, предотказных, неисправных защитных и неисправных опасных), а также перечень логических условий для перехода из состояния в состояние [8].

В [7] используется язык регулярных выражений для описания работы схем ЭЦ на релейной основе. Развивая данную работу и данное направление, поставим следующую задачу. Требуется разработать методику синтеза схемных решений ЖАТ для управления напольным технологическим оборудованием посредством использования программируемой элементной базы с возможностью обнаружения неисправностей. При этом будем исходить из действующей концепции обеспечения надежности и безопасности микроэлектронных ЖАТ: одиночные дефекты аппаратных или программных средств не должны приводить к накоплению неисправностей, должны обнаруживаться и блокироваться при рабочих и тестовых воздействиях до появления последующих дефектов [2]. В качестве примера (без нарушения общности) рассмотрим синтез схемных решений ЖАТ на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС)¹ [9]. ПЛИС широко

применяют при синтезе схем автоматики для автомобильного и авиационного транспорта [10–12]. Их можно использовать и при синтезе схемных решений ЖАТ. Преимуществами ПЛИС перед другими технологиями являются возможность выбора устройств с низким потреблением за счет технологической энергонезависимой памяти, высокая надежность относительно одиночных сбоев, высокая системная интеграция [13]. Данная элементная база активно развивается и производится в промышленных масштабах.

СИНТЕЗ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НАПОЛЬНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Для синтеза устройства управления требуются логическое описание его работы и задание работы устройства в виде конечного автомата (КА) [7]. Рассмотрим простейший пример — получение конечного автомата для маневрового светофора, например светофора М1 или М2 на произвольной промежуточной станции, изображенной на рис. 1.

Для рассматриваемого объекта управления вводится множество входных параметров и задается вектор входных параметров. В данном случае он следующий: $X = \langle x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6 x_7 x_8 \rangle$, где x_1 — свобода стрелочной секции (0 — занята, 1 — свободна); x_2 — свобода бесстрелочных участков и приемоотправочных путей, входящих в маршрут (0 — заняты, 1 — свободны); x_3 — замыкание стрелочных секций (0 — не замкнуты, 1 — замкнуты); x_4 — замкнутость бесстрелочных участков и приемоотправочных путей (0 — не замкнуты, 1 — замкнуты); x_5 — занятость участка пути перед светофором (0 — занят, 1 — свободен); x_6 — контроль запрещающего показания (0 — контроля нет, 1 — контроль есть); x_7 — задание маршрута на свободный путь (0 — маршрут не задан, 1 — маршрут задан); x_8 — задание маршрута на занятый путь (0 — маршрут не задан, 1 — маршрут задан).

Состояния рассматриваемого объекта перечислены в табл. 1, а конечный автомат в виде графа переходов показан на рис. 2.

Фактически наличие КА — это главное условие для синтеза устройства в любой элементной базе. Перейдем к рассмотрению синтеза устройства в базе ПЛИС.

РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ПЛИС

Необходимо отметить, что выбор данной элементной базы не является новым в отрасли. Например, в работе [14] обсуждаются общие вопросы и возможности использования ПЛИС при синтезе логических схем ЖАТ, а в [15] на ПЛИС реализован аналог реле с задержкой на отключение. В [16, 17] обсуждаются вопросы синтеза устройств автоматики на ПЛИС без использования кодовой защиты данных. В [18, 19] приводятся особенности применяемого на железных дорогах Чехии (в частности, на железнодорожных переездах) оборудования централизации, которое реализовано на основе ПЛИС.

¹ Сюда включаются различные типы ПЛИС: PAL (Programmable Array Logic), GAL (Generic Array Logic), CPLD (Complex Programmable Logic Device) и FPGA (Field-Programmable Gate Array).

Таблица 1

Состояния маневрового светофора

Состояние	Вектор параметров < $x_1x_2x_3x_4x_5x_6x_7x_8$ >	Обозначение множества векторов параметров X_i	Значения выходного вектора < z_2z_1 >	Обозначение выходного вектора, Z_i
Q_1 — светофор закрыт	$\sim \sim 001100$ $\sim \sim 011100$ $\sim \sim 101100$	X_1	10	Z_1
Q_2 — светофор открыт	$1111 \sim \sim 10$ $1 \sim 11 \sim \sim 01$	X_2	01	Z_2
Q_3 — светофор погашен	$\sim \sim 001000$ $\sim \sim 011000$ $\sim \sim 101000$	X_3	00	Z_3
Q_4 — защитное	Ω_i^*	X_4	10 00	Z_4

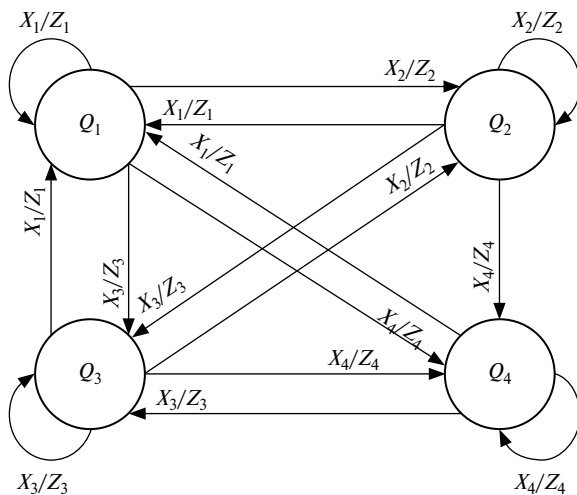


Рис. 2. Граф переходов
схемы управления маневровым светофором

Существует несколько вариантов реализации КА на ПЛИС [20]. Общий алгоритм с помощью языка программирования System Verilog включает в себя следующие шаги [21].

1. Объявляются все входные и выходные переменные, соответствующие входным параметрам и выходам объекта синтеза.
2. Объявляются дополнительные переменные при их наличии. Такие переменные позволяют сократить написание условий переходов из одного состояния в другое. Отметим, что данный шаг не является обязательным.
3. Дополнительным переменным присваиваются значения, соответствующие условиям переходов из одного состояния в другое. Этот шаг будет отсутствовать, если предыдущий шаг был пропущен.
4. Объявляются все состояния КА в двоичном виде, при этом неважно, какому состоянию какой двоичный код будет соответствовать.
5. Дается описание состояний и условий переходов между ними. На этом этапе указывается состояние, в которое должно перейти устройство при конкретном условии. Помимо условий

указываются также требуемые значения выходов, которые должны наблюдаться при переходе в соответствующее состояние.

Для эксперимента мы использовали наиболее простую программируемую схему ALTERA MAX II EPM240T100C 4² [22]. В результате синтеза КА с помощью программного метода схема занимает 7 логических ячеек и 11 портов входа/выхода. Данный способ задания автомата является оптимальным, так как минимизация функций и переходов между состояниями происходит автоматически.

При синтезе устройства на основе ПЛИС для защиты от неисправностей будем использовать кодирование, дающее малую вносимую аппаратную избыточность [23, 24].

Первый вариант применения кодирования заключается в проектировании блока контрольной логики в составе схемы встроенного контроля (СВК). Пользуясь известным алгоритмом из [8], приведем последовательно шаги по реализации устройства.

КА имеет четыре состояния, закодированные следующими значениями: $Q_1 = 00$, $Q_2 = 01$, $Q_3 = 10$ и $Q_4 = 11$.

Для упрощения задачи за входные векторы будем принимать условия переходов из одного состояния в другое. Каждое из условий запишем в виде функции алгебры логики:

$$a_1 = \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_5} \overline{x_6} \overline{x_7} \overline{x_8} \vee \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_5} \overline{x_6} \overline{x_7} \overline{x_8} \vee \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_5} \overline{x_6} \overline{x_7} \overline{x_8};$$

$$a_2 = \overline{x_1} \overline{x_2} \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_7} \overline{x_8} \vee \overline{x_1} \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_7} \overline{x_8};$$

$$a_3 = \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_5} \overline{x_6} \overline{x_7} \overline{x_8} \vee \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_5} \overline{x_6} \overline{x_7} \overline{x_8} \vee \overline{x_3} \overline{x_4} \overline{x_5} \overline{x_6} \overline{x_7} \overline{x_8};$$

$$a_4 = a_1 a_2 \vee a_1 a_3 \vee a_2 a_3 \vee a_1 a_2 a_3.$$

Процесс синтеза будем осуществлять в графическом редакторе Quartus [25] на RS-триггерах. Поэтому все дополнительные функции вычислим последовательно, и соответственно функцию-условие a_4 можно не задавать в явном виде.

²Данная схема является CPLD и сочетает архитектурные решения PAL и FPGA. Ключевое отличие CPLD от FPGA состоит в типе памяти, в котором хранится программа: в CPLD это EEPROM или FLASH, а в FPGA это SDRAM. Для FPGA обязательно требуется внешнее хранилище программы. CPLD же сразу после перезапуска начинает работать.

Таблица 2

Минимизированная таблица переходов и выходов КА

Q	a ₁ a ₂ a ₃ a ₄				A*
	0001	0010	0100	1000	
1	4,10	3,00	2,01	(1),10	~
2	4,10	3,00	(2),01	1,10	~
3	4,10	(3),00	2,01	1,10	~
4	(4),10	3,00	~	1,10	~

Составим и минимизируем таблицу переходов и выходов для КА, приведенного на рис. 2 (табл. 2). При входном векторе X_i только одна из дополнительных функций a_i будет принимать значение 1, поэтому все векторы, не удовлетворяющие этому условию, обозначим A*. Также оговоримся, что не существует такого вектора X_i, при котором значение 1 принимает больше одного элемента в векторе A_i, а значит, система не может перейти в какое-либо состояние, в котором более одного элемента a_i принимают значение 1. Затем закодируем таблицу переходов (табл. 3) и таблицу выходов (табл. 4).

После кодирования таблицы переходов и выходов вычислим функции включения элементов памяти по правилам, следующим из логики работы RS-триггера при переключении из одного состояния в другое в дискретные моменты времени t-1 и t [8]. Эти правила приведены в табл. 5.

Используя правила, изложенные в табл. 5, построим таблицу значений S- и R-входов на всех входных наборах (табл. 6). Неиспользуемые векторы, соответствующие пересечениям A* и y_i, обозначим как A**.

Выпишем функции из таблицы истинности, приняв все неопределенные состояния как 0:

$$Y_{S1} = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_1 \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_1;$$

$$Y_{R1} = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_1 y_2 \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_1;$$

$$Y_{S2} = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_1 y_2 \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_2;$$

$$Y_{R2} = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_1 y_2 \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_2 \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_2;$$

$$z_1 = \overline{a_1 a_2 a_3};$$

$$z_2 = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_1 \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4} y_1 y_2.$$

Для контроля вычислений используем взвешенные коды с суммированием, описанные в [26, 27]. Их выбор обусловлен низкой избыточностью и возможностью подбора с помощью весовых коэффициентов для установления кодами определенных характеристик.

Контрольные функции получим с помощью WS7(4,3)-кода³ с весовыми коэффициентами [w_i] = [w₄, w₃, w₂, w₁] = [4, 3, 2, 1]. Данный код позволяет обнаружить все одиночные ошибки

³Здесь число после WS (7) — значение модуля счета, числа (4,3) — значения длин информационных и контрольных векторов.

Таблица 3

Кодированная таблица переходов КА

Q	a ₁ a ₂ a ₃ a ₄				A*
	0001	0010	0100	1000	
00	11	10	01	(00)	~
01	11	10	(01)	00	~
10	11	(10)	01	00	~
11	(11)	10	~	00	~

Таблица 4

Кодированная таблица выходов КА

Q	a ₁ a ₂ a ₃ a ₄				A*
	0001	0010	0100	1000	
00	10	00	01	10	~
01	10	00	01	10	~
10	10	00	01	10	~
11	10	00	~	10	~

Таблица 5

Таблица определения значений функций Y_S и Y_R

y(t-1)	y(t)	
	0	1
0	0~	10
1	01	~0

Таблица 6

Таблица истинности функций включения Y_S- и Y_R-триггеров

Номер состояния	a ₁ a ₂ a ₃ a ₄ y ₁ y ₂	Y _{S1}	Y _{R1}	Y _{S2}	Y _{R2}	z ₁	z ₂
4	000100	1	0	1	0	1	0
5	000101	1	0	~	0	1	0
6	000110	~	0	0	1	1	0
7	000111	~	0	~	0	1	0
8	001000	1	0	0	~	0	0
9	001001	1	0	0	1	0	0
10	001010	~	0	0	~	0	0
11	001011	~	0	0	1	0	0
16	010000	0	~	1	0	0	1
17	010001	0	~	~	0	0	1
18	010010	0	1	1	0	0	1
19	010011	~	~	~	~	~	~
32	100000	0	~	0	~	1	0
33	100001	0	~	0	1	1	0
34	100010	0	1	0	~	1	0
35	100011	0	1	0	1	1	0
-	A**	~	~	~	~	~	~

Таблица 7

Значения разрядов кодовых слов

Номер состояния	$a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2$	Y_{S1}	Y_{R1}	Y_{S2}	Y_{R2}	W	$W(\text{mod}7)$	g_1	g_2	g_3
4	000100	1	0	1	0	6	6	1	1	0
5	000101	1	0	0	0	4	4	1	0	0
6	000110	0	0	0	1	1	1	0	0	1
7	000111	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	001000	1	0	0	0	4	4	1	0	0
9	001001	1	0	0	1	5	5	1	0	1
10	001010	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	001011	0	0	0	1	1	1	0	0	1
16	010000	0	0	1	0	2	2	0	1	0
17	010001	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	010010	0	1	1	0	5	5	1	0	1
19	010011	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	100000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	100001	0	0	0	1	1	1	0	0	1
34	100010	0	1	0	0	3	3	0	1	1
35	100011	0	1	0	1	4	4	1	0	0
–	A^{**}	0	0	0	0	0	0	0	0	0

на выходах и большинство двукратных. Табл. 7 представляет собой таблицу истинности для контрольных функций $g(a, y)$.

Контрольные функции примут вид:

$$g_1 = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1} \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1} \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2} \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2};$$

$$g_2 = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2} \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2} \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2};$$

$$g_3 = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2} \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2} \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_2} \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2} \vee \overline{a_1 a_2 a_3 a_4 y_1 y_2}.$$

Обозначим $Y_{S1} = f_1, Y_{R1} = f_2, Y_{S2} = f_3, Y_{R2} = f_4$. Найдем функции кодера с помощью табл. 8:

$$g_1^* = f_1 \vee f_2 f_3 \vee f_2 f_4; g_2^* = \overline{f_2} f_3 \vee f_2 \overline{f_3} f_4; g_3^* = \overline{f_2} f_4 \vee f_2 \overline{f_4}.$$

На рис. 3 изображен сам конечный автомат на RS-триггерах, а на рис. 4 — устройство контроля на основе $WS7(4,3)$ -кода.

Так как выше было отмечено, что все неопределенные состояния для нахождения функций элементов памяти и выходного вектора приняты как 0, то соответственно возрастает емкость синтезированной схемы.

При реализации КА для маневрового светофора на МАХ II нам потребовалось 17 логических ячеек и 11 портов ввода/вывода вместо 7 логических ячеек и 11 портов ввода/вывода. Емкость устройства контроля также будет зависеть от способов нахождения функций. В данном случае использовано 15 ячеек и 12 портов ввода/вывода. Применение взвешенных кодов с суммированием вносит меньшую избыточность по сравнению с методом дублирования [23, 24].

Приведенный способ синтеза КА с обнаружением неисправностей подразумевает наличие внешней СВК. Альтернативный вариант — кодирование состояний на этапе синтеза.

Таблица 8

Функции кодера

Номер строки	$f_1 f_2 f_3 f_4$	g_1^*	g_2^*	g_3^*
0	0000	0	0	0
1	0001	0	0	1
2	0010	0	1	0
3	0011	~	~	~
4	0100	0	1	1
5	0101	1	0	0
6	0110	1	0	1
7	0111	~	~	~
8	1000	1	0	0
9	1001	1	0	1
10	1010	1	1	0
11	1011	~	~	~
12	1100	~	~	~
13	1101	~	~	~
14	1110	~	~	~
15	1111	~	~	~

При использовании второго варианта кодирования присвоим каждому состоянию для наглядности кодовые векторы $WS3(3,2)$ -кода с весовыми коэффициентами $w_i = [3, 2, 1]$. В итоге получим следующие закодированные состояния: $Q_1 = 00000; Q_2 = 01010; Q_3 = 10101; Q_4 = 11100$. Выбраны не все кодовые слова $WS3(3,2)$ -кода, а половина, при этом они подобраны таким образом, что позволяют обнаруживать не только одиночные искажения, но и большинство двукратных. Затем в программном коде в части кодирования состояний присваиваются новые закодированные значения (прописывается часть программного кода, отвечающая за кодирование состояний).

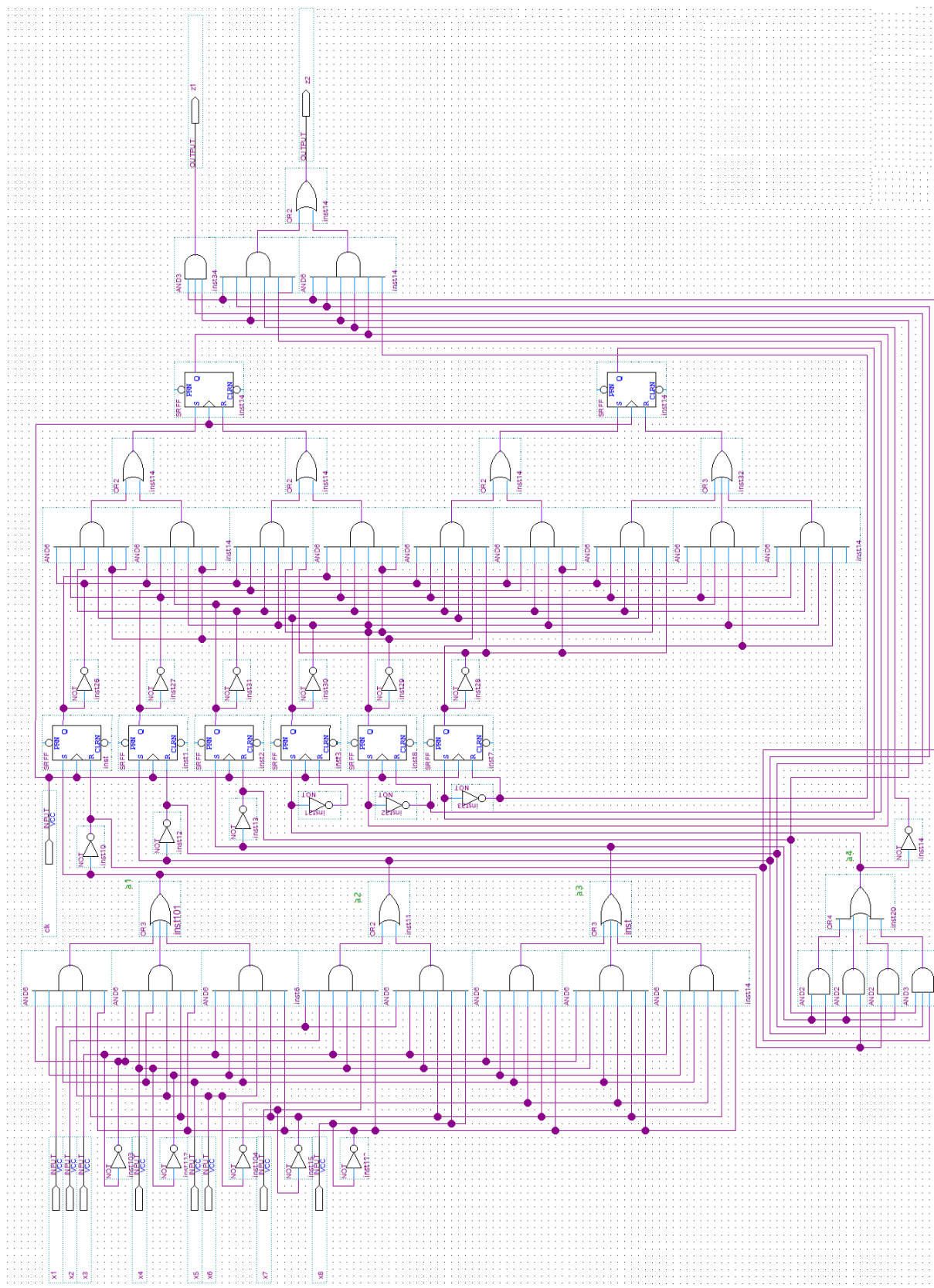


Рис. 3. КА для управления маневровым светофором

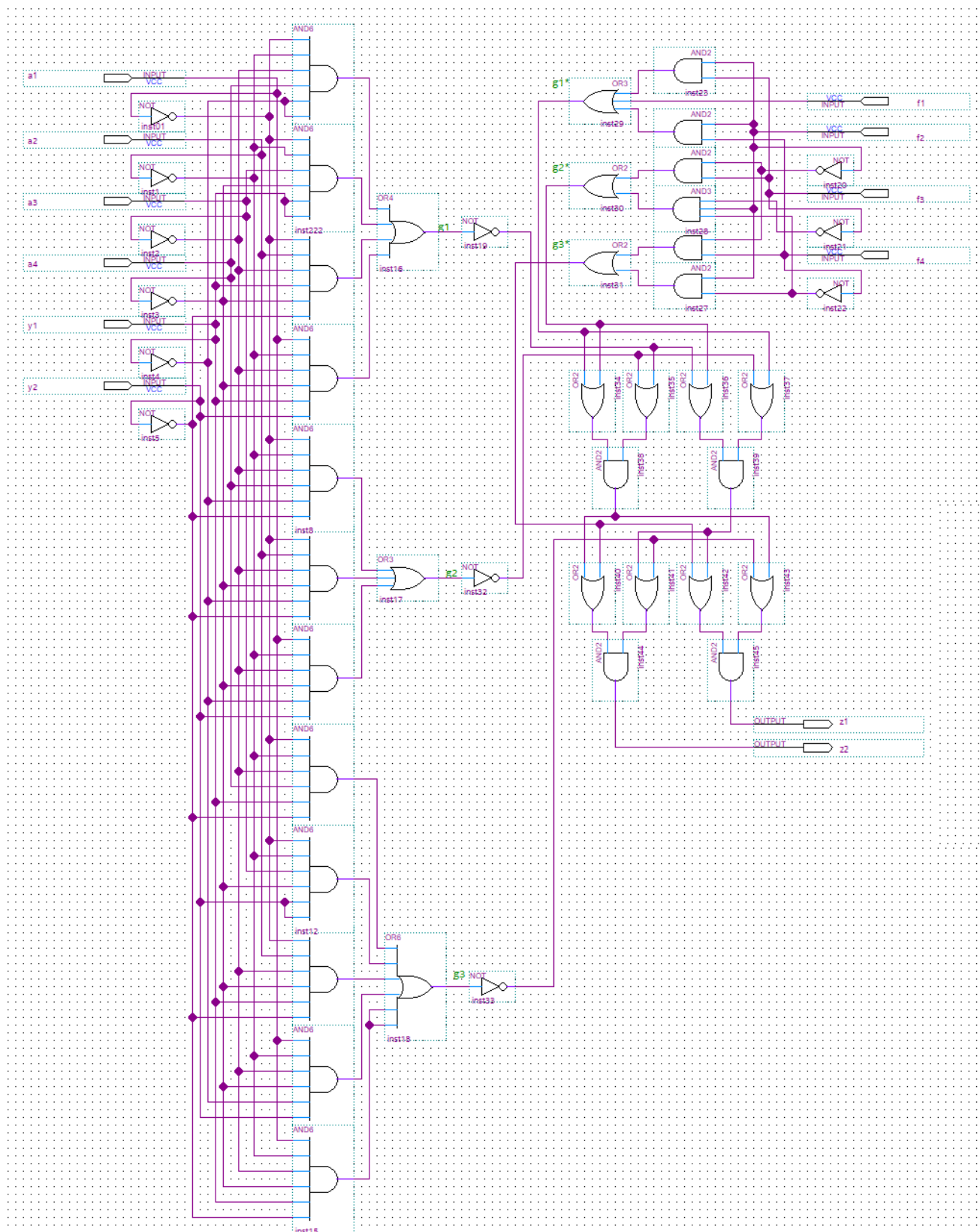


Рис. 4. Устройство контроля КА для управления маневровым светофором

Для наглядности по аналогии со способом, описанным выше, синтезируем КА на RS -триггерах, при этом в разделе кодирования таблицы переходов и выходов будем использовать состояния, представленные ранее.

Для сокращения расчетов введем дополнительные переменные, из которых будут составляться функции элементов памяти и др.:

$$b_1 = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4}; b_2 = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4}; b_3 = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4};$$

$$b_4 = \overline{a_1 a_2 a_3 a_4}; b_5 = \overline{y_1 y_2 y_3 y_4 y_5}; b_6 = \overline{y_1 y_2 y_3 y_4 y_5};$$

$$b_7 = \overline{y_1 y_2 y_3 y_4 y_5}; b_8 = \overline{y_1 y_2 y_3 y_4 y_5}.$$

Тогда все остальные функции примут вид:

$$Y_{S1} = b_1 b_5 \vee b_1 b_6 \vee b_2 b_5 \vee b_2 b_6; Y_{R1} = b_3 b_7 \vee b_4 b_7 \vee b_4 b_8;$$

$$Y_{S2} = b_1 b_5 \vee b_1 b_7 \vee b_3 b_5 \vee b_3 b_7; Y_{R2} = b_2 b_6 \vee b_2 b_8 \vee b_4 b_6 \vee b_4 b_8;$$

$$Y_{S3} = b_1 b_5 \vee b_1 b_6 \vee b_2 b_6 \vee b_2 b_5; Y_{R3} = b_3 b_7 \vee b_4 b_7 \vee b_4 b_8;$$

$$Y_{S4} = b_3 b_5 \vee b_3 b_7; Y_{R4} = b_1 b_6 \vee b_2 b_6 \vee b_4 b_6;$$

$$Y_{S5} = b_2 b_5 \vee b_2 b_6 \vee b_2 b_8; Y_{R5} = b_1 b_7 \vee b_3 b_7 \vee b_4 b_7;$$

$$z_1 = b_1 b_5 \vee b_1 b_6 \vee b_1 b_7 \vee b_1 b_8 \vee b_4 b_5 \vee b_4 b_6 \vee b_4 b_7 \vee b_4 b_8;$$

$$z_2 = b_3 b_5 \vee b_3 b_6 \vee b_3 b_7.$$

КА, синтезированный по заданным функциям, представлен на рис. 5. Его схема занимает 43 логических ячейки и 11 портов ввода/вывода выбранного элементного базиса.

На рис. 6 приведена в графическом виде симуляция работы маневрового светофора для следующей цепочки переходов: $Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow Q_3 \rightarrow Q_4 \rightarrow Q_1$. При этом сигнал clk служит для синхронизации всего устройства, переход в новое состояние осуществляется по заднему фронту синхронизирующего импульса.

На рис. 6 выходной вектор Z принимает значения $Z = [z_2 z_1]$. Начальное значение $[00]$ соответствует моменту включения устройства до получения первого синхронизирующего импульса. При получении первого импульса система идентифицирует свое состояние как Q_1 (горит запрещающее показание). При получении сигнала, соответствующего условию перехода в другое состояние, система при последующем синхронизирующем импульсе переходит в состояние Q_2 (горит разрешающее показание) и т.д. При возникновении какой-либо неис-

правности система переходит в защитное состояние Q_4 , в котором остается до устранения неисправности (данное условие требуется выполнять в соответствии с принципами обеспечения безопасности функционирования устройств ЖАТ [6, 7]).

Отметим еще раз, что оба рассмотренных способа позволяют обнаружить все одиночные и большинство двукратных ошибок. При этом их можно применять одновременно с несущественным увеличением избыточности, что позволяет значительно повысить помехозащищенность КА.

Далее при реализации устройств управления напольным технологическим оборудованием используются известные методы достижения требуемых показателей надежности и безопасности [6, 8, 28–30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование ПЛИС при синтезе устройств управления напольным технологическим оборудованием вполне перспективно, а процедура самого синтеза проста. Наиболее сложным аспектом является полное описание логических условий функционирования конкретного объекта ЖАТ либо же полной группы функционирующих совместно устройств и соответственно последующее формирование графа переходов. На данном этапе важно провести тестирование и верификацию для исключения системных ошибок. Наличие графа переходов уже позволяет выбрать способ кодирования для защиты синтезируемого автомата от неисправностей и ошибок в вычислениях и реализовать его в выбранном элементном базисе (в нашем случае — в базисе ПЛИС).

Отметим также, что множества состояний КА для напольных технологических объектов можно уточнять, внося в них и предотказные состояния, что позволит проводить процедуру самодиагностирования и индикации переходов без внешних средств технического диагностирования. Это потребует расширения и множества входных и выходных данных. Дальнейшие исследования в данной предметной области могут вестись как раз в этом направлении.

Саму систему управления можно собрать на ПЛИС как конструктор (или пазл), перечислив типовые варианты путевого развития и типовые функциональные элементы для управления движением поездов [31]. Данный процесс может быть автоматизирован по аналогии с процессами проектирования средств ЖАТ [32].

Представленная в статье методика синтеза устройств ЖАТ на ПЛИС может использоваться не только для реализации самих устройств управления, но сами КА могут быть реализованы в программном виде в средствах технического диагностирования и мониторинга объектов ЖАТ для их рабочего диагностирования и тестирования [33].

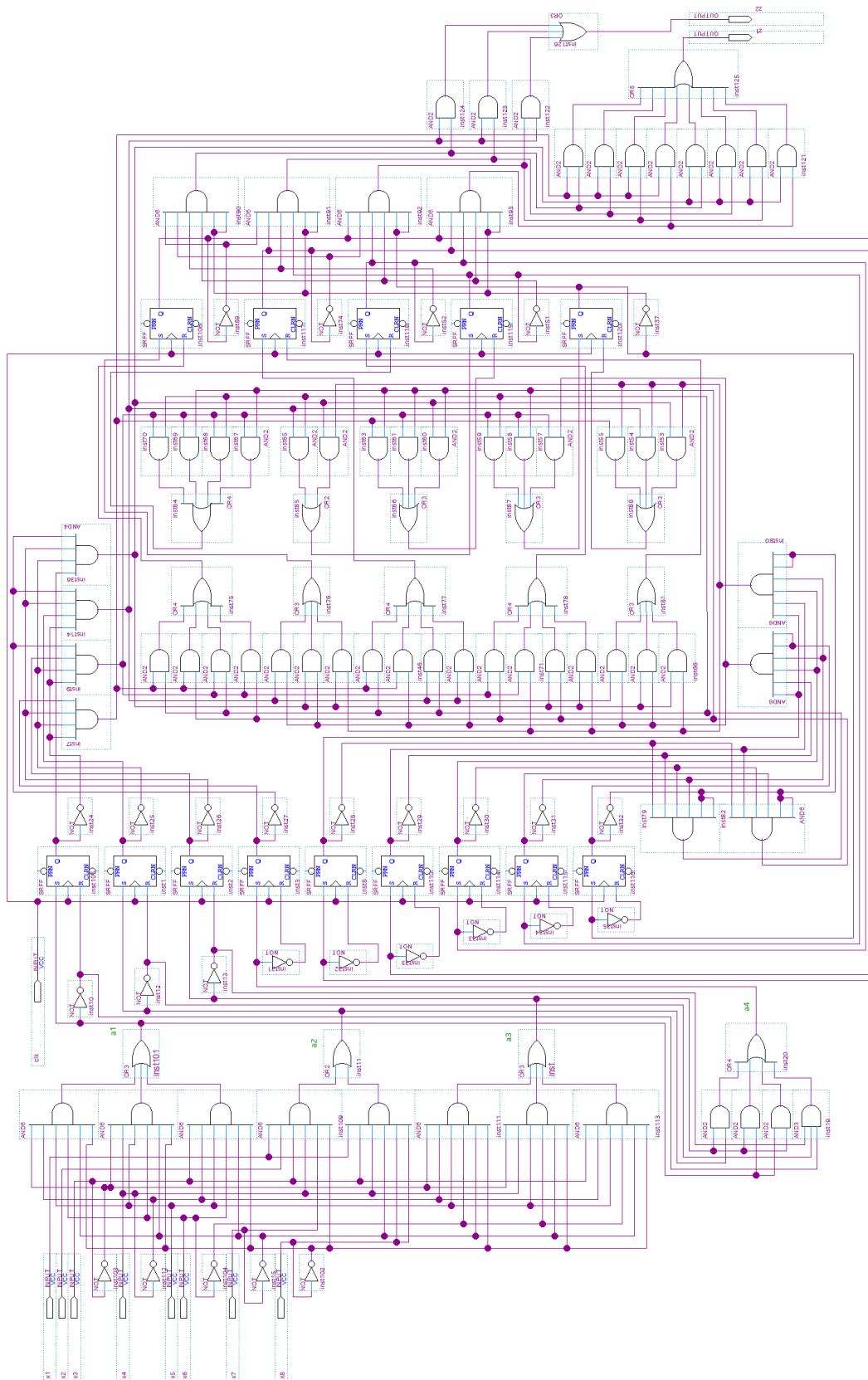


Рис. 5. КА с обнаружением неисправностей для управления маневровым светофором

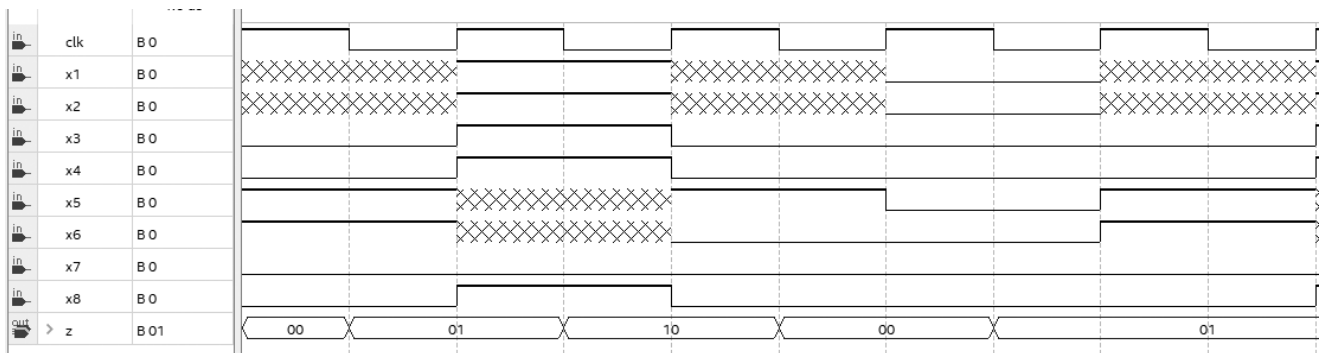


Рис. 6. Симуляция работы КА, осуществляющего управление маневровым светофором

Литература

1. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking / 3rd edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. 552 p.
2. Микропроцессорные системы централизации / Вл. В. Сапожников, В. А. Кононов, С. А. Куренков [и др.]. Москва : УМЦ ЖДТ, 2008. 398 с.
3. Кононов В. А., Лыков А. А., Никитин А. Б. Основы проектирования электрической централизации промежуточных станций. Москва : УМЦ ЖДТ, 2013. 348 с.
4. Бочков К. А., Коврига А. Н., Харлап С. Н. Микропроцессорные системы автоматики на железнодорожном транспорте. Гомель : БелГУТ, 2013. 254 с.
5. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики / В. В. Сапожников, И. М. Кокурин, В. А. Кононов [и др.]. Москва : УМЦ ЖДТ, 2006. 247 с.
6. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Х. А. Христов, Д. В. Гавзов; под ред. Вл. В. Сапожникова. Москва : Транспорт, 1995. 272 с.
7. Сапожников Вл. В. Синтез систем управления движением поездов на железнодорожных станциях с исключением опасных отказов. Москва : Наука, 2021. 229 с.
8. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Основы теории надежности и технической диагностики. Санкт-Петербург : Лань, 2019. 588 с.
9. Maxfield C. The Design Warrior's Guide to FPGA's / 1st edition. Devices, Tools and Flows. Boston : Newnes, 2004. 542 p.
10. Lange M., Dewey T. Achieving Quality and Traceability in FPGA/ASIC Flows for DO-254 Aviation Projects // IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 1–8 March 2008. DOI: 10.1109/AERO.2008.4526687.
11. Hidden Faults in FPGA-Built Digital Components of Safety-Related Systems / O. Drozd, V. Antoniuk, V. Nikul, M. Drozd // Proceedings of the 14th International Conference TCSET'2018, Lviv-Slavsko, Ukraine, 2018. Pp. 805–809. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336320.
12. Bhavani M., Devi D. A. Design of Smart Monitor for Automobiles Using FPGA Based Data Logger // International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 17–19 July 2019. DOI: 10.1109/ICCES.45898.2019.9002034.
13. Пикле П. Ключевые особенности ПЛИС для взаимосвязанного мира // Компоненты и технологии. 2014. № 12. С. 10–11. ISSN 2079–6811.
14. Гладков И. В. Реализация алгоритмов электрической централизации на базе программируемых логических интегральных схем // Известия ПГУПС. 2008. № 4. С. 99–109. ISSN 1815–588X.
15. Кабечкий А. Г., Марков Д. С. Методы и инструментальные средства построения логических устройств электрической централизации на базе программируемых логических интегральных схем // Известия ПГУПС. 2010. № 2. С. 168–173. ISSN 1815–588X.

References

1. Theeg G., Vlasenko S. Railway Signalling & Interlocking / 3rd edition. Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020. 552 p.
2. Microprocessor interlocking systems [Mikroprotsessornye sistemy tseentralizatsii] / Vl. V. Sapozhnikov, V. A. Kononov, S. A. Kurenkov [et al.]. Moscow : UMTs ZhDT, 2008. 398 p.
3. Kononov V. A., Lykov A. A., Nikitin A. B. Basics of design of electric interlocking for intermediate stations [Osnovy proektirovaniya elektricheskoy tseentralizatsii promezhutochnykh stantsiy]. Moscow : UMTs ZhDT, 2013. 348 p.
4. Bochkov K. A., Kovriga A. N., Kharlap S. N. Microprocessor systems of railway automation [Mikroprotsessornye sistemy avtomatiki na zheleznodorozhnom transporte]. Gornel : BSUT, 2013. 254 p.
5. Operational basics of automation and telemechanics [Ekspluatatsionnye osnovy avtomatiki i telemekhaniki] / V. V. Sapozhnikov, I. M. Kokurin, V. A. Kononov [et al.]. Moscow : UMTs ZhDT, 2006. 247 p.
6. Methods for creation of safe microelectronic systems of railway automation [Metody postroeniya bezopasnykh mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki] / V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov, Kh. A. Khristov, D. V. Gavzov; ed. by Vl. V. Sapozhnikov. Moscow : Transport, 1995. 272 p.
7. Sapozhnikov Vl. V. Synthesis of traffic control systems at railway stations with exception for dangerous failures [Sintez sistem upravleniya dvizheniem poezdov na zheleznodorozhnykh stantsiyakh s isklucheniem opasnykh otkazov]. Moscow : Science, 2021. 229 p.
8. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Efanov D. V. Basics of reliability theory and technical diagnostics [Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki]. St. Petersburg : Lan', 2019. 588 p.
9. Maxfield C. The Design Warrior's Guide to FPGA's / 1st edition. Devices, Tools and Flows. Boston : Newnes, 2004. 542 p.
10. Lange M., Dewey T. Achieving Quality and Traceability in FPGA/ASIC Flows for DO-254 Aviation Projects // IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 1–8 March 2008. DOI: 10.1109/AERO.2008.4526687.
11. Hidden Faults in FPGA-Built Digital Components of Safety-Related Systems / O. Drozd, V. Antoniuk, V. Nikul, M. Drozd // Proceedings of the 14th International Conference TCSET'2018, Lviv-Slavsko, Ukraine, 2018. Pp. 805–809. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336320.
12. Bhavani M., Devi D. A. Design of Smart Monitor for Automobiles Using FPGA Based Data Logger // International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES), Coimbatore, India, 17–19 July 2019. DOI: 10.1109/ICCES.45898.2019.9002034.
13. Pikle P. Key features of FPLD for interconnected world [Klyucheveye osobennosti PLIS dlya vzaimosvyazannogo mira] // Components and technologies. 2014. No. 12. Pp. 10–11. ISSN 2079–6811.
14. Gladkov I. V. Realization of algorithms of electric interlocking on the basis of programmable logic integrated circuits [Realizatsiya algoritmov elektricheskoy tseentralizatsii na baze programmruemykh logicheskikh integral'nykh skhem] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2008. No. 4. Pp. 99–109. ISSN 1815–588X.
15. Kabetskiy A. G., Markov D. S. Methods and tools for creation of logic interlocking devices on the basis of programmable logic integrated circuits [Metody i instrumental'nye sredstva postroeniya logicheskikh ustroystv

16. Пашуков А. В. Синтез устройств управления объектами напольной автоматизации железнодорожного транспорта на программируемых логических интегральных схемах // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2021. № 1. С. 61–69. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-61-69. ISSN 2078–7707.
17. Пашуков А. В. Синтез устройств управления стрелочным переводом на программируемых логических интегральных схемах // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI международной научно-практической конференции : в 2-х ч. Ч. 1. Гомель : БелГУТ, 2021. С. 201–203.
18. Dobiáš R., Kubátová H. FPGA Based Design of Railway's Interlocking Equipment // Proceedings of EUROMICRO Symposium on Digital System Design, Rennes, France, 2004. Pp. 467–473. DOI: 10.1109/DSD.2004.1333312.
19. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip. New York : IGI Global, 2011. 578 p.
20. Cummings C. E. The Fundamentals of Efficient Synthesizable Finite State Machine Design Using NC–Verilog and BuildGates // International Cadence conference, San Jose, California, 16–18 September 2002. 27 p.
21. Проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах / В. И. Хаханов, И. В. Хаханова, Е. И. Литвинова, О. А. Гузь. Харьков : ХНУРЭ, 2010. 528 с.
22. MAX II Device Handbook. Vol. 1. Altera Corporation, 2006. 102 p.
23. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 1. Классические коды Бергера и их модификации. Москва : Наука, 2020. 383 с.
24. Сапожников В. В., Сапожников Вл. В., Ефанов Д. В. Коды с суммированием для систем технического диагностирования. Т. 2. Взвешенные коды с суммированием. Москва : Наука, 2021. 455 с.
25. Акчурин А. Д., Юсупов К. М., Колчев А. А. Основы работы в среде QUARTUS II. Казань : КФУ, 2017. 49 с.
26. Efanov D. V., Pashukov A. V. The Weight-Based Sum Codes in the Residue Ring by Arbitrary Modulus for Synthesis of Self-Checking Digital Computing Systems // Proceedings of the 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, 10–13 September 2021. Pp. 170–179. DOI: 10.1109/EWDTS 52692.2021.9581032.
27. Efanov D. V., Pashukov A. V. Weight-Based Sum Codes with Arbitrary Modulus // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Russia, 25–28 January 2022. Pp. 133–138. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755482.
28. Гавзов Д. В., Сапожников В. В., Сапожников Вл. В. Методы обеспечения безопасности дискретных систем // Автоматика и телемеханика. 1994. № 8. С. 3–50. ISSN 0005–2310.
29. Бестемьянов П. Ф. Методы обеспечения безопасности и надежности микропроцессорных устройств железнодорожной автоматики и телемеханики // Труды международного симпозиума «Надежность и качество», 2007. Т. 2. С. 273–274.
30. Бестемьянов П. Ф. Методы обеспечения безопасности аппаратных средств микропроцессорных систем управления движением поездов // Электротехника. 2020. № 9. С. 2–8. ISSN 0013–5860.
31. Потехин А. И. Логические основы управления групповым движением поездов // Автоматика и телемеханика. 2020. № 5. С. 156–172. ISSN 0005–2310.
32. Gordon M. A., Vasilenko P. A., Sedykh D. V. Synthesis of Full Functional Check Programs for Train Traffic Management Systems on a Railway Station // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1680. Issue 1. Pp. 012013. DOI: 10.1088/1742–6596/1680/1/012013.
33. Efanov D., Lykov A., Osadchy G. Testing of Relay-Contact Circuits of Railway Signalling and Interlocking // Proceedings of the 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2 2017. Pp. 242–248. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110095.
- elektricheskoy tsentralizatsii na baze programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhem] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2010. No. 2. Pp. 168–173. ISSN 1815–588X.
16. Pashukov A. V. Synthesis of control devices for objects of floor automation of railway transport on FPGA [Sintez ustroystv upravleniya ob'ekta-mi napol'noy avtomatizatsii zheleznodorozhnogo transporta na programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh] // Problems of Advanced Micro- and Nanoelectronic Systems Development — MES. 2021. No. 1. Pp. 61–69. DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-61-69. ISSN 2078–7707.
17. Pashukov A. V. Synthesis of switch control devices on programmable logic integrated circuits [Sintez ustroystv upravleniya strelochnym perevodom na programmiruemykh logicheskikh integral'nykh skhemakh] // Problems of security on transport: proceedings of the 11th International research and practice conference: in 2 parts. Part 1. Gomel : BSUT, 2021. Pp. 201–203.
18. Dobiáš R., Kubátová H. FPGA Based Design of Railway's Interlocking Equipment // Proceedings of EUROMICRO Symposium on Digital System Design, Rennes, France, 2004. Pp. 467–473. DOI: 10.1109/DSD.2004.1333312.
19. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip. New York : IGI Global, 2011. 578 p.
20. Cummings C. E. The Fundamentals of Efficient Synthesizable Finite State Machine Design Using NC–Verilog and BuildGates // International Cadence conference, San Jose, California, 16–18 September 2002. 27 p.
21. Design and verification of digital systems on crystals [Proektirovanie i verifikatsiya tsifrovyykh sistem na kristallakh] / V. I. Khakhanov, I. V. Khakhanova, E. I. Litvinova, O. A. Guz'. Kharkiv : Kharkov National University of Radioelectronics, 2010. 528 p.
22. MAX II Device Handbook. Vol. 1. Altera Corporation, 2006. 102 p.
23. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. Sum codes for systems of technical diagnostics [Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya]. Vol. 1. Classic Berger codes and their modifications [Klassicheskie kody Bergera i ikh modifikatsii]. Moscow : Science, 2020. 383 p.
24. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V., Efanov D. V. Sum codes for systems of technical diagnostics [Kody s summirovaniem dlya sistem tekhnicheskogo diagnostirovaniya]. Vol. 2. Weighted sum codes [Vzveshennyye kody s summirovaniem]. Moscow : Science, 2021. 455 p.
25. Akchurin A. D., Yusupov K. M., Kolchev A. A. Basics of operation in QUARTUS II environment [Osnovy raboty v srede QUARTUS II]. Kazan : KFU, 2017. 49 p.
26. Efanov D. V., Pashukov A. V. The Weight-Based Sum Codes in the Residue Ring by Arbitrary Modulus for Synthesis of Self-Checking Digital Computing Systems // Proceedings of the 19th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2021), Batumi, Georgia, 10–13 September 2021. Pp. 170–179. DOI: 10.1109/EWDTS 52692.2021.9581032.
27. Efanov D. V., Pashukov A. V. Weight-Based Sum Codes with Arbitrary Modulus // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Russia, 25–28 January 2022. Pp. 133–138. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755482.
28. Gavzov D. V., Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. V. Methods of provision of safety of discrete systems [Metody obespecheniya bezopasnosti diskretnyykh sistem] // Automation and Remote Control. 1994. No. 8. Pp. 3–50. ISSN 0005–2310.
29. Bestem'yanov P. F. Methods for provision of safety and reliability of microprocessor devices for railway automation and telemechanics [Metody obespecheniya bezopasnosti i nadezhnosti mikroprotsessornykh ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki] // Proceedings of the International symposium «Reliability and quality», 2007. Vol. 2. Pp. 273–274.
30. Bestem'yanov P. F. Methods for provision of safety of hardware for microprocessor traffic control systems [Metody obespecheniya bezopasnosti apparatnykh sredstv mikroprotsessornykh sistem upravleniya dvizheniem poezdov] // Russian Electrical Engineering. 2020. No. 9. Pp. 2–8. ISSN 0013–5860.
31. Potekhin A. I. Logic basics of control of group train movement [Logicheskie osnovy upravleniya gruppovym dvizheniem poezdov] // Automation and Remote Control. 2020. No. 5. Pp. 156–172. ISSN 0005–2310.
32. Gordon M. A., Vasilenko P. A., Sedykh D. V. Synthesis of Full Functional Check Programs for Train Traffic Management Systems on a Railway Station // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1680. Issue 1. Pp. 012013. DOI: 10.1088/1742–6596/1680/1/012013.
33. Efanov D., Lykov A., Osadchy G. Testing of Relay-Contact Circuits of Railway Signalling and Interlocking // Proceedings of the 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2017), Novi Sad, Serbia, September 29 — October 2 2017. Pp. 242–248. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110095.

УДК 656.216.2

Ришат Зинфирович Галинуров, ассистент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
 Антон Николаевич Попов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ПЕРЕЕЗДНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Rishat Zinfirovich Galinurov, Assistant Lecturer, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
 Anton Nikolaevich Popov, PhD in Engineering, Associate Professor, Railway Automation, Telemechanics and Communication Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Study of level crossing safety installation operation parameters on the basis of stochastic modeling

Аннотация

Причины, приводящие к простоям автотранспорта у закрытого переезда и к росту числа транспортных происшествий в местах пересечения железнодорожной линии с автодорогой, во многом обусловлены несовершенством действующей методики расчета параметров переездной сигнализации.

В статье предложен вероятностный метод исследования переездной сигнализации, при котором учитываются параметры движения потока железнодорожного транспорта. Для построения стохастической модели используется аппарат теории сетей Петри. Кроме того, рассмотрены вопросы аналитического исследования модели на основе теории графов и теории полумарковских процессов. По результатам стохастического моделирования выполнен расчет параметров устройств переездной сигнализации.

Ключевые слова: железнодорожный переезд, параметры движения поезда, расчет участков извещения, сети Петри, полумарковский процесс.

Abstract

Reasons that lead to delay of motor transport at a closed railway crossing and to increase of a number of transport accidents at road level intersections are caused by the imperfection of the currently used method for calculation of parameters of level crossing safety installations.

The paper proposes a probabilistic method for studying level crossing safety installations that considers parameters of railway transport traffic. For the creation of a stochastic model the authors have applied the Petri nets theory. Besides they have considered issues of analytical studying of the model on the basis of the graph theory and the theory of semi-Markovian processes. As a result, on the basis of stochastic modeling the authors have calculated parameters of devices for a level crossing safety installation.

Keywords: railway crossing, train movement parameters, calculation of approach sections, Petri nets, semi-Markovian process.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-42-49

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности функционирования систем автоматической переездной сигнализации (АПС) и минимизация времени простоя автотранспорта на железнодорожных переездах до сих пор остается актуальной задачей, особенно в связи с увеличением интенсивности автомобильного потока и расширением диапазона скоростей движения железнодорожного транспорта.

Согласно работам [1, 2], основными мероприятиями, позволяющими минимизировать время закрытого состояния переезда, являются:

- уменьшение длины участка извещения;
- управление АПС по характеристикам поезда.

С другой стороны, в [3, 4] поднимается вопрос безопасности на переездах при наличии препятствий на пересечении с автодорогой. Теоретически подтверждено, что существующие методы расчета участков извещения переездной сигнализации не обеспечивают перед закрытым переездом остановку поезда торможением, если возникает такая необходимость. К мероприятиям, позволяющим снизить вероятность столкновений на переездах [5, 6], относятся:

- увеличение длины участка извещения;
 - снижение скорости поезда на участке приближения к переезду;
 - совершенствование средств торможения поезда;
 - управление АПС по характеристикам поезда.
- Согласно указаниям [7], параметры работы АПС устанавливаются на основе следующих зависимостей:

$$\begin{cases} t_{и}^P = f(L_{пер}) + t_{пр} + t_{г}, \\ I_{и}^P = f(V_{max}, t_{и}^P) \end{cases}, \quad (1)$$

где $t_{\text{и}}^{\text{р}}$ — расчетное время извещения о приближении железнодорожного подвижного состава к переезду, с;

$L_{\text{пер}}$ — длина переезда, м;

$t_{\text{пр}}$ — время срабатывания устройств АПС, с;

$t_{\text{г}}$ — гарантийное время, с;

$l_{\text{р}}^{\text{и}}$ — расчетная длина участка извещения, м;

V_{max} — установленная максимальная скорость движения поездов на участке, м/с.

Однако время закрытого состояния переезда зависит не только от длины участка извещения и скорости поезда, но и от длины состава (рис. 1). Поэтому с точки зрения анализа работы переездной сигнализации во временной области следует учитывать время полного освобождения подвижным составом зоны пересечения с автомобильной дорогой, включая участок удаления.

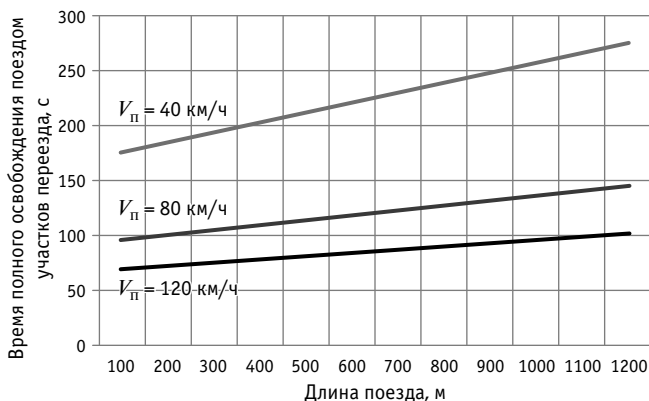


Рис. 1. Зависимость времени полного освобождения поездом участков переезда от длины и скорости поезда

Недостатки существующей методики расчета параметров автоматической переездной сигнализации [7] заключаются в том, что она не учитывает:

поток движения поездов;

категории поездов на участке;

параметры движения (длину, вес, скорость) подвижных составов, обращающихся на участке.

В настоящее время развитие и совершенствование бортовых локомотивных комплексов и систем мониторинга движения поездов позволяют изменить подход к расчету временных параметров работы переездной сигнализации на основе данных о параметрах движения и характеристиках поездов, обращающихся на участке.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Взаимодействие транспортного потока с устройствами переездной сигнализации можно рассматривать как транспортный процесс, который подчиняется стохастическим закономерностям, таким как неравномерность транспортного потока, неодинаковое время прохождения участков пути, случайный характер событий на транспорте и др. Для изучения подобных стохастических процессов успешно применяется теория массового обслуживания [8]. При этом система массового обслуживания характеризуется входным потоком, очередью и временем обслуживания.

В качестве анализируемого показателя моделируемого процесса примем временные зависимости функционирования автоматической переездной сигнализации T . При этом воздействие входного потока на параметры переездной сигнализации на однопутном участке железнодорожной линии описывается одиночными потоками Π (рис. 2), а временные параметры работы переезда зависят от значений скорости и длины заданных поездов $T(V_{\text{п}}, l_{\text{п}})$.

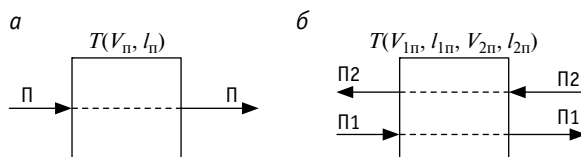


Рис. 2. Схема взаимодействия потока:
а — однопутный одиночный поток Π ;
б — двухпутные одиночные потоки Π_1 и Π_2

Однако описать реальный поток поездов одним параметром потока невозможно, поэтому будем учитывать классификацию поездов (рис. 3), так как длина составов, а также скорости и тормозные характеристики различных категорий поездов существенно отличаются.

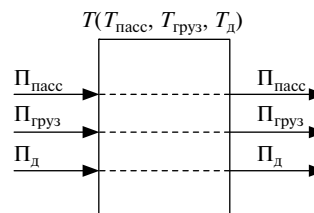


Рис. 3. Разнородный однопутный поток, описывающий движение пассажирских ($\Pi_{\text{пасс}}$), грузовых ($\Pi_{\text{груз}}$) и прочих ($\Pi_{\text{д}}$) поездов

Формально, с точки зрения описания динамических систем, процесс взаимодействия подвижного состава и устройств переездной сигнализации можно описать следующим выражением:

$$U(T, X, T_{\text{инт}}, V_k, a_k, L_k, \Phi_{ij}^k), \quad (2)$$

где T — множество, определяющее моменты времени;

X — множество состояний моделируемой системы;

$T_{\text{инт}}$ — множество, характеризующее величину межпоездного интервала;

V_k — множество, характеризующее скорость k -го поезда на участке извещения о приближении к переезду;

a_k — множество, характеризующее ускорение k -го поезда на участке извещения о приближении к переезду;

L_k — множество, характеризующее длину k -го поезда;

Φ_{ij}^k — переходная функция состояний для k -го поезда, причем переход из состояния i в состояние j в момент времени $t_{i,j}^k \in T$ зависит от параметров движения k -го поезда.

Для построения стохастической модели и анализа временных параметров исследуемого объекта необходимо корректное описание изменений состояний системы.

ВЫБОР ФОРМАЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ

При описании подобных событийных динамических систем будем использовать методы моделирования на основе сети Петри.

В работах отечественных ученых [9, 10] предложено и обосновано применение сетей Петри для построения моделей, описывающих процесс движения поездов. В том числе сети Петри могут использоваться при оценке времени поиска отказов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. В зарубежных источниках предлагается применять сети Петри для оценки эффективности и безопасности системы интервального регулирования движения поездов [11, 12], устройств ERTMS/ETCS [13], а также для построения модели влияния отказов поездной радиосвязи на движение поездов [14].

Сети Петри (СП) представляют собой графический формализм, позволяющий описывать и анализировать логико-временные процессы функционирования динамических систем. СП задаются как кортеж $P_N = (P, T, I, M_0)$, где $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ — конечное и непустое множество мест, $T = \{t_1, \dots, t_m\}$ — конечное и непустое множество переходов, I — функция перехода, M_0 — начальное состояние системы.

Графическим представлением СП служит двудольный ориентированный граф с двумя типами вершин: это условия (места) и события (переходы), характеризующие состояние системы. Функционирование СП описывается множеством событий, изменяющихся согласно условиям, и множеством достижимых в сети состояний [15].

Однако классические СП не подходят для анализа количественных и временных параметров. Поэтому для функционального описания моделируемых процессов более корректно использовать временные сети Петри (ВСП), которые учитывают время реализации событий. В отличие от СП, для ВСП возможность наступления очередного события зависит не только от текущего состояния сети, но и от того, сколько времени прошло после наступления предыдущего события [16]. Если изменение состояний моделируемого процесса носит вероятностный характер, то подобные системы описываются с помощью стохастических сетей Петри (ССП).

Среди достоинств применения аппарата СП выделяют возможность:

моделировать асинхронность и параллельные независимые события;

строить модель сложных динамических систем;
анализировать отдельные подсистемы модели;
детализировать события, происходящие в модели.

Анализ ССП стандартно проводится при помощи марковских процессов с дискретным множеством состояний. Поскольку используемые статистические данные для построения модели (длины и скорости поездов на перегоне, длины участков извещения о приближении подвижного состава к переезду и др.) не являются экспоненциально распределенными, при анализе сетей Петри необходимо учитывать сложные формы распределения для параметров задержек срабатывания переходов ССП. Поэтому процессы рассматриваются в качестве полумарковских, но система остается марковской в том смысле, что следующее состояние зависит от текущего состояния, а длительность времени смены событий в системе зависит от заданных условий.

ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРЫ МОДЕЛИ И ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

В статье представлена математическая модель функционирования системы автоматической переездной сигнализации однопутного железнодорожного участка с учетом параметров движения поезда. Исходные данные модели:

- максимальная допустимая скорость движения на участке;
- длина участка извещения;
- ширина и длина переезда;
- скорость движения подвижного состава;
- длина подвижного состава.

Зона железнодорожного переезда (рис. 4) задается участком извещения $L_{изв}$, длиной переезда $L_{пер}$, участком удаления $L_{уд}$. Также в расчете необходимо учитывать длину поезда L_k , которая определяет полное освобождение подвижным составом участка удаления и прекращение подачи извещения в устройства автоматической переездной сигнализации.

Для поезда, следующего по указанным участкам, задаются фазы равномерного движения:

- в зоне извещения;
- на участке пересечения с автодорогой;
- при выезде с участка пересечения с автодорогой.

Формализация функционирования системы автоматической переездной сигнализации при движении поезда, представленной структурой сети Петри (рис. 5), сводится к имитации проследования поезда по участкам зоны переезда с учетом заданных параметров движения.

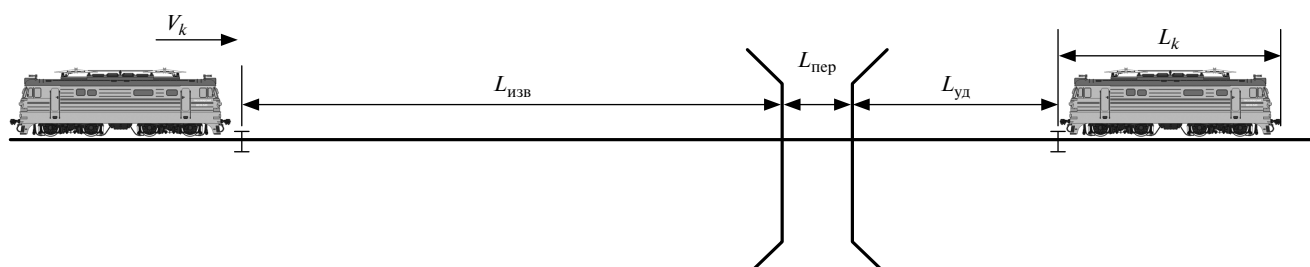


Рис. 4. Входные данные для построения модели функционирования переездной сигнализации

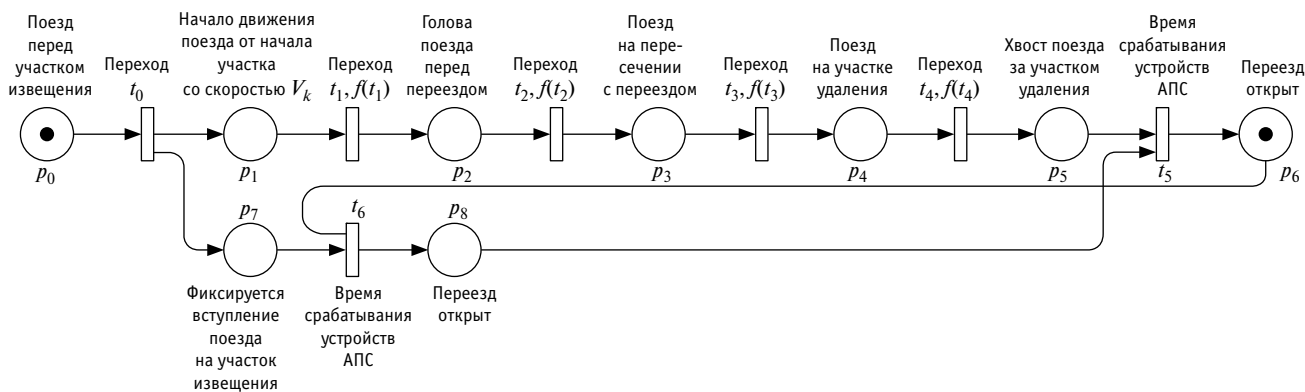


Рис. 5. Сеть Петри, описывающая функционирование переездной сигнализации при движении подвижного состава

Таблица 1

Описание условий построенной сети Петри

Условия	
p_0	Задан поезд с параметрами V_k, l_k
p_1	Поезд вступил на участок извещения о приближении поезда к переезду
p_2	Голова поезда перед переездом
p_3	Поезд на участке пересечения с автодорогой
p_4	Поезд вступил на участок удаления
p_5	Поезд полностью освободил участок удаления
p_6	Переезд открыт
p_7	Путевые датчики фиксируют занятие участка извещения
p_8	Переезд закрыт

Таблица 2

Описание событий построенной сети Петри

События	
t_0	По истечении времени t_0 задается поезд на приближении к участку извещения переезда, проходящий через рассматриваемый участок
t_1	Когда участок извещения свободен, но поезд на приближении имеется, то по истечении времени t_1 голова поезда полностью проедет участок извещения $L_{изв}$ с заданной скоростью V_k
t_2	Когда голова поезда перед переездом, то по истечении времени t_2 голова поезда полностью проедет участок пересечения с автодорогой $L_{пер}$ с заданной скоростью V_k
t_3	Когда поезд находится на участке пересечения с автодорогой, то по истечении времени t_3 голова поезда полностью проедет участок удаления $L_{уд}$ с заданной скоростью V_k
t_4	Когда поезд на участке удаления, то по истечении времени t_4 хвост поезда освободит участок удаления $L_{уд}$ с заданной скоростью V_k
t_5	Когда извещение на переезд неактивно и переезд закрыт, то за время t_5 переезд открывается
t_6	Когда извещение на переезд активно и переезд открыт, то за время t_6 переезд закрывается

Представленная непрерывно-временная стохастическая сеть Петри N имеет множество мест $P_N = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8\}$ и переходов $T_N = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\}$. При этом переходы t_1, t_2, t_3, t_4 задаются законом распределения вероятностей времени их срабатывания либо в виде функции распределения $F_i(x)$, либо в виде плотности распределения $f_i(x)$, так как время срабатывания переходов зависит от скорости движения поезда по участкам. Описание условий и событий построенной сети Петри приведено в табл. 1 и 2.

Графическое построение и анализ сетей Петри возможны с помощью доступных инструментов (например, таких как CPN Tools [17], Oris Tool [18], Pipe [19], и др.).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Согласно предлагаемому подходу, для анализа временных параметров работы переездной сигнализации задаются: известные размеры движения грузовых, пассажирских и пригородных поездов в соответствии с данными графика исполненного движения поездов, распределение длин поездов на рассматриваемом участке и распределение скоростей на участке извещения о приближении подвижного состава к переезду. Для получения гистограммы этих распределений можно воспользоваться данными со скоростемерных лент или с локомотивных бортовых комплексов.

Исследуемый переезд на однопутном железнодорожном участке оборудован устройствами переездной сигнализации и устройствами заграждения. В соответствии с установленной на участке максимальной скоростью движения поездов вычислены расчетное время подачи извещения и расчетная длина участка извещения (табл. 3). Перегон оборудован токовыми рельсовыми цепями, по изменению состояний которых контролируется свобода участка извещения о приближении поезда к переезду.

Таблица 3

Параметры исследуемого переезда

V_{max} км/ч	$L_{пер}$ м	$S_{пер}$ м	$t_{пр}^n$ с	$l_{пр}^p$ м	$L_{изв}$ м	$L_{уд}$ м
120	10	15	45	1510	1615	190

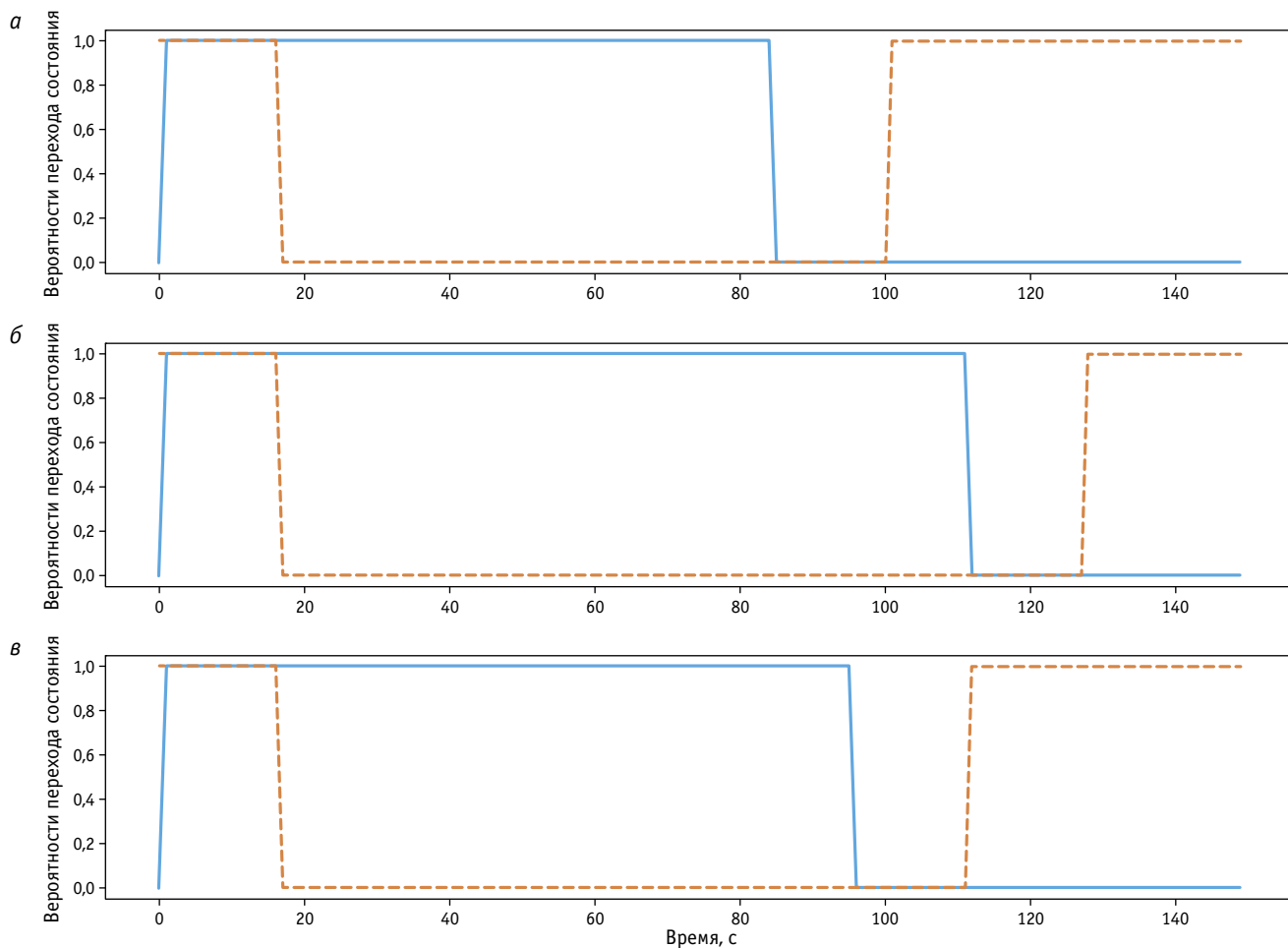


Рис. 6. Кривые смены состояний моделируемой системы:

a — для подвижного состава длиной 900 м с заданной скоростью движения по участкам зоны переезда 120 км/ч;
б — для состава длиной 900 м со скоростью движения 90 км/ч; *в* — для состава длиной 500 м со скоростью движения 90 км/ч;
 — поезд в зоне переезда; - - - переезд открыт

При анализе можно использовать метод редукции числа состояний для ССП, позволяющий получить значения математического ожидания и дисперсий времени достижения состояний [20]. Значение математического ожидания $M(t_k)$, дисперсии $D(t_k)$ и функции плотности распределения $f_k(t)$ любых последовательных переходов из события p_i в событие p_{i+1} определяется следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} M(t_k) = \sum_i^n M(t_{i,i+1}) \\ D(t_k) = \sum_i^n D(t_{i,i+1}) \cdot \\ f_k(t) = f_i(t) \cdot f_{i+1}(t) \end{cases} \quad (3)$$

Результаты анализа также можно представить в виде переходных функций, характеризующих пространство достижимых состояний во временной области (рис. 6). Полученные кривые показывают, что время закрытого состояния переезд-

ной сигнализации различно при различных параметрах движения подвижного состава. Таким образом, построенная модель адекватно описывает работу АПС. Однако ввиду того что время пребывания в определенном условии построенной сети Петри (см. рис. 5) зависит от задаваемых параметров движения поезда, анализ переходных кривых неудобен при вычислении статистических характеристик, определяющих состояние системы.

Также анализ временных интервалов между событиями в сетях Петри возможен с использованием аппарата полумарковских процессов [20]. Для получения числовых параметров построенной модели (см. рис. 5) анализ сети Петри сводится к построению графа достижимости (ГД) (рис. 7) на основе матрицы состояний модели (рис. 8), характеризующей изменение состояний системы.



Рис. 7. Граф достижимости для анализируемой сети

Условия Состояния	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
M_0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
M_1	0	1	0	0	0	0	1	1	0
M_2	0	1	0	0	0	0	0	0	1
M_3	0	0	1	0	0	0	0	0	1
M_4	0	0	0	1	0	0	0	0	1
M_5	0	0	0	0	1	0	0	0	1
M_6	0	0	0	0	0	1	0	0	1
M_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Рис. 8. Матрица состояний

ГД, представляет собой непрерывную полумарковскую цепь и описывается:

множеством состояний $\{M\}$;

множеством значений переходных вероятностей p_{ij} из состояния i в состояние j , где $i, j \in M$;

функцией или плотностью распределения времени пребывания $F_i(t), f_i(t)$ в состояниях.

Стандартный процесс анализа полумарковских цепей достаточно полно изучен в работах [21–23] и включает следующие этапы:

- 1) определение переходных вероятностей вложенной цепи Маркова p_{ij} и составление матрицы переходных вероятностей;
- 2) определение закона распределения времени срабатывания «быстрого» из активных r переходов i -го состояния

$$F_i'(t) = 1 - \prod_{i=0}^r [1 - F_i(t)]; \quad (4)$$

3) определение математического ожидания времени непрерывного пребывания процесса в состоянии i , при этом, если время перехода задано функцией распределения, применимо выражение (5), если время перехода задано плотностью распределения, то применимо выражение (6):

$$m_i = \int_0^{\infty} t dF_{ij}(t); \quad (5)$$

$$m_i = \int_0^{\infty} t f_{ij}(t) dt. \quad (6)$$

Результаты расчета для состояний $\{M\}$ исследуемого полумарковского процесса (см. рис. 8) в виде вероятностей соответствующих состояний вложенной цепи Маркова (p_{ij}) и математического ожидания времени пребывания модели в состояниях (m_i) приведены в табл. 4.

Результаты моделирования функционирования железнодорожного переезда на основе ССП можно представить в виде гистограмм, показывающих распределение значений параметров работы переездной сигнализации. В качестве искомых количественных признаков нами выделены время закрытого состояния переезда для различных категорий поездов (рис. 9) и значения длин участков извещения, рассчитанных исходя из реальных данных о параметрах движения поездов на исследуемом железнодорожном участке (рис. 10).

Таблица 4

Результаты расчета

Состояния	P_{ij}	m_i
M_0	0,14	0
M_1	0,14	15
M_2	0,14	64,65
M_3	0,14	0,45
M_4	0,14	7,05
M_5	0,14	20,5
M_6	0,14	15
M_7	0,14	∞

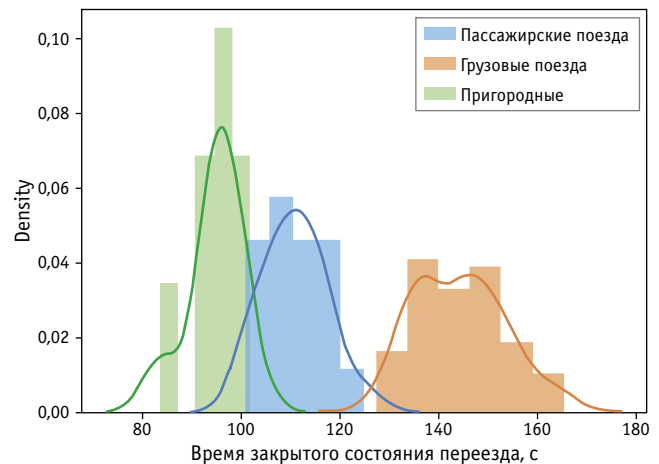


Рис. 9. Гистограммы времени закрытого состояния переезда для различных категорий поездов на исследуемом участке

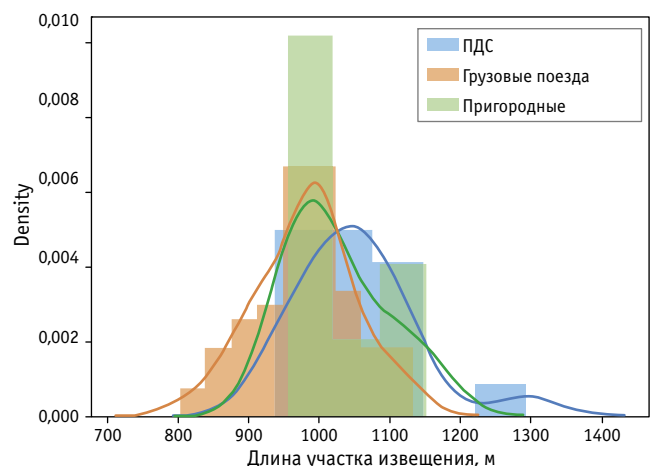


Рис. 10. Гистограммы значений длин участков извещения для различных категорий поездов

Ожидаемое значение времени длительности закрытого состояния переезда для грузового движения составляет $\bar{t}_{ГД} = 143,8$ с, для поездов дальнего следования $\bar{t}_{Пасс} = 111,3$ с, для пригородных поездов $\bar{t}_{д} = 98,42$ с. Суммарное взвешенное

по плотности распределения времени закрытого состояния переезда в сутки для одного направления движения поездов по данным расчетам составит $\bar{T}_{\text{загр}} = 4$ ч.

На основе полученных результатов выявлено, что 99 % полученных значений (99-й процентиль) длин участков извещения не превышают 1269 м, а максимальное значение составляет 1274 м. Таким образом, фактическое значение длины участка извещения, равное 1615 м, для исследуемого участка с заданными характеристиками движения поездов является избыточным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный подход к исследованию параметров работы переезда может стать основой для создания методов оценки эффективности функционирования устройств АПС с учетом данных о характеристиках движения потока поездов на конкретном участке. Определение избыточности в существующих технических решениях устройств АПС позволит усовершенствовать методы расчета параметров переезда с точки зрения сокращения продолжительности его закрытого состояния.

С другой стороны, открываются перспективы практического использования стохастического моделирования для описания транспортных процессов. Такой подход позволит определить вероятности возникновения опасных факторов и аварийных событий на переезде и на основе полученных оценок разработать рекомендации по оборудованию железнодорожного переезда техническими решениями, обеспечивающими безопасное и эффективное пересечение транспортных потоков.

Литература

1. Повышение пропускной способности железнодорожных переездов самонастраивающимся алгоритмом управления АПС / Е. М. Тарасов, Г. М. Третьяков, А. А. Булатов, А. Е. Тарасова // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 2 (80). С. 63–71. ISSN 1997–0722.
2. Тарасов Е. М., Железнов Д. В., Герус В. Л. Оценка эффективности существующей переездной сигнализации // Вестник транспорта Поволжья. 2015. № 6 (54). С. 58–61. ISSN 1997–0722.
3. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Оценка вероятности аварийной ситуации при вынужденной остановке автомобиля на переезде // Автоматика на транспорте. 2021. № 1 (7). С. 21–38. ISSN 2412–9186.
4. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Безопасность движения при остановке автотранспорта на железнодорожных переездах перед приближающимся поездом // Транспорт Урала. 2020. № 1 (64). С. 39–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-39-42. ISSN 1815–9400.
5. Бушуев С. В., Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Автоматическое управление закрытием переезда по характеристикам приближающегося поезда // Транспорт Урала. 2021. № 1 (68). С. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-3-7. ISSN 1815–9400.
6. Попов А. Н., Гришаев С. Ю. Время закрытия переезда при различных способах формирования участков извещения // Транспорт Урала. 2020. № 4 (67). С. 29–33. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-29-33. ISSN 1815–9400.
7. Методические указания по проектированию устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. И-276–00. Расчет параметров работы переездной сигнализации. URL: [http://static.scbist.com/scb/mu/I-276–00.pdf](http://static.scbist.com/scb/mu/I-276-00.pdf) (дата обращения: 10.06.2021).
8. Ивницкий В. А. Моделирование информационных систем железнодорожного транспорта. Москва : УМЦ ЖДТ, 2015. 276 с.
9. Дзюба Ю. В., Павловский А. А. Применение сетей Петри при управлении движением // Наука и технологии железных дорог. 2019. № 2 (10). С. 77–88. ISSN 2587–5752.
10. Булавский П. Е., Ваисов О. К., Быстров И. Н. Моделирование и оценка времени поиска и устранения отказов систем железнодорожной автоматики и телемеханики с помощью сетей

References

1. Increasing the traffic capacity of railway crossings by self-tuning algorithm of automatic crossing signaling control [Povyshenie propusknoy sposobnosti zheleznodorozhnykh pereezdov samonastrayvayushhimsya algoritmom upravleniya APS] / E. M. Tarasov, G. M. Tretiakov, A. A. Bulatov, A. E. Tarasova // Bulletin of transport of the Volga region. 2020. No. 2 (80). Pp. 63–71. ISSN 1997–0722.
2. Tarasov E. M., Zheleznov D. V., Gerus V. L. Evaluation of existing level crossing signaling [Otsenka effektivnosti sushhestvuyushhey pereezdnoy signalizatsii] // Bulletin of transport of the Volga region. 2015. No. 6 (54). Pp. 58–61. ISSN 1997–0722.
3. Popov A. N., Grishaev S. Yu. Assessment of emergency probability at the time of vehicle involuntary stop on the railway crossing [Otsenka veroyatnosti avariynoy situatsii pri vyzhdennoy ostanovke avtomobilya na pereezde] // Automation on Transport. 2021. No. 1 (7). Pp. 21–38. ISSN 2412–9186.
4. Popov A. N., Grishaev S. Yu. Safety of operation when motor vehicles stop at railway crossings in front of approaching train [Bezopasnost' dvizheniya pri ostanovke avtotransporta na zheleznodorozhnykh pereezdakh pered priblizhayushhimsya poezdom] // Transport of the Urals. 2020. No. 1 (64). Pp. 39–42. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-1-39-42. ISSN 1815–9400.
5. Bushuev S. V., Popov A. N., Grishaev S. Yu. Control of crossing closure on characteristics of approaching train [Avtomaticheskoe upravlenie zakrytiem pereezda po kharakteristikam priblizhayushhegosya poezda] // Transport of the Urals. 2021. No. 1 (68). Pp. 3–7. DOI: 10.20291/1815-9400-2021-1-3-7. ISSN 1815–9400.
6. Popov A. N., Grishaev S. Yu. Time of crossing closure at different methods of formation of notification sections [Vremya zakrytiya pereezda pri razlichnykh sposobakh formirovaniya uchastkov izveshheniya] // Transport of the Urals. 2020. No. 4 (67). Pp. 29–33. DOI: 10.20291/1815-9400-2020-4-29-33. ISSN 1815–9400.
7. Guidelines on design of automation, telemechanics and connection devices on railway transport. I-276–00. Calculation of level crossing safety installation operation parameters [Metodicheskie ukazaniya po proektirovaniyu ustroystv avtomatiki, telemekhaniki i svyazi na zheleznodorozhnom transporte. I-276–00. Raschet parametrov raboty pereezdnoy signalizatsii]. URL: [http://static.scbist.com/scb/mu/I-276–00.pdf](http://static.scbist.com/scb/mu/I-276-00.pdf) (access date: 10.06.2021).
8. Ivnitckiy V. A. Modeling of railway information systems [Modelirovanie informatsionnykh sistem zheleznodorozhnogo transporta]. Moscow : UMTs ZhDT, 2015. 276 p.
9. Dzuba Yu. V., Pavlovskiy A. A. Application of Petri nets in control of mobile objects [Primenenie setey Petri pri upravlenii dvizheniem]

- Петри // Автоматика на транспорте. 2019. № 4 (5). С. 478–492. ISSN 2412–9186.
11. Somsak V.-A. Modelling Railway Interlocking Tables Using Coloured Petri Nets // Coordination Models and Languages: Proceedings of 12th International Conference, COORDINATION 2010, Amsterdam, The Netherlands, 7–9 June 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13414-2_10.
 12. Chen L., Liu H., Wang W. Using Colored Petri net for Level-Crossing safety analysis // International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2018. DOI: 10.1109/ICIRT.2018.8641674.
 13. Ghazel M. A Control Scheme for Automatic Level Crossings under the ERTMS/ETCS Level 2/3 Operation // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2017. Vol. 18. No. 10. Pp. 2667–2680. DOI: 10.1109/TITS.2017.2657695.
 14. Non-Markovian performability evaluation of ERTMS/ETCS level 3 / L. Carnevali, F. Flammini, M. Paolieri, E. Vicario // European Workshop on Performance Engineering. 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23267-6_4.
 15. Королев Ю. И. Методы и программные средства моделирования сложных динамических систем на основе темпоральной модификации раскрашенных сетей Петри: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2015. 20 с.
 16. Бестужева И. И., Руднев В. В. Временные сети Петри. Классификация и сравнительный анализ // Автоматика и телемеханика. 1990. № 10. С. 3–21. ISSN 0005–2310.
 17. Jensen K., Kristensen L. M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. 2007. No. 9. Pp. 213–254. DOI: 10.1007/s10009-007-0038-x.
 18. The ORIS Tool: Quantitative Evaluation of Non-Markovian Systems / M. Paolieri, M. Biagi, L. Carnevali, E. Vicario // IEEE Transactions on Software Engineering. 2021. Vol. 47. No. 6. Pp. 1211–1225. DOI: 10.1109/TSE.2019.2917202.
 19. Dingle N. J., Knottenbelt W., Suto T. PIPE 2: A tool for the performance evaluation of generalised stochastic Petri Nets // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. 2009. Vol. 36. No. 4. Pp. 34–39.
 20. Угоренко Л. Ч., Сисков А. В. Методы анализа обобщенных временных стохастических сетей Петри // Системи обробки інформації. 2004. № 10 (38). С. 211–223. ISSN 1681–7710.
 21. Тарасюк И. В. Стохастические сети Петри — формализм для моделирования и анализа производительности вычислительных процессов // Системная информатика. 2004. Вып. 9. С. 135–194. ISSN 2307–6410.
 22. Иванов Н. Н. Полумарковские процессы во временных стохастических сетях Петри // Автоматика и телемеханика. 1994. № 3. С. 117–127. ISSN 0005–2310.
 23. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений / Пер. с англ. В. В. Калашникова, В. С. Манусевича; под ред. Н. П. Бусленко. Москва : Наука, 1977. 176 с.
 - // Railway science and technologies. 2019. No. 2 (10). Pp. 77–88. ISSN 2587–5752.
 10. Bulavsky P. E., Vaisov O. K., Bystrov I. N. Modeling and evaluating the time of search and elimination of failures of railway automation systems and telemechanics by means of Petri nets [Modelirovaniye i otsenka vremeni poiska i ustraneniya otkazov sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki s pomoshhyu setey Petri] // Automation on Transport. 2019. No. 4 (5). Pp. 478–492. ISSN 2412–9186.
 11. Somsak V.-A. Modelling Railway Interlocking Tables Using Coloured Petri Nets // Coordination Models and Languages: Proceedings of 12th International Conference, COORDINATION 2010, Amsterdam, The Netherlands, 7–9 June 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-13414-2_10.
 12. Chen L., Liu H., Wang W. Using Colored Petri net for Level-Crossing safety analysis // International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), 2018. DOI: 10.1109/ICIRT.2018.8641674.
 13. Ghazel M. A Control Scheme for Automatic Level Crossings under the ERTMS/ETCS Level 2/3 Operation // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2017. Vol. 18. No. 10. Pp. 2667–2680. DOI: 10.1109/TITS.2017.2657695.
 14. Non-Markovian performability evaluation of ERTMS/ETCS level 3 / L. Carnevali, F. Flammini, M. Paolieri, E. Vicario // European Workshop on Performance Engineering, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23267-6_4.
 15. Korolev Yu. I. Methods and software for modeling complicated dynamic systems on the basis of temporal modification of color Petri nets [Metody i programnyye sredstva modelirovaniya slozhnykh dinamicheskikh sistem na osnove temporal'noy modifikatsii raskrashennykh setey Petri]: Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2015. 20 p.
 16. Bestuzheva I. I., Rudnev V. V. Temporal Petri nets. Classification and comparative analysis [Vremennyye seti Petri. Klassifikatsiya i sravnitel'nyy analiz] // Automation and Remote Control. 1990. No. 10. Pp. 3–21. ISSN 0005–2310.
 17. Jensen K., Kristensen L. M., Wells L. Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems // International Journal on Software Tools for Technology Transfer. 2007. No. 9. Pp. 213–254. DOI: 10.1007/s10009-007-0038-x.
 18. The ORIS Tool: Quantitative Evaluation of Non-Markovian Systems / M. Paolieri, M. Biagi, L. Carnevali, E. Vicario // IEEE Transactions on Software Engineering. 2021. Vol. 47. No. 6. Pp. 1211–1225. DOI: 10.1109/TSE.2019.2917202.
 19. Dingle N. J., Knottenbelt W., Suto T. PIPE 2: A tool for the performance evaluation of generalised stochastic Petri Nets // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. 2009. Vol. 36. No. 4. Pp. 34–39.
 20. Ugorenko L. Ch., Siskov A. V. Methods of analysis of generalized temporal stochastic Petri nets [Metody analiza obobshhennykh vremennykh stokhasticheskikh setey Petri] // Information processes systems. 2004. No. 10 (38). Pp. 211–223. ISSN 1681–7710.
 21. Tarasyuk I. V. Stochastic Petri nets — formality for modeling and analysis of performance of computing processes [Stokhasticheskie seti Petri — formalizm dlya modelirovaniya i analiza proizvoditel'nosti vychislitel'nykh protsessov] // System Informatics. 2004. Issue 9. Pp. 135–194.
 22. Ivanov N. N. Semi-Markovian processes in stochastic Petri nets [Polumarkovskie protsessy vo vremennykh stokhasticheskikh setyakh Petri] // Automation and Remote Control. 1994. No. 3. Pp. 117–127. ISSN 0005–2310.
 23. Mine H., Osaki S. Markovian Decision Processes [Markovskie protsessy prinyatiya resheniy] / Translated from English by V. V. Kalashnikov and V. S. Manusevich; ed. by N. P. Buslenko. Moscow: Science, 1977. 176 p.

Объем статьи 0,98 авторских листа

УДК 629.4.021

Андрей Сергеевич Космодамианский, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,
Владимир Иванович Воробьев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,
Олег Васильевич Измеров, аспирант кафедры «Подвижной состав железных дорог» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,
Александр Анатольевич Пугачев, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета (БГТУ), Брянск, Россия,
Вадим Олегович Корчагин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия,
Евгений Владимирович Николаев, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Российского университета транспорта РУТ (МИИТ), Москва, Россия

КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ СЦЕПЛЕНИЯ И ПОИСК НОВЫХ РЕШЕНИЙ ТЯГОВОГО ПРИВОДА

Andrey Sergeevich Kosmodamianskiy, DSc in Engineering, Professor, Head of Traction Rolling Stock Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Vladimir Ivanovich Vorobyev, PhD in Engineering, Associate Professor, Rolling Stock of Railways Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,

Oleg Vasilyevich Izmerov, postgraduate student, Rolling Stock of Railways Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,

Alexander Anatolyevich Pugachev, DSc in Engineering, Head of Industrial Electronics and Electrical Engineering Department, Bryansk State Technical University (BSTU), Bryansk, Russia,

Vadim Olegovich Korchagin, PhD in Engineering, Associate Professor, Traction Rolling Stock Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia,

Evgeniy Vladimirovich Nikolaev, Associate Professor, Traction Rolling Stock Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia

Classification of magnetic adhesion boosters and search for new decisions for traction drive

Аннотация

Статья посвящена поиску новых решений тягового привода локомотива с магнитным усилителем сцепления (МУС). В результате проведенного анализа установлено, что для тех магнитных усилителей сцепления, которые должны увеличивать осевую нагрузку (магнитных догрузателей), и тех, которые должны управлять коэффициентом сцепления, оптимальная конструкция будет различаться. Предложена новая классификация, учитывающая разделение на магнитные догрузатели и устройства безынерционного регулирования коэффициента сцепления, охватывающая новые конструкции, запатентованные авторами. Установлено, что компоновка МУС с обмоткой индуктора, размещенной вокруг оси колесной пары, в наибольшей степени соответствует требованиям, предъявляемым к узлам экипажной части локомотива. Предложены новые конструкции тягового привода с дугостаторным асинхронным электродвигателем, обеспечивающие возможность размещения обмотки магнитного усилителя сцепления на оси колесной пары при диаметре колеса 1050 мм, при жестком и упругом опирании тягового электродвигателя и МУС на ось колесной пары. Предложенные решения защищены двумя патентами на изобретение, семью патентами на полезные модели, на получение одного патента подана заявка.

Ключевые слова: локомотивная тяга, сцепление колеса с рельсом, противобоксочные устройства, тяговый привод локомотива.

Abstract

The paper is devoted to search for new decisions for locomotive traction drive with a magnetic adhesion booster (MAB). In result of the analysis the authors have established that an optimal design for MABs that should increase axle load (magnetic boosters) and for MABs that should control an adhesion coefficient will differ. They have proposed a new classification that considers separation on magnetic boosters and devices for inertialess control of the adhesion coefficient and that covers new designs patented by the authors. It is established that a design of the MAB with inductor wiring located around a wheelset axle to the greatest extent complies requirements that are imposed to assemblies of locomotive underframe. The authors have suggested new designs for a traction drive with an arc-type-stator inductor electric motor that provides a possibility to place wiring of the MAB on a wheelset axle at a diameter of a wheel equal to 1050 mm, at rigid and elastic mounting of an electric traction motor and the MAB on a wheelset axle. The decisions proposed are protected by two patents, seven patents for utility models. Moreover, the authors have submitted an application for one patent.

Keywords: locomotive traction, adhesion, antiskid devices, locomotive traction drive.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-50-58

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из путей повышения сцепных свойств локомотива, позволяющих реализовать возможности бесколлекторных тяговых двигателей, являются магнитные усилители сцепления (МУС), действие которых основано на создании дополнительной нагрузки на колесо как за счет электромагнитного притяжения к рельсу, так и за счет увеличения коэффициента трения между колесом и рельсом при воздействии магнитного поля, что экспериментально доказано исследованиями [1, 2]. На данный момент основное препятствие, затрудняющее применение МУС на магистральных локомотивах, заключается в разных оценках их эффективности, полученных для опытных образцов. Так, для макета тележки [3] с обмоткой, расположенной на оси колесной пары, получено двукратное увеличение сцепления. В эпизоде кинохроники, посвященном испытаниям электромагнитных догружателей на паровозе С017–2877, утверждалось, что благодаря данным устройствам «поезд везет двойной груз». С другой стороны, как утверждается в [4], испытания тепловоза ТЭМ2УС-001 не выявили эффекта от применения УС. Экспериментальные исследования, проведенные на тепловозе ЧМЭЗ [5], оборудованном макетным образцом индуктора (размещенного для удешевления опыта на путевой структуре), выявили увеличение силы тяги на 8–10 %, что существенно выше, чем обнаруженное в [4].

Приведенные данные позволяют считать, что эффективность МУС существенно зависит от их конструктивной схемы. Таким образом, на данный момент основная проблема при создании МУС — недостаточность знаний об их рациональной компоновке и компоновке элементов экипажной части, в первую очередь тягового привода, позволяющей реализовать рациональные технические решения МУС. Предлагаемая статья является попыткой решения этой проблемы.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ

Рассмотрим данные о созданных конструкциях МУС. Прежде всего отметим, что переоборудованный паровоз С017–2877 до начала опытной эксплуатации прошел тяговые испытания на кольце ВНИИЖТ. Исходя из того что к моменту переоборудования паровоза испытания различных типов подвижного состава на кольце проводились около 20 лет, можно утверждать, что тяговые испытания показали существенное увеличение предела тяги по сцеплению, превышавшее погрешности опыта, в противном случае не было бы принято решения об опытной эксплуатации.

Что касается тепловоза ТЭМ2УС-001, то имеет смысл обратить внимание на два обстоятельства.

Во-первых, в ходе работы по оптимизации параметров индуктора [6] принималось в расчет только дополнительное усилие нажатия колеса на рельс, создаваемое магнитным полем индуктора, поскольку во время проведения работ (1977 г.) не был доказан факт изменения коэффициента трения под воздействием магнитного поля. Было установлено, что максимальная сила притяжения колеса к рельсу достигает 11,8 кН на колесную пару, что составляло лишь 6 % от осевой нагрузки, а при достижении режима насыщения стали сила при-

тяжения практически перестает возрастать. На этом основании ток в обмотках был ограничен до 120 А, сила трения между колесом и рельсом при этом не измерялась. Более того, как было установлено в [4], при использованной конструкции индуктора сила тока по условиям нагрева обмоток в продолжительном режиме работы должна быть снижена до 100 А. Лабораторные же исследования [7] показали возможность увеличения самого коэффициента трения на 22 %. Таким образом, ТЭМ2УС-001 после оптимизации изначально не был рассчитан на повышение силы тяги до 15 %, первоначально зафиксированное для макетного образца ТЭМ2-1983 [8]. В [9] показано, что для тепловоза ТЭМ2УС-001 реальное повышение нагрузки составляло от 1,94 до 5,3 %, т.е. было незначительным.

Во-вторых, в [4] для тепловоза ТЭМ2УС-001 было установлено увеличение сил сопротивления движению при включении МУС на 0,35–0,4 кН, при этом дополнительные силы сопротивления росли в зависимости от тока в обмотках МУС и практически не зависели от скорости движения. При этом в [4] отмечено, что тепловоз ТЭМ2-1983 отличается от ТЭМ2УС-001 тем, что был оборудован композиционными колодками. Отсюда возникает вопрос, не сопровождалось ли включение МУС касанием краев металлических тормозных колодок поверхностей катания колес под воздействием магнитного поля, что может быть причиной возникновения дополнительной силы сопротивления движению. Однако данный вопрос в то время не был изучен.

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что МУС, действие которых основано на создании магнитного потока в площадке контакта колеса и рельса, не могут существенно увеличить давление колеса на рельс, вследствие того что магнитная индукция снижается по мере удаления от площадки контакта. Положительный эффект, достигнутый при испытаниях паровоза С017-2877 и тепловоза ЧМЭЗ, следует отнести на счет изменения коэффициента трения между колесом и рельсом. Это означает, что для МУС, которые должны увеличивать осевую нагрузку (магнитные догружатели), и МУС, которые должны управлять коэффициентом сцепления, оптимальная конструкция будет различаться. Эффективные магнитные догружатели должны иметь развитые полюсные наконечники, расположенные на небольшом расстоянии от рельса (наподобие магниторельсовых тормозов), для реализации максимальной силы притяжения, в то время как МУС, управляющие коэффициентом сцепления, должны создавать максимальный магнитный поток именно в точке контакта.

Ранее авторами была предложена классификация МУС, в которой принадлежность устройства к догружателям либо к устройствам управления коэффициентом сцепления не было принято в качестве отличительного признака [10]. На основании сделанного выше вывода о влиянии на конструкцию МУС того, какой именно из физических эффектов принимается в качестве основного, а также вследствие того что авторами после публикации [10] был запатентован ряд новых конструкций усилителей сцепления, предложена расширенная классификация МУС (рис. 1).

Классификация имеет пять уровней, для каждого из которых авторами принят свой критерий различения.

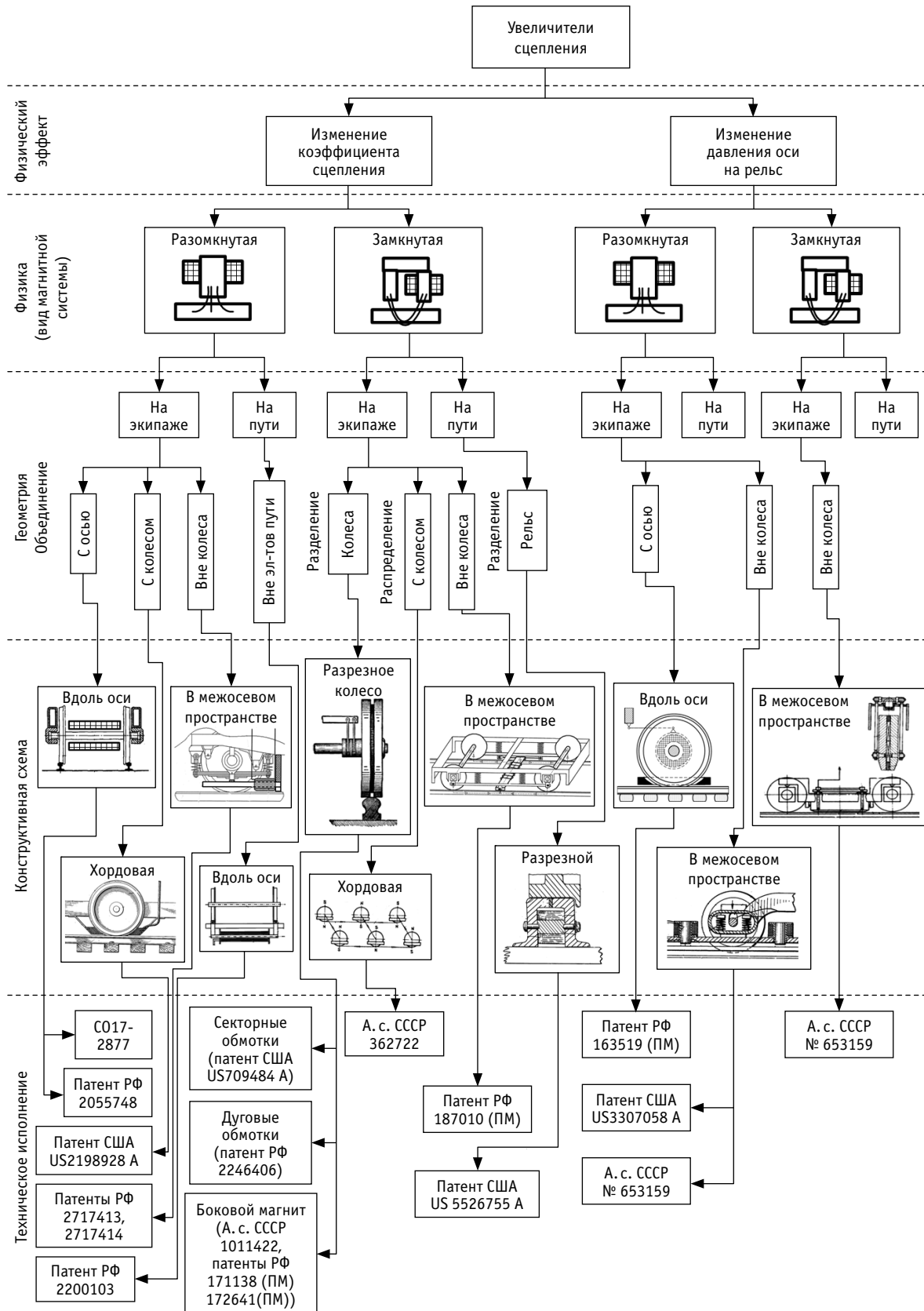


Рис. 1. Расширенная классификация конструкций магнитных усилителей сцепления

На первом уровне предлагается различать МУС по физическим эффектам, используемым в устройстве, и выделять две группы: устройства, в которых увеличение сцепления достигается за счет изменения коэффициента сцепления, и устройства, в которых увеличение сцепления достигается за счет повышения нагрузки колеса на рельс на основе магнитного притяжения. На втором уровне МУС разделяются по способам реализации (а именно по виду магнитных систем) на устройства с магнитной системой, близкой к замкнутой, у которой геометрические размеры воздушного зазора можно считать незначительными по сравнению с размерами ферромагнитных сердечников, и с разомкнутой, в которой магнитный поток проходит в основном по воздуху.

На третьем уровне в качестве отличительных признаков предложены особенности геометрической конфигурации МУС, т.е. расположение индуктора по отношению к другим элементам конструкции. В первую очередь это расположение индуктора на экипаже или пути, которое диктует возможный выбор метода компоновки индуктора. Если индуктор размещен на экипаже при разомкнутой магнитной цепи, то построение компоновки может включать в себя следующие варианты:

объединение индуктора с элементами экипажа (осью, диском колеса);

расположение индуктора в виде отдельного элемента.

При замкнутой магнитной цепи для создания компоновки используется прием разделения того или иного элемента экипажа для создания полюсов магнита. Те же приемы применяются и для догружателей, но число возможных вариантов здесь меньше из-за необходимости обеспечить достаточную площадь сечения полюсов индуктора.

Четвертый уровень классификации представляет собой группировку конструктивных схем МУС, полученных на основе указанных выше принципов решения, а пятый уровень представляет собой совокупность типичных примеров технических исполнений для каждой из схем. Рассмотрим эти возможные конструктивные решения.

Вариант магнитной системы с размещением индуктора на оси был запатентован еще в XIX в. [11] и реализован на опытном локомотиве С017-2877. Для эффективной работы в виде догружателя данный вариант может быть снабжен дополнительным сердечником, как это предложено и запатентовано авторами в [12]. Размещение индуктора на колесе может быть не только осевым, но и хордовым — когда индуктор подвешен к необрессоренным массам тележки [13, 14].

Размещение индуктора в межосевом пространстве может применяться как для устройств управления коэффициентом сцепления (авторами предложены и запатентованы решения [15, 16]), при этом сердечник индуктора подводится к колесу, так и для догружателей [17, 18], у которых индуктор имеет значительную площадь сечения для создания сил взаимодействия с рельсом.

При замкнутой схеме магнитопровода индуктора типичным является прием разделения элемента конструкции для создания двух полюсов. Так, размещение индуктора в колесе может быть реализовано за счет использования разрезного колеса с расположенными внутри секторными или дугowymi обмот-

ками индуктора [19, 20] либо с внешним индуктором, расположенным с торца колеса, обод которого разделен немагнитной вставкой [21–23]. Для догружателей при замкнутой схеме магнитопровода индуктора применяются аналогичные компоновки (например, [24]).

Анализ противоречивых требований, возникающих при реализации рассмотренных конструкций, был ранее изложен авторами в [10]. В связи с этим имеет смысл рассмотреть лишь ряд новых моментов, в основном связанных с изменением классификации.

Первое. Как было отмечено О. В. Измеровым [25], на тепловозе ТЭМ2УС-001 в диапазоне скоростей от 2 до 20 км/ч наблюдается дополнительное сопротивление движению увеличилось лишь на 4 Н/т. Это означает, что наведение вихревых токов в деталях экипажной части и путевой структуры не было основной причиной возникновения дополнительного сопротивления, и, таким образом, можно сделать вывод, что хордовое расположение индуктора не создает существенного противоречия между необходимостью увеличивать магнитный поток и снижать дополнительное сопротивление. Причины возникновения дополнительного сопротивления движению на тепловозе ТЭМ2УС-001 требуют отдельного изучения.

Второе. С учетом предложенной авторами конструкции [12], в которой дополнительный сердечник с хордовым расположением относительно колеса позволяет увеличить силы магнитного притяжения колеса к рельсу, схема с расположением обмотки индуктора на оси колесной пары может быть эффективна как для МУС, управляющих коэффициентом сцепления, так и для догружателей.

Также необходимо отметить, что расположение обмотки на оси колесной пары обеспечивает наибольшую безопасность с точки зрения соблюдения габаритов подвижного состава и исключения возможности попадания посторонних предметов между деталями экипажной части и путевой структуры и деталями МУС. Таким образом, анализ подтверждает ранее сделанный авторами в [10] вывод о том, что компоновка МУС с обмоткой индуктора, размещенной вокруг оси колесной пары, в наибольшей степени соответствует требованиям, предъявляемым к узлам экипажной части локомотива. Основным противоречием для этой компоновки является, с одной стороны, требование максимального увеличения размеров обмотки для повышения создаваемого магнитного потока, а с другой — требование уменьшения размеров обмотки для ее размещения на экипажной части. В связи с этим рассмотрим возможные пути разрешения данного противоречия.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ

Авторами ранее был предложен и запатентован [26–28] ряд решений, позволяющих увеличить место для размещения обмотки индуктора на оси колесной пары. Эти решения можно условно разделить на увеличивающие пространство для размещения обмотки в радиальном и осевом направлении (рис. 2).

Групповой привод с осевыми редукторами (рис. 2а), который был ранее практически реализован на отечественном электровозе ВЛ83, легко позволяет разместить обмотки индуктора на оси с опиранием их на раму тележки. Недостатком данного

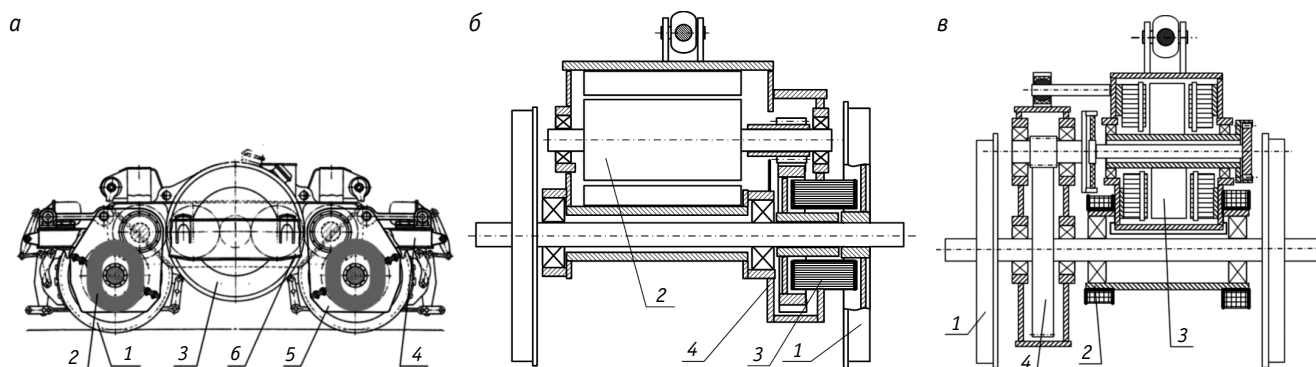


Рис. 2. Компоновка тягового привода с увеличенным пространством для размещения обмоток индуктора:

а — групповой привод по [26]; *б* — привод с малым зубчатым колесом между роторными подшипниками по [27];
в — привод с тяговым электродвигателем с осевым магнитным потоком по [28]; 1 — колесная пара; 2 — обмотка индуктора;
3 — тяговый электродвигатель; 4 — рама тележки; 5 — осевой редуктор; 6 — рамный редуктор

типа привода является сложность и ограничение мощности тягового электродвигателя ввиду сокращения его осевых габаритов. В [29] авторами предложено использовать данный привод с МУС для электровозов и тяговых агрегатов промышленного транспорта с диаметром колеса 1250 мм.

В варианте, представленном на рис. 2б, обмотка индуктора размещена на участке оси между большим зубчатым колесом тяговой передачи и диском колеса, что позволяет использовать индивидуальный тяговый привод. Для увеличения осевых размеров обмотки малое зубчатое колесо размещено между роторными подшипниками тягового электродвигателя. Конструкцию целесообразно использовать для привода с диаметром колеса 1250 мм, где можно использовать обмотку большего диаметра, чем при диаметре колеса 1050 мм.

Наконец, в варианте, показанном на рис. 2в, дополнительное пространство создается за счет тягового электродвигателя с осевым магнитным потоком, что позволяет разместить обмотку индуктора на шапках узлов моторно-осевых подшипников. Конструкция такого привода подробно рассмотрена авторами в [25] для электровоза с диаметром колеса 1250 мм. Исходя из расчетных данных, приведенных в [30] для проекта двигателя АД-3, и передаточного отношения редуктора, равного $u = 4,21$, в этом приводе можно получить осевую силу тяги в часовом режиме, равную 96,3 кН. Таким образом, шестиосный грузовой локомотив с данным приводом и МУС сможет развивать в часовом режиме силу тяги, равную силе тяги часового режима восьмиосного грузового локомотива с асинхронным тяговым электродвигателем. Однако при диаметре колеса 1050 мм преимущества схемы с осевым магнитным потоком становятся менее явными из-за уменьшения радиального габарита тягового электродвигателя.

Таким образом, предложенные ранее конструктивные схемы имеют смысл реализовывать в первую очередь при диаметре колеса 1250 мм, в то время как маневрово-промышленные тепловозы, для которых применение МУС позволит снизить расход энергии за счет уменьшения массы, имеют диаметр колеса 1050 мм. В этом случае нужно разрешить противоречие между необходимостью увеличивать диаметр обмот-

ки МУС, размещенной на оси колесной пары, для увеличения магнитного потока и между необходимостью уменьшать диаметр обмотки МУС, для того чтобы разместить обмотку между осью и корпусом тягового электродвигателя. Это возможно путем установки промежуточного колеса в тяговую передачу, однако такой вариант ведет к увеличению продольных габаритов колесно-моторного блока и к необходимости создания новой тележки с большей базой. Помимо деунификации экипажной части локомотивов, при трехосной тележке увеличение базы ведет к увеличению воздействия на путь тепловоза в кривых.

В связи с этим авторами были предложены конструкции тягового привода, интегрированного с МУС, в которых для разрешения указанного противоречия был использован прием размещения обмотки МУС на оси в габаритах тягового электродвигателя. В двигателях, применяемых в настоящее время на подвижном составе, такая компоновка невозможна из-за антагонизма свойств индуктора и двигателя (нельзя разместить в одном и том же месте обмотку и детали статора). Использование принципов технической инноватики позволило найти решение, при котором данный антагонизм свойств можно снять, — это применение электрической машины, в которой статор не представляет собой замкнутого кольца. К таким машинам относятся дугостаторные асинхронные электродвигатели, которые, как показано в [31], могут быть использованы в качестве тяговых для локомотива.

Предлагаемые варианты приводов представлены на рис. 3 и 4. На рис. 3а, б показан вариант для опорно-осевого привода. При пропускании по катушке 2 тока от источника питания 3 возникает магнитный поток, проходящий через ось колесной пары 9, оба колеса колесной пары и рельсы (на рис. 3а не показаны). Это приводит к изменению физико-механических свойств в зоне контакта металлических тел (колес с рельсами) и изменяет коэффициент сцепления колес с рельсами. Кожух 15 препятствует попаданию пыли и грязи внутрь тягового электродвигателя 7.

Статор 13 тягового электродвигателя 7 выполнен в виде двух одинаковых дугообразных индукторов 14.

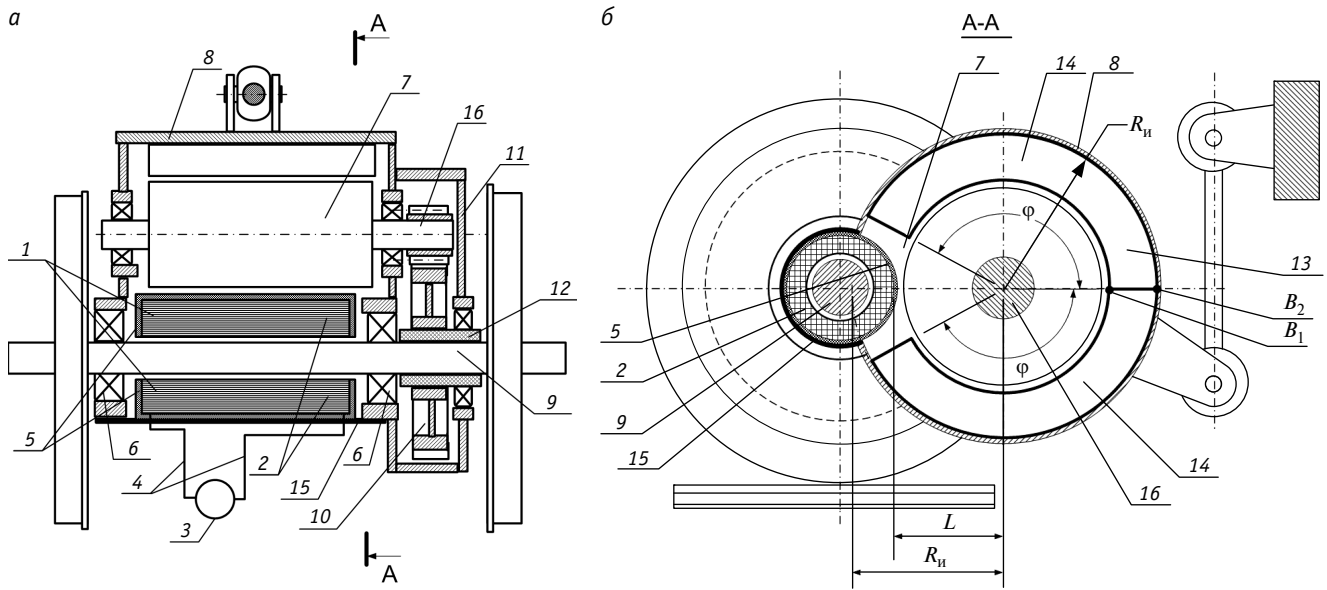


Рис. 3. Предлагаемый опорно-осевой тяговый привод с МУС и дугостаторным асинхронным электродвигателем:

а — общий вид; *б* — разрез по оси А-А; 1 — намагничивающая обмотка; 2 — катушка; 3 — источник питания; 4 — провода; 5 — каркас; 6 — моторно-осевые подшипники; 7 — тяговый электродвигатель (ТЭД); 8 — корпус ТЭД; 9 — ось колесной пары; 10 — зубчатое колесо; 11 — кожух редуктора; 12 — немагнитная втулка; 13 — статор ТЭД; 14 — дугообразный индуктор; 15 — кожух; 16 — вал ТЭД

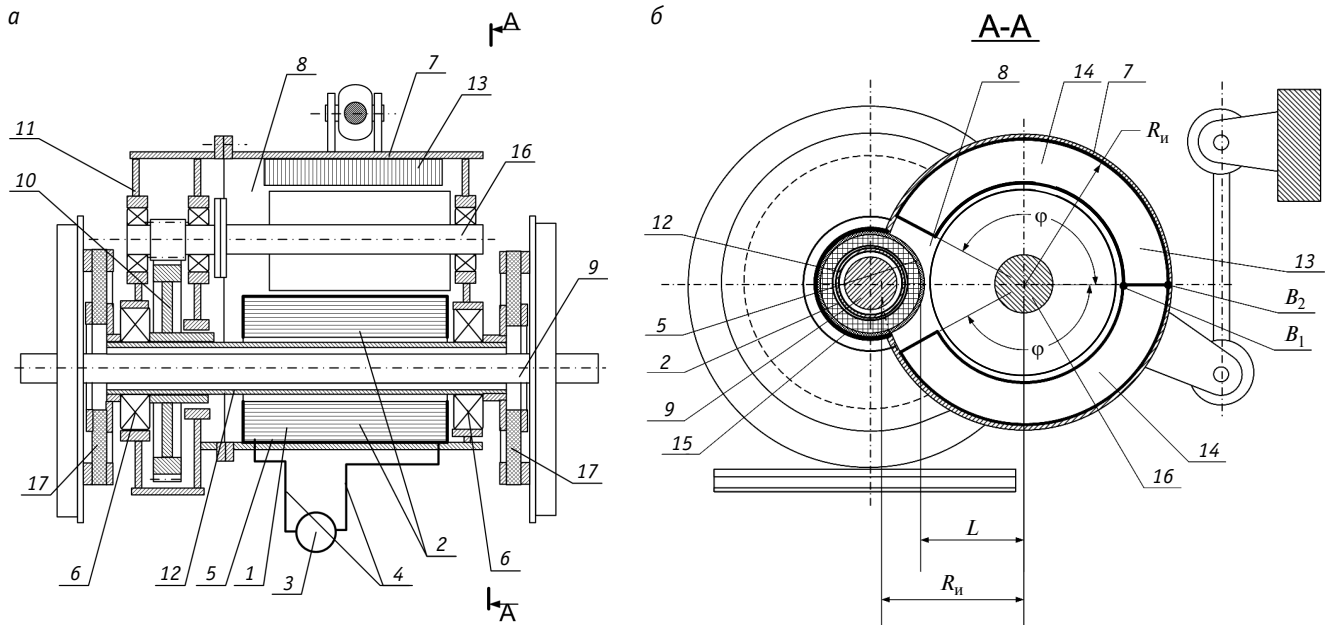


Рис. 4. Предлагаемый тяговый привод с МУС и дугостаторным асинхронным электродвигателем при упругом опирании ТЭД на ось:

а — общий вид; *б* — разрез по оси А-А; 1 — намагничивающая обмотка; 2 — катушка; 3 — источник питания; 4 — провода; 5 — каркас; 6 — подшипники; 7 — корпус ТЭД; 8 — ТЭД; 9 — ось колесной пары; 10 — зубчатое колесо; 11 — кожух редуктора; 12 — немагнитная втулка; 13 — статор ТЭД; 14 — индукторы; 15 — кожух; 16 — вал ТЭД; 17 — упругие элементы

Как видно из рис. 3б, длина каждого из индукторов 14 по наружной стороне будет равна $L_{\text{и}} = \pi R_{\text{и}} \varphi / 180$, где $R_{\text{и}}$ — радиус индуктора по наружной стороне, а φ — угол между торцами индуктора. Как показано на рис. 3б, $\varphi < 180^\circ$, таким образом, $L_{\text{и}}$ меньше, чем длина полуокружности с радиусом, равным $R_{\text{и}}$ и два индуктора 14 вместе образуют лишь часть окружности. Концы

индукторов 14 соединены друг с другом со стороны, противоположной оси колесной пары 9, по линии $B_1 B_2$ (см. рис. 3б), а противоположные концы индукторов 14 не смыкаются друг с другом. Корпус 8 тягового электродвигателя 7 имеет выемку в месте расположения концов индукторов 14, удаленных друг от друга. Выемка закрыта кожухом 15, каркас 5 катушки 2

закреплен на корпусе 8 тягового электродвигателя 7 с помощью кожуха 15. Как видно из рис. 3б, расстояние L от наружной поверхности каркаса 5 катушки 2 до центра вала 16 тягового электродвигателя 7 меньше, чем величина $R_{и}$ (радиуса индуктора 14 по наружной стороне).

Благодаря выполнению статора 13 тягового электродвигателя 7 в виде двух дугообразных индукторов 14, не соединенных друг с другом со стороны оси колесной пары 9, и наличию в корпусе 8 тягового электродвигателя 7 выемки появляется возможность для увеличения магнитного потока, проходящего через колеса и рельсы. Это достигается путем увеличения наружного диаметра катушки 2, поскольку наружный диаметр каркаса 5 катушки 2, в отличие от рассмотренных выше аналогов, можно при той же самой величине централи тяговой передачи и передаточном отношении увеличить до размеров, при которых расстояние от наружной поверхности каркаса 5 катушки 2 до центра вала 16 тягового электродвигателя 7 меньше, чем величина радиуса индуктора 14 по наружной стороне, при числе пар полюсов больше двух, так как катушка 2 располагается в выемке.

На предложенный тяговый привод получен патент на полезную модель [32].

Недостаток рассмотренного привода состоит в том, что опирание обмотки МУС на ось колесной пары увеличивает необрессоренную массу локомотива.

На рис. 4 а, б изображен вариант привода интегрированной компоновки с упругим опиранием на ось колесной пары, что снижает воздействие на путь. В качестве упругих элементов применены плоские резинокордные элементы, что позволяет использовать привод с упругим опиранием для тепловозов с диаметром колес 1050 мм. Принцип работы привода тот же, что и у описанного выше. На конструкцию привода подана заявка на получение патента на полезную модель.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что основным препятствием при создании МУС является недостаточность знаний о его рациональной компоновке и компоновке элементов экипажной части (в первую очередь тягового привода), не позволяющая реализовать оптимальные технические решения МУС.

2. Сделан вывод, что причина незначительной эффективности МУС, примененных на опытном тепловозе ТЭМ2УС-001, заключалась в отсутствии на момент проектирования знаний о влиянии магнитного поля на коэффициент сцепления колеса с рельсом, в результате магнитный поток был заведомо недостаточным. Доказано, что для МУС, которые должны увеличивать осевую нагрузку (магнитные догрузжатели), и МУС, которые должны управлять коэффициентом сцепления, оптимальная конструкция будет различаться.

3. Предложена расширенная классификация МУС, учитывающая разделение на магнитные догрузжатели и устройства безынерционного регулирования коэффициента сцепления. Классификация охватывает новые конструкции МУС, запатентованные авторами. Из анализа классификации следует, что компоновка МУС с обмоткой индуктора, размещенной вокруг оси колесной пары, в наибольшей степени соответствует требованиям, предъявляемым к узлам экипажной части локомотива. Основное противоречие для этой компоновки состоит, с одной стороны, в требовании максимального увеличения размеров обмотки для увеличения создаваемого магнитного потока, а с другой — в требовании уменьшения размеров обмотки для ее размещения на экипажной части.

4. На основании анализа ранее запатентованных авторами конструкций тягового привода с увеличением пространства для размещения МУС предложены новые конструкции тягового привода с дугостаторным асинхронным электродвигателем. Эти конструкции позволяют размещать обмотку МУС на оси колесной пары при диаметре колеса 1050 мм и при жестком и упругом опирании ТЭД и МУС на ось колесной пары.

5. По теме статьи авторами получено два патента на изобретения, семь патентов на полезные модели и подана заявка на получение патента.

Литература

1. Делюсто Л. Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. Москва : Машиностроение, 2005. 272 с.
2. Моделирование сцепления колеса с рельсом / В. П. Тихомиров, В. И. Воробьев, Д. В. Воробьев [и др.] : монография. Орел : ОрелГТУ, 2007. 127 с.
3. Ries E. E. The electric current as a means of increasing the tractive adhesion of railway motors and other rolling contacts // Scientific American. December 10, 1887.
4. Испытание эффективности системы электромагнитного увеличения сцепления на тепловозе ТЭМ2УС-001: отчет о НИР (заключительный) : 74–79 / ВНИКТИ; Е. А. Ситников, И. Н. Родионов, В. П. Гриневиц. Коломна, 1979. 142 с.
5. Улучшение тяговых качеств локомотивов с помощью магнитных усилителей сцепления / Д. Я. Антипин, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.] : монография. Брянск : БГУ, 2018. 232 с.
6. Исследования по оптимизации параметров магнитопровода системы электромагнитного увеличителя сцепления (ЭУС)

References

1. Delyusto L. G. Basics of metal rolling in constant magnetic fields [Osnovy prokatki metallov v postoyannykh magnitnykh polyakh]. Moscow : Machinery, 2005. 272 p.
2. Modeling of adhesion [Modelirovanie stsepleniya koleasa s rel'som] / V. P. Tikhomirov, V. I. Vorobyev, D. V. Vorobyev [et al.] : monograph. Orel : OrelSTU, 2007. 127 p.
3. Ries E. E. The electric current as a means of increasing the tractive adhesion of railway motors and other rolling contacts // Scientific American. December 10, 1887.
4. Performance testing of system for electromagnetic increase of adhesion on TEM2US-001 diesel locomotive [Ispytanie effektivnosti sistemy elektromagnitnogo uvelicheniya stsepleniya na teplovoze TEM2US-001]: research report (final) : 74–79 / ALL-Russian Research and Design-Engineering Institute of Rolling Stock; E. A. Sitnikov, I. N. Rodionov, V. P. Grinevich. Kolomna, 1979. 142 p.
5. Increase of tractive properties of locomotives with the use of magnetic adhesion boosters [Uluchshenie tyagovykh kachestv lokomotivov s pomoshch'yu magnitnykh usiliteley stsepleniya] / D. Ya. Antipin, V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov [et al.] : monograph. Bryansk : BSTU, 2018. 232 p.

- и определения сил притяжения колес к рельсам: отчет о НИР (промежуточный) : 32–77 / ВНИКТИ; К. С. Сдобин, С. М. Антонов, Ю. М. Лужнов. Коломна, 1977. 33 с.
7. Корчагин О. В. Улучшение тяговых качеств тепловозов воздействием постоянного магнитного поля на контакт трибосистемы «колесо — рельс»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва : МИИТ, 2017. 175 с.
 8. Результаты испытаний тепловоза ТЭМ2–1983, оборудованного системой электромагнитного увеличения сцепления (ЭУС): отчет о НИР: 16–76 / ВНИТИ.
 9. Исследования по повышению тяговых свойств маневровых тепловозов путем применения электромагнитного увеличения сцепления и более оптимальных схем соединения тяговых электродвигателей: отчет о НИР (заключительный) : 108–82 / ВНИКТИ; Е. А. Ситников, И. Н. Родионов, В. П. Гриневич. Коломна, 1982. 83 с.
 10. Методы поиска конструкции тягового привода локомотива с минимальными потерями энергии в эксплуатации / В. И. Воробьев, С. Г. Волохов, О. В. Измеров, В. О. Корчагин // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век: материалы XII международной научно-практической интернет-конференции, Орел, 15 марта — 30 июня 2014 г. Орел : Госуниверситет-УНПК, 2014. С. 162–166.
 11. Combined electro magnetic brake and traction increasing device / E. E. Ries : патент США US 414996. 12.11.1889.
 12. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / В. И. Воробьев, В. Г. Новиков, О. В. Измеров [и др.] : патент на полезную модель 163519 Российская Федерация. № 2015125762/11; заявл. 29.06.2015; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20.
 13. Electromagnetic traction increaser / D. E. Wehner : патент US 2198928 А США. 02.12.1936.
 14. Устройство для повышения коэффициента сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / И. Л. Тимофеев : авторское свидетельство 362722 СССР. № 1495782/27–11; заявл. 02.12.1970; опубл. 20.12.1972, Бюл. № 3, 1973.
 15. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Д. Я. Антипин, В. И. Воробьев, В. О. Корчагин [и др.] : патент 2717413 Российская Федерация. № 2019108915; заявл. 27.03.2019; опубл. 23.03.2020, Бюл. № 9.
 16. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Д. Я. Антипин, В. И. Воробьев, В. О. Корчагин [и др.] : патент 2717414 Российская Федерация. № 2019108916; заявл. 27.03.2019; опубл. 23.03.2020, Бюл. № 9.
 17. Electromagnetic adhesion means for railroad locomotives / K. Kucera : патент US 3307058 А США. 20.01.1964.
 18. Магнитный догружатель рельсового транспортного средства / В. В. Мишин, В. А. Зябрев, А. И. Лебедев [и др.] : авторское свидетельство 1286453 СССР. № 3803110, заявл. 16.10.1984; опубл. 30.01.1987, Бюл. № 4.
 19. Magnetic wheel / J. O. Heinze Jr. : патент US 709484 А США. 24.02.1902.
 20. Колесная пара локомотива / Е. В. Сливинский, А. А. Зайцев, С. В. Бровко, Е. И. Воробьев : патент 2246406 Российская Федерация. № 2003123014/11; заявл. 21.07.2003; опубл. 20.02.2005, Бюл. № 5.
 21. Устройство для увеличения давления колес транспортного средства на рельсы / В. Л. Салов : авторское свидетельство 1011422
6. Studies on optimization of magnetic circuit parameters of system for electromagnetic adhesion booster (EAB) and on determination of forces for attraction of wheels to rails [Issledovaniya po optimizatsii parametrov magnitoprovoda sistemy elektromagnitnogo uvelichitelya stsepleniya (EUS) i opredeleniya sil prityazheniya koles k rel'sam]: research report (intermediate) : 32–77 / All-Russian Research and Design-Engineering Institute of Rolling Stock; K. S. Sdobin, S. M. Antonov, Yu. M. Luzhnov. Kolomna, 1977. 33 p.
 7. Korchagin O. V. Improvement of tractive properties of diesel locomotives by impact of constant magnetic field on «wheel — rail» tribosystem contact [Uluchshenie tyagovykh kachestv teplovozov vozdeystviem postoyannogo magnitnogo polya na kontakt tribosistemy «koleso — rel's»]: PhD in Engineering Thesis. Moscow : MIIT, 2017. 175 p.
 8. Results of testing of TEM2–1983 diesel locomotive equipped with system for electromagnetic adhesion boosting (EAB) [Rezultaty ispytaniy teplovoza TEM2–1983, oborudovannogo sistemoy elektromagnitnogo uvelicheniya stsepleniya (EUS)]: research report : 16–76 / VNIIT.
 9. Studies on increase of tractive properties of shunting locomotives by application of electromagnetic adhesion boosting and more optimal schemes of connection of electric traction motors [Issledovaniya po povysheniyu tyagovykh svoystv manevrovyykh teplovozov putem primeneniya elektromagnitnogo uvelicheniya stsepleniya i bolee optimal'nykh skhem soedineniya tyagovykh elektrodvigatelye]: research report (final) : 108–82 / All-Russian Research and Design-Engineering Institute of Rolling Stock; E. A. Sitnikov, I. N. Rodionov, V. P. Grinevich. Kolomna, 1982. 83 p.
 10. Methods for searching design of traction drive of locomotive with minimal losses of power in operation [Metody poiska konstruksii tyagovogo privoda lokomotiva s minimal'nymi poteryami energii v ekspluatatsii] / V. I. Vorobyev, S. G. Volokhov, O. V. Izmerov, V. O. Korchagin // Energy and resource-saving — XXI century: proceedings of the 12th International research and practice internet-conference, Orel, 15 March — 30 June 2014. Orel : State University — Educational-Research and Production Complex, 2014. Pp. 162–166.
 11. Combined electro magnetic brake and traction increasing device / E. E. Ries : патент US 414996 USA. 12.11.1889.
 12. Device for increase of adhesion between driving wheels of locomotive and rails [Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya vedushhikh koles lokomotiva s rel'sami] / V. I. Vorobyev, V. G. Novikov, O. V. Izmerov [et al.]: патент for utility model 163519 Russian Federation. No. 2015125762/11; filed 29.06.2015; publ. 20.07.2016, Bulletin No. 20.
 13. Electromagnetic traction increaser / D. E. Wehner : патент US 2198928 А USA. 02.12.1936.
 14. Device for increase of adhesion coefficient between driving wheels of locomotive and rails [Ustroystvo dlya povysheniya koeffitsienta stsepleniya vedushhikh koles lokomotiva s rel'sami] / I. L. Timofeev : inventor's certificate 362722 USSR. No. 1495782/27–11; filed 02.12.1970; publ. 20.12.1972, Bulletin No. 3, 1973.
 15. Device for increase of adhesion between driving wheels of locomotive and rails [Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya vedushhikh koles lokomotiva s rel'sami] / D. Ya. Antipin, V. I. Vorobyev, V. O. Korchagin [et al.] : патент 2717413 Russian Federation. No. 2019108915; filed 27.03.2019; publ. 23.03.2020, Bulletin No. 9.
 16. Device for increase of adhesion between driving wheels of locomotive and rails [Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya vedushhikh koles lokomotiva s rel'sami] / D. Ya. Antipin, V. I. Vorobyev, V. O. Korchagin [et al.] : патент 2717414 Russian Federation. No. 2019108916; filed 27.03.2019; publ. 23.03.2020, Bulletin No. 9.
 17. Electromagnetic adhesion means for railroad locomotives / K. Kucera : патент US 3307058 А USA. 20.01.1964.
 18. Magnetic booster of railway vehicle [Magnitnyy dogruzhatel' rel'sovogo transportnogo sredstva] / V. V. Mishin, V. A. Zyabrev, A. I. Lebedev [et al.] : inventor's certificate 1286453 USSR. No. 3803110, filed 16.10.1984; publ. 30.01.1987, Bulletin No. 4.
 19. Magnetic wheel / J. O. Heinze Jr. : патент US 709484 А USA. 24.02.1902.

- СССР. № 3253205; заявл. 18.02.1981; опубл. 15.04.1983, Бюл. № 14.
22. Устройство для увеличения давления колес транспортного средства на рельсы / В. И. Воробьев, Д. Я. Антипин, Д. А. Бондаренко [и др.] : патент на полезную модель 171138 Российская Федерация. № 2016124242; заявл. 17.06.2016; опубл. 22.05.2017, Бюл. № 15.
 23. Устройство для предотвращения буксования локомотива / Д. Я. Антипин, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.] : патент на полезную модель 172641 Российская Федерация. № 2016117354; заявл. 04.05.2016; опубл. 18.07.2017, Бюл. № 20.
 24. Устройство для увеличения нагрузки на оси рельсового транспортного средства / В. Л. Салов, В. Б. Шацкин, В. Н. Дорожкин : авторское свидетельство 653159 СССР. № 3600604/27–11; заявл. 03.06.1983; опубл. 15.09.1984, Бюл. № 34.
 25. Антипин Д. Я., Измеров О. В., Жилов П. Д. Проблемы создания энергосберегающего тягового привода // Вестник БГТУ. 2021. № 3 (100). С. 25–38. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-3-25-38. ISSN 1999–8775.
 26. Устройство для предотвращения буксования локомотива / В. И. Воробьев, Д. Я. Антипин, А. А. Пугачев [и др.] : патент на полезную модель 156444 Российская Федерация. № 2015109505/11; заявл. 18.03.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.
 27. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / Д. Я. Антипин, В. И. Воробьев, М. А. Маслов [и др.] : патент на полезную модель 187030 Российская Федерация. № 2017138305; заявл. 02.11.2017; опубл. 14.02.2019, Бюл. № 5.
 28. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / А. С. Космодамианский, В. И. Воробьев, О. В. Измеров [и др.] : патент на полезную модель 202706 Российская Федерация. № 2020132322; заявл. 01.10.2020; опубл. 03.03.2021, Бюл. № 7.
 29. Group traction drive as means to increase energy efficiency of lokomotives of open-pit transport / D. Ya. Antipin, O. V. Izmerov, S. G. Bishutin, V. V. Kobishchanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Issue 8. DOI: 10.1088/1755–1315/87/8/082004.
 30. Курбасов А. С. Повышение работоспособности тяговых электродвигателей. Москва : Транспорт, 1977. 223 с.
 31. Ивахин А. И. Варианты реализации и динамические свойства асинхронного тягового локомотива с дугостаторными электродвигателями // Тяжелое машиностроение. 2012. № 10. С. 17–21. ISSN 1024–7106.
 32. Устройство для увеличения сцепления ведущих колес локомотива с рельсами / В. И. Воробьев, О. В. Измеров, А. С. Космодамианский : патент на полезную модель 208748 Российская Федерация. № 2021127785; заявл. 22.09.2021; опубл. 10.01.2022, Бюл. № 2.
 20. Locomotive wheelset [Kolesnaya para lokomotiva] / E. V. Slivinskiy, A. A. Zaytsev, S. V. Brovko, E. I. Vorobyev : patent 2246406 Russian Federation. No. 2003123014/11; filed 21.07.2003; publ. 20.02.2005, Bulletin No. 5.
 21. Device for increase of pressure from vehicle wheels on rails [Ustroystvo dlya uvelicheniya davleniya koles transportnogo sredstva na rel'sy] / V. L. Salov: inventor's certificate 1011422 USSR. No. 3253205; filed 18.02.1981; publ. 15.04.1983, Bulletin No. 14.
 22. Device for increase of pressure from vehicle wheels on rails [Ustroystvo dlya uvelicheniya davleniya koles transportnogo sredstva na rel'sy] / V. I. Vorobyev, D. Ya. Antipin, D. A. Bondarenko [et al.] : patent for utility model 171138 Russian Federation. No. 2016124242; filed 17.06.2016; publ. 22.05.2017, Bulletin No. 15.
 23. Device for prevention of locomotive wheelspin [Ustroystvo dlya predotvrashheniya buksovaniya lokomotiva] / D. Ya. Antipin, V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov [et al.] : patent for utility model 172641 Russian Federation. No. 2016117354; filed 04.05.2016; publ. 18.07.2017, Bulletin No. 20.
 24. Device for increase of loading on axles of railway vehicle [Ustroystvo dlya uvelicheniya nagruzki na osi rel'sovogo transportnogo sredstva] / V. L. Salov, V. B. Shatskin, V. N. Dorozhkin : inventor's certificate 653159 USSR. No. 3600604/27–11; filed 03.06.1983; publ. 15.09.1984, Bulletin No. 34.
 25. Antipin D. Ya., Izmerov O. V., Zhilov P. D. Problems in development of energy-saving traction drive [Problemy sozdaniya energosberegayushhego tyagovogo privoda] // Bulletin of Bryansk State Technical University. 2021. No. 3 (100). Pp. 25–38. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-3-25-38. ISSN 1999–8775.
 26. Device for prevention of locomotive wheelspin [[Ustroystvo dlya predotvrashheniya buksovaniya lokomotiva] / V. I. Vorobyev, D. Ya. Antipin, A. A. Pugachev [et al.] : patent for utility model 156444 Russian Federation. No. 2015109505/11; filed 18.03.2015; publ. 10.11.2015, Bulletin No. 31.
 27. Device for increase of adhesion between locomotive driving wheels and rails [Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya vedushhikh koles lokomotiva s rel'sami] / D. Ya. Antipin, V. I. Vorobyev, M. A. Maslov [et al.] : patent for utility model 187030 Russian Federation. No. 2017138305; filed 02.11.2017; publ. 14.02.2019, Bulletin No. 5.
 28. Device for increase of adhesion between locomotive driving wheels and rails [Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya vedushhikh koles lokomotiva s rel'sami] / A. S. Kosmodamianskiy, V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov [et al.] : patent for utility model 202706 Russian Federation. No. 2020132322; filed 01.10.2020; publ. 03.03.2021, Bulletin No. 7.
 29. Group traction drive as means to increase energy efficiency of lokomotives of open-pit transport / D. Ya. Antipin, O. V. Izmerov, S. G. Bishutin, V. V. Kobishchanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Issue 8. DOI: 10.1088/1755–1315/87/8/082004.
 30. Kurbasov A. S. Increase of performance of electric traction motors [Povyshenie rabotosposobnosti tyagovykh elektrodvigateley]. Moscow : Transport, 1977. 223 p.
 31. Ivahin A. I. Implementation variations of asynchronous traction drive lokomotives with arcstator electric motors and its dynamic properties [Varianty realizatsii i dinamicheskie svoystva asinkhronnogo tyagovogo lokomotiva s dugostatornymi elektrodvigatelyami] // Heavy machinery. 2012. No. 10. Pp. 17–21. ISSN 1024–7106.
 32. Device for increase of adhesion between locomotive driving wheels and rails [Ustroystvo dlya uvelicheniya stsepleniya vedushhikh koles lokomotiva s rel'sami] / V. I. Vorobyev, O. V. Izmerov, A. S. Kosmodamianskiy: patent for utility model 208748 Russian Federation. No. 2021127785; filed 22.09.2021; publ. 10.01.2022, Bulletin No. 2.

Объем статьи 1,2 авторских листа

УДК 656.222

Николай Андреевич Тушин, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Кирилл Максимович Тимухин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,
Татьяна Андреевна Смородинцева, ассистент кафедры «Станции, узлы и грузовая работа» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЗЕРВЫ УСКОРЕНИЯ ОБОРОТА ВАГОНА НА МАЛОДЕЯТЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ

Nikolay Andreevich Tushin, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Kirill Maximovich Timukhin, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,
Tatyana Andreevna Smorodintseva, Assistant Lecturer, Stations, Junctions and Freight Work Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Dynamic reserves for acceleration of car turnover on low-active sections

Аннотация

Политика клиентоориентированности предусматривает переход в системе продаж от модели продуктовой специализации к модели продуктовой интеграции — заказчикам транспортной услуги необходимо предлагать комплексный пакет под ключ. Такая задача требует сегментации клиентов. При этом основное внимание, естественно, уделяется крупным грузовладельцам, формирующим финансовый результат, и для них настраиваются специализированные технологические продукты. В то же время на малодеятельных участках расположены производства с небольшими объемами отгрузки. В данном случае политика сокращения издержек на содержание инфраструктуры усложняет транспортное обслуживание, приводит к увеличению совокупной стоимости перевозок и, как следствие, к переориентации грузопотоков на автотранспорт. Поэтому в отношении малодеятельных участков необходимо разрабатывать отдельные транспортные продукты. Снизить себестоимость перевозок можно за счет предложения комплексного транспортно-логистического обслуживания одновременно для всех предприятий участка. В статье рассматривается один из способов снижения стоимости транспортно-логистических услуг на основе активизации динамических резервов, а также предлагается методика планирования и расчета эффекта.

Ключевые слова: комплексное транспортно-логистическое обслуживание, динамические резервы, малодеятельные участки, клиентоориентированность, оборот вагона.

Abstract

Service culture policy assumes a transition in the sales system from a model of product specialization to a model of product integration. This means that it is necessary to offer customers a complex turnkey package of services. Such a task needs segmentation of clients. Meanwhile, the main attention is obviously paid to big cargo owners that form a financial result and for them specialized technological products are customized. At the same time, on low-active sections there are enterprises with small volumes of shipment. In this case the policy of cost reduction on infrastructure maintenance complicates transport service, leads to increase of total cost of transportation and, as a sequence, to redirection of freight traffic to motor transport. That is why, for low-active sections it is necessary to develop separate transport products. It is possible to decrease traffic handling costs by implementation of complex forwarding service simultaneously for all enterprises located on a low-active section. The paper considers one of the methods for decreasing costs of forwarding service on the basis of activation of dynamic reserves. Moreover, the authors propose a method of planning and effect calculation.

Keywords: complex forwarding service, dynamic reserves, low-active sections, service culture, car turnover.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-59-64

59

Апрель – Июнь

ВВЕДЕНИЕ

Рынок грузовых железнодорожных перевозок активно развивается. Растут перевозки массовых грузов, прежде всего угля на экспорт. Хорошую динамику демонстрируют контейнерные перевозки. Широкое распространение получила практика курсирования грузовых маршрутов по расписанию и ускоренным ниткам графика. Вслед за ростом рынка под влиянием конкуренции формируются разнообразные транспортно-логистические продукты. Для повышения конкурентоспособности железнодорожных перевозок в холдинге «РЖД» меняется система продаж [1, 2], осуществляется переход от модели продуктовой специализации к модели продуктовой интеграции. Это требует изменений в управлении бизнесом — актуальность приобретают формирование единого центра, ответственного за результаты, и планирование совместного использования ресурсов. С научной точки зрения ставится задача активизации динамических резервов.

Проблемным моментом остается отсутствие системы сегментирования клиентов в каждом виде перевозок. Ключевыми клиентами становятся такие грузовладельцы, требования которых технологически проще реализовать и получить при этом финансовый результат. Клиенты с небольшими объемами перевозок из приоритета выпадают. В результате затраты на транспортировку возрастают, это приводит к тому, что грузоотправители выбирают перевозки не железнодорожным, а автомобильным транспортом. Еще одна проблема обусловлена географическим аспектом перевозок — наблюдается тенденция к концентрации грузопотоков на отдельных направлениях, в частности, наиболее востребованным маршрутом становится Восточный полигон. На таких направлениях обостряется конкуренция за пропускные способности, а ценовой фактор уходит на второй план. Наряду с высокой загрузкой отдельных направлений на малодеятельных участках наблюдается сокращение объемов погрузки. Отчасти это происходит по причине переключения грузопотока на автотранспорт из-за снижения качества обслуживания и роста издержек, связанных с замедлением оборота вагона. Потеря грузопотока в капиллярах в конечном счете приведет к снижению загрузки артерий. Выделение грузоотправителей на малодеятельных участках в отдельный рыночный сегмент и настройка продуктового предложения становятся актуальной задачей политики клиентоориентированности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одну из задач, возникающих при создании пакета услуг с акцентом на конкурентоспособности, можно сформулировать как сокращение издержек за счет активизации динамических резервов управления [3]. В условиях рыночной экономики предприятия находятся в поиске не только доступа к дефицитным ресурсам и льготным тарифам, но и способов постоянного снижения внутренних издержек. Один из таких способов — процесс включения поставщиков-конкурентов или потребителей-конкурентов в общие технологические цепочки. Если у различных грузоотправителей возникает потребность в однородном подвижном составе, то появляется возможность сократить вагонный парк за счет организации обезличенного оборота и диспетчерского управления (динамические резервы первого рода). Для реализации

такой задачи необходимо либо оформлять грузовые документы на одного грузоотправителя на разных станциях, либо передавать перевозки под контроль одного логистического оператора.

На транспорте экспедиторские предприятия все чаще выполняют функцию системного интегратора [4, 5]. Соответственно центральной задачей становится формирование востребованного транспортного продукта [6]. Логистические цепи планируются по критериям стоимости, времени и сохранности грузов. При этом на практике все три критерия важны, но с различными приоритетами. Стоимость доставки груза по маршруту зависит не только от величины инфраструктурных тарифов как за груженный, так и за порожний рейс, но и от платы за использование вагонов. Плата за вагоны привязана к сроку доставки и определяется с помощью суточной ставки аренды вагона [7]. Третья составляющая стоимости железнодорожной доставки — сборы и штрафы за нахождение вагона на грузовых станциях. Для этой составляющей тоже необходимо прогнозировать срок нахождения вагонов под грузовыми операциями и на станциях примыкания. При планировании комплексного обслуживания с привлечением различных участников в первую очередь следует оценивать оборот вагона.

Можно выделить такую особенность организации перевозок на железнодорожном транспорте, как расхождение между сроками, закрепленными в «Правилах перевозок грузов железнодорожным транспортом», и технологическими сроками на выполнение соответствующих операций по доставке груза. При этом необходимо отметить, что транспортно-экспедиционные компании ориентируются на нормативы, закрепленные в вышеупомянутом нормативно-правовом акте. В «Правилах исчисления сроков доставки грузов, порожних грузовых вагонов железнодорожным транспортом» законодателем при установлении нормативных сроков используются нормы суточного пробега, и нормативный срок зачастую оказывается больше технологического. Но бывают и исключения. Приведем такой пример из практики. От станции Ревда до станции Верхний Уфалей, согласно плану, сначала формируется вывозной поезд до станции Екатеринбург-Сортировочный, далее сквозной — до станции Челябинск-Главный и далее сборный — до Верхнего Уфалея. Время в пути при таком маршруте составляет около 3 сут, хотя при перевозке автотранспортом это всего 130 км. Отсюда можно сделать вывод, что на данном направлении железнодорожный транспорт проигрывает автомобильному. Поэтому при подготовке конкурентоспособного коммерческого предложения следует ориентироваться именно на технологический, а не на нормативный срок.

Технологический срок перевозки — это нормативное время доставки груза по маршруту с реальными технологическими операциями в пути следования. Один из вариантов расчета технологического срока доставки груза представлен на рис. 1.

На практике при доставке грузов реальные сроки могут отличаться не только от нормативных, но и от технологических, поскольку отсутствует возможность нивелировать внешнее «хаотичное» воздействие на процесс перемещения груза. Анализ расхождения вышеупомянутых сроков может выполняться по технологии прогнозной аналитики, а также с привлечением инструментария bigdata.

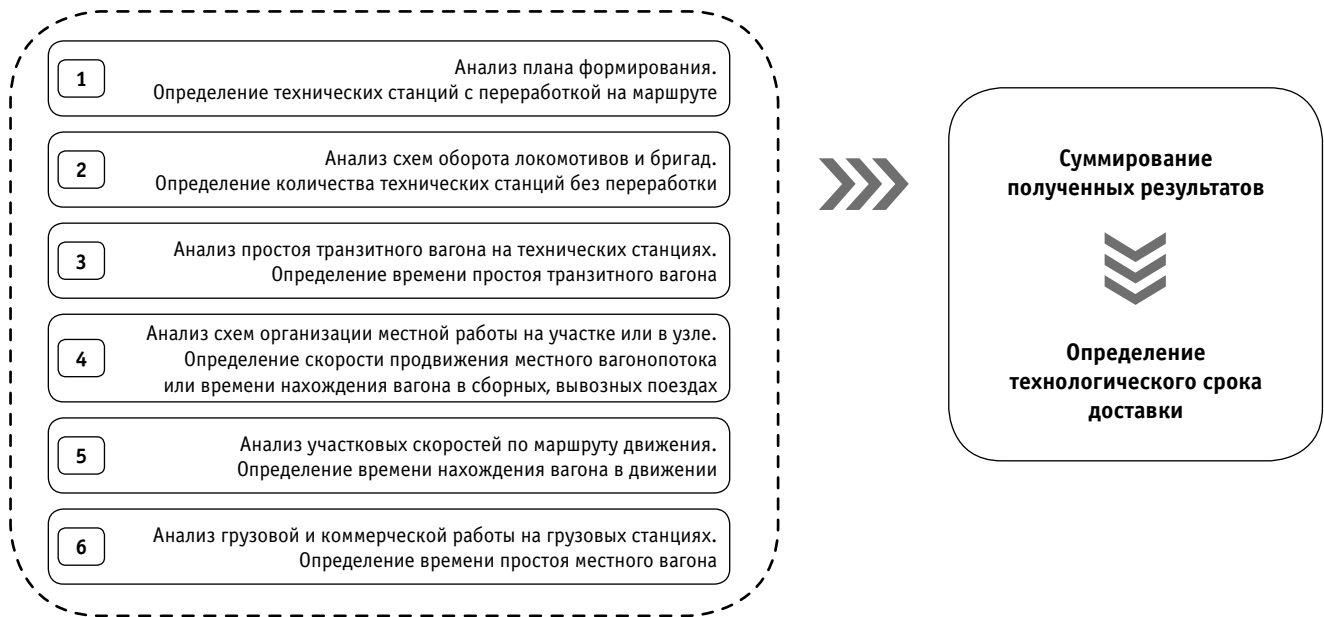


Рис. 1. Расчет технологического срока доставки грузов

РАСЧЕТ ПОТРЕБНОГО ПАРКА ВАГОНОВ

Чтобы рассчитать технологический срок доставки для выявления динамического резерва при взаимодействии однородного потока на малоделятельном участке Свердловской железной дороги, рассмотрим перевозку круглого леса. Доставка осуществляется непосредственно с места заготовки на предприятия по лесопереработке. Небольшие лесозаготовители столкнулись с проблемой нехватки специализированного подвижного состава и повышения стоимости перевозки. Причиной послужил переход на частный парк вагонов, поэтому автотранспорт стал успешно конкурировать на данном направлении. Для решения задачи по возвращению объемов на железнодорожный транспорт потребовался анализ технологии доставки лесного сырья. Исходными данными послужили среднемесячные показатели погрузки за прошлые периоды (табл. 1).

На рис. 2 представлены результаты анализа плана формирования участка Егоршино — Устье-Аха. Анализ выполняли с применением кодов сетевой разметки, также была использована служебная книга дорожного плана формирования. Транзитные станции и категории поездов устанавливались для каждой струи вагонопотока.

Таблица 1

Месячная корреспонденция вагонопотоков, ваг.

Из \ На	СО	КР	СУ	БА	ЛОБ	ЛЯ	ТУ	ТЮ	Итого
УА	–	–	76	20	–	–	41	19	156
МО	87	–	48	–	–	–	14	15	164
КУ	16	4	78	61	–	–	39	23	221
ЛО	1	–	4	–	–	–	–	5	10
ТУ	12	–	2	6	–	–	–	14	34
ВОН	–	1	–	–	14	–	–	–	15
КО	10	2	–	–	16	–	–	–	28
КОН	6	2	–	–	6	–	–	–	14
АГ	2	–	–	–	6	–	–	2	10
АЛ	–	–	–	–	–	26	–	–	26
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РЗ	2	–	–	–	35	–	–	–	37
ПЕ	–	–	–	–	25	–	–	–	25
АН	12	8	1	6	–	6	–	13	46
КА	6	4	–	2	18	–	–	–	30
ЛОБ	–	–	10	–	–	–	–	–	10
ЛЯ	1	10	4	15	14	–	–	20	64
ВЕ	6	2	23	–	3	–	–	1	35
КЫ	5	14	18	–	–	–	–	–	37
ХА	10	1	3	1	–	–	–	–	15
СА	14	3	17	1	–	–	–	3	38
ВО	4	1	5	–	–	–	–	–	10
ЮК	21	–	–	–	–	–	–	55	76
ЕР	2	7	–	2	–	–	–	–	11
Итого	217	59	289	114	137	32	94	170	1112

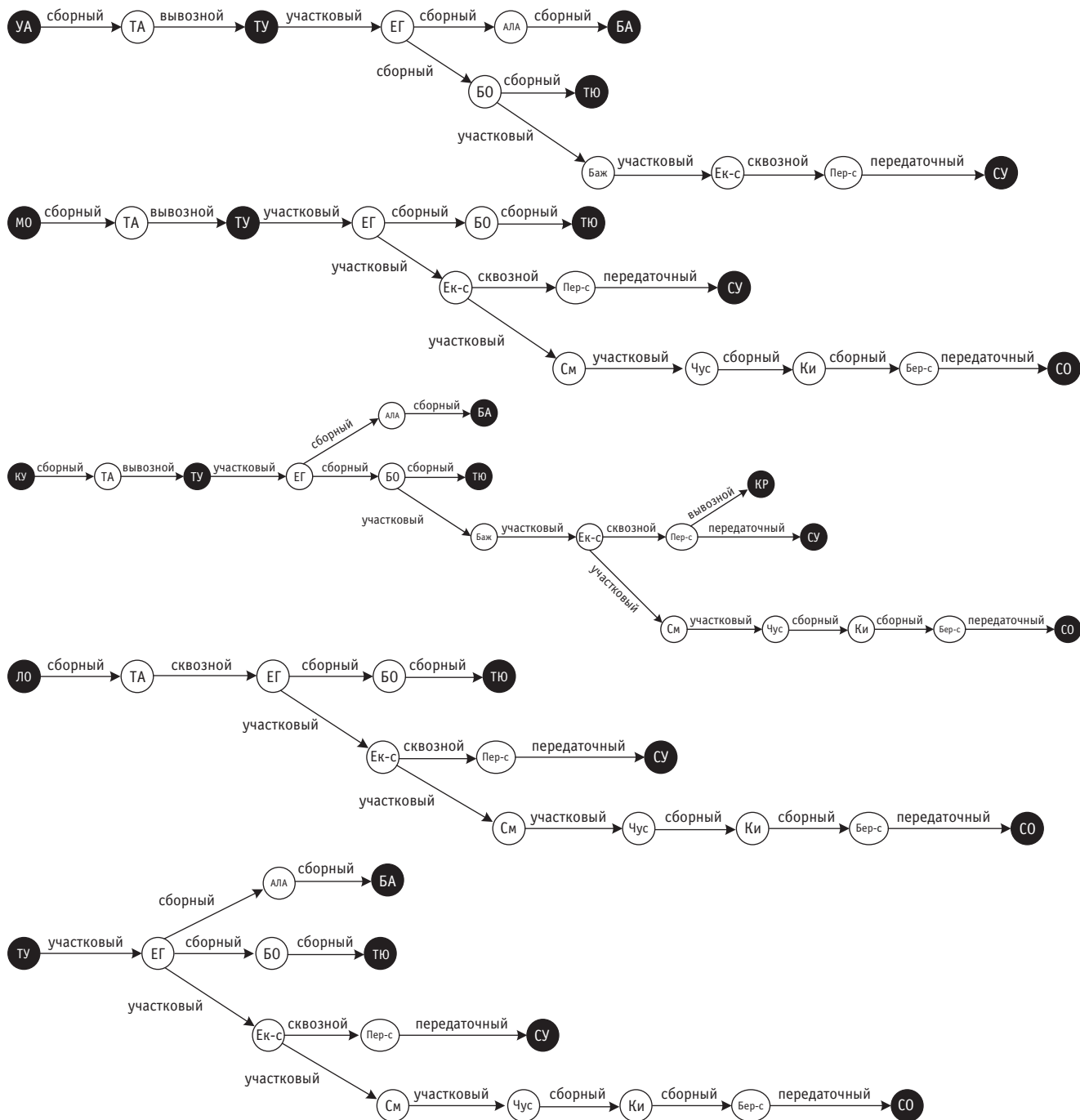


Рис. 2. План формирования грузовых поездов

При анализе схемы тягового обслуживания определяются станции для обработки транзитных поездов без переработки. Далее при помощи отчетных данных формируется таблица вагоно-часов простоя на технических станциях и рассчитывается фактическое время простоя вагона под одной грузовой операцией.

Время в пути ($t_{дв}$) определяется на участках с тепловозной и электрической тягой и при учете участковой скорости:

$$t_{дв} = \frac{L}{V_{уч}}$$

где L — длина направления, км;

$V_{уч}$ — участковая скорость на направлении, км/ч.

Определим время доставки на примере вагонопотока Устье-Аха — Тюмень:



для тепловозной тяги

$$t_{\text{дв}}^{\text{УА-ЕГ}} = \frac{426}{36,9} = 11,52 \text{ ч;}$$

для электротяги

$$t_{\text{дв}}^{\text{ЕГ-ТЮ}} = \frac{336}{38,3} = 8,77 \text{ ч;}$$

общее время доставки

$$t_{\text{дв}}^{\text{общ}} = 11,52 + 8,77 = 20,29 \cdot 2 = 40,58 \text{ ч.}$$

Наиболее точный расчет получим, если просуммируем время в пути по каждому участку. Среднюю участковую скорость некорректно использовать для расчета сроков доставки сборными поездами, так как необходимо закладывать еще и время работы на промежуточных станциях.

Время оборота вагона по заданным корреспонденциям приведено в табл. 2.

Потребный парк вагонов для выполнения заданного объема погрузки рассчитаем по формуле

$$n_p = U_{\text{п}} \cdot \theta,$$

где $U_{\text{п}}$ — объем погрузки в сутки, ваг.;

θ — оборот вагона, сут.

Данные расчетов сведены в табл. 3.

Результаты расчета потребного парка в табл. 3 не округлены до целого числа и позволяют провести анализ динамических резервов. Если полученные значения по каждой корреспонденции округлить в большую сторону, то итог по таблице составит 313 вагонов. Если сложить дробные итоги и округлить полученную сумму до целой величины, то размер потребного парка составит 270 вагонов. Полученные результаты можно трактовать следующим образом. Грузоотправители, заключив договоры с компаниями-операторами на каждую отдельную перевозку, получают совокупные затраты на привлечение парка в 313 вагонов. Если транспортно-логистическая компания будет оказывать услугу для всех грузоотправителей, то за счет диспетчерского управления необходимы совокупные затраты на 270 вагонов. Вагонную составляющую в затратах на перевозку можно сократить на 14 %. Динамические резервы в представленном примере равны 43 вагонам. Эффект от объединения только двух струй в общий контур управления представлен на рис. 3.

Таблица 2

Сводная таблица значений оборота вагонов, сут

Изд \ На	СО	КР	СУ	БА	ЛОБ	ЛЯ	ТУ	ТЮ
УА	—	—	8,87	7,25	—	—	4,62	7,81
МО	9,28	—	8,50	—	—	—	4,59	7,05
КУ	10,02	11,90	10,02	6,79	—	—	4,16	7,43
ЛО	7,67	—	6,96	—	—	—	—	5,52
ТУ	7,60	—	7,03	5,61	—	—	—	5,58
ВОН	—	10,90	—	—	6,98	—	—	—
КО	8,90	10,31	—	—	5,77	—	—	—
КОН	8,73	10,17	—	—	5,60	—	—	—
АГ	8,35	—	—	—	5,84	—	—	7,20
АЛ	—	—	—	—	—	7,04	—	—
РЗ	10,24	—	—	—	7,74	—	—	—
ПЕ	—	—	—	—	6,89	—	—	—
АН	9,17	11,32	9,56	7,50	—	6,08	—	9,52
КА	7,62	9,03	—	5,91	4,49	—	—	—
ЛОБ	—	—	4,94	—	—	—	—	—
ЛЯ	6,74	8,91	7,14	7,31	7,03	—	—	6,99
ВЕ	6,05	8,22	6,45	—	3,05	—	—	5,74
КЫ	6,30	8,47	6,70	—	—	—	—	—
ХА	6,82	8,29	6,52	5,92	—	—	—	—
СА	5,06	6,07	4,31	5,29	—	—	—	4,69
ВО	6,32	7,80	6,03	—	—	—	—	—
ЮК	8,06	—	—	—	—	—	—	5,03
ЕР	9,77	11,19	—	5,26	—	—	—	—

Таблица 3

Сводная таблица значений потребного парка вагонов, ваг.

Изд \ На	СО	КР	СУ	БА	ЛОБ	ЛЯ	ТУ	ТЮ
УА	—	—	22,44	4,86	—	—	6,33	4,92
МО	26,91	—	13,6	—	—	—	2,16	3,53
КУ	5,31	1,55	26,05	13,78	—	—	5,41	5,72
ЛО	0,23	—	0,9	—	—	—	—	0,94
ТУ	3,04	—	0,49	1,12	—	—	—	2,62
ВОН	—	0,33	—	—	3,28	—	—	—
КО	2,94	0,72	—	—	3,06	—	—	—
КОН	1,75	0,71	—	—	1,12	—	—	—
АГ	0,58	—	—	—	1,17	—	—	0,50
АЛ	—	—	—	—	—	6,12	—	—
РЗ	0,72	—	—	—	9,06	—	—	—
ПЕ	—	—	—	—	5,72	—	—	—
АН	3,67	3,06	0,29	1,5	—	1,22	—	0,43
КА	1,52	1,17	—	0,41	2,69	—	—	—
ЛОБ	—	—	1,48	—	—	—	—	—
ЛЯ	0,2	2,94	0,93	3,66	3,3	—	—	4,68
ВЕ	1,21	0,58	4,97	—	0,31	—	—	0,17
КЫ	1,07	3,98	4,02	—	—	—	—	—
ХА	2,25	0,25	0,65	0,18	—	—	—	—
СА	2,38	0,61	2,46	0,16	—	—	—	0,47
ВО	0,82	0,23	1,03	—	—	—	—	—
ЮК	5,64	—	—	—	—	—	—	9,20
ЕР	0,68	2,57	—	0,37	—	—	—	—

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сформулировать принцип определения динамических резервов при взаимодействии однородных потоков.

При среднесуточной погрузке по отдельному контракту или корреспонденции за месяц (U_n^i) и обороте вагона (θ^i) потребный рабочий парк рассчитывается следующим образом:

$$n_p^i = U_n^i \cdot \theta^i, \text{ ваг.}$$

Результат, полученный по вышеприведенной формуле, как правило, дробное число. Число вагонов дробным быть не может, поэтому в расчетах принято округлять физические величины в большую сторону до целого числа. В действительности это означает, что часть времязаконоданных вагонов будут простаивать, так как план погрузки уже выполнен. Получается, что фактическая величина оборота вагона становится больше расчетной из-за дополнительного простоя. Чтобы получить эффект от эксплуатации привлеченного вагонного парка, лучше использовать резерв для других, дополнительных, контрактов. Снизить дополнительные простои

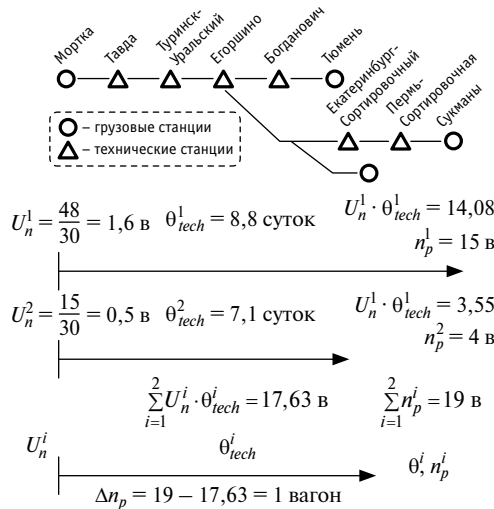


Рис. 3. Пример расчета динамического резерва

можно только до времени, необходимого на выполнение всех технологических операций. Введя понятие расчетного технологического оборота вагона (θ_{tech}^i), определим величину динамического резерва первого рода:

$$\Delta n_p = \sum_{i=1}^m n_p^i - \sum_{i=1}^m U_n^i \cdot \theta_{tech}^i, \text{ ваг.,}$$

где m — число включенных клиентов или корреспонденций в комплексный пакет услуг.

Таким образом, активизация динамических резервов при взаимодействии однородных потоков на малодеятельных участках позволяет высвободить вагонный парк либо снизить издержки на его привлечение.

Литература

1. Об утверждении Политики клиентоориентированности холдинга «РЖД» в области грузовых перевозок: распоряжение ОАО «РЖД» от 26.07.2016 г. № 1489р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456025278> (дата обращения: 15.12.2021).
2. Шило А. Н. Развивая транспортно-логистический бизнес // Железнодорожный транспорт. 2018. № 2. С. 14–19. ISSN 0044–4448.
3. Козлов П. А., Тушин Н. А., Колокольников В. С. Проблема организации единой транспортной системы // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 3. С. 748–755. ISSN 2411–1473.
4. Тушин Н. А., Козлов П. А. Системная интеграция в области перевозок // Железнодорожный транспорт. 2010. № 9. С. 68–70. ISSN 0044–4448.
5. Козлов П. А., Тушин Н. А. Экспедитор как системный интегратор в области перевозок грузов // Транспорт: наука, техника, управление. 2010. № 10. С. 13–16. ISSN 0236–1914.
6. Мурев Д. И. Современные методы коммуникаций на службе клиентоориентированности // Железнодорожный транспорт. 2017. № 4. С. 10–13. ISSN 0044–4448.
7. Тушин Н. А., Осокин О. В., Чумаков А. В. Операционные циклы транспортно-экспедиторских предприятий // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 24–28. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-24-28. ISSN 1815–9400.

References

1. On approval of service culture Policy of the «RZD» holding in the sphere of freight transportation [Ob utverzhenii Politiki klientoorientirovannosti kholdinga «RZhD» v oblasti gruzovykh perevozok]: Order of the JSC «RZD» dated 26.07.2016 No. 1489r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456025278> (access date: 15.12.2021).
2. Shilo A. N. Developing forwarding business [Razvivaya transportno-logisticheskiy biznes] // Railway Transport. 2018. No. 2. Pp. 14–19. ISSN 0044–4448.
3. Kozlov P. A., Tushin N. A., Kolokolnikov V. S. Problem of common transport system organization [Problema organizatsii edinoy transportnoy sistemy] // Modern Information Technology and IT-education. 2018. Vol. 14. No. 3. Pp. 748–755. ISSN 2411–1473.
4. Tushin N. A., Kozlov P. A. System integration in sphere of transportation [Sistemnaya integratsiya v oblasti perevozok] // Railway Transport. 2010. No. 9. Pp. 68–70. ISSN 0044–4448.
5. Kozlov P. A., Tushin N. A. Dispatcher as a system integrator in sphere of freight transportation [Ekspeditor kak sistemnyy integrator v oblasti perevozok gruzov] // Transport: science, equipment, management. 2010. No. 10. Pp. 13–16. ISSN 0236–1914.
6. Murev D. I. Modern methods of communication on duty of service culture [Sovremennye metody kommunikatsiy na sluzhbe klientoorientirovannosti] // Railway Transport. 2017. No. 4. Pp. 10–13. ISSN 0044–4448.
7. Tushin N. A., Osokin O. V., Chumakov A. V. Operating cycles of freight forwarding companies [Operatsionnye tsikly transportno-ekspeditorskikh predpriyatii] // Transport of the Urals. 2019. No. 1 (60). Pp. 24–28. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-24-28. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,66 авторских листа

УДК 656.21

Антон Алексеевич Кошеев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Елена Николаевна Тимухина, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Наталья Вячеславовна Кашеева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Николай Евгеньевич Окулов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Николай Васильевич Якушев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ И ТЕХНОЛОГИИ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ

Anton Alexeevich Koshheev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Elena Nikolaevna Timukhina, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Natalya Vyacheslavovna Kashheeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikolay Evgenyevich Okulov, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikolay Vasilyevich Yakushev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Development of variety of alternative solutions for selection of structural and technological parameters of railway stations

Аннотация

Выбор рациональных параметров структуры и технологии работы объектов железнодорожного транспорта в условиях изменения параметров транспортных потоков является актуальной задачей. Ее решение связано с формированием множества альтернатив, так как качество выбора напрямую зависит от качества сформированных вариантов. Анализ нормативной документации, теории и практики по разработке альтернативных решений показал, что существующие методики несовершенны. В статье предложены два оригинальных подхода к формированию альтернативных решений с применением имитационного моделирования и метода конференции идей: комбинированный и синтетический. Представлены результаты использования этих подходов для принятия альтернативных решений, направленных на совершенствование структуры и технологии работы железнодорожной станции.

Ключевые слова: железнодорожные станции, принятие решений, формирование альтернативных решений, имитационное моделирование, конференция идей, синтетический подход.

Abstract

Selection of rational structural and technological parameters of railway transport objects in conditions of changing traffic parameters is an actual task. This task is connected with development of a variety of alternatives because quality of decision making directly depends on quality of proposed options. Analysis of normative documentation, theory and practice of developing alternative solutions showed that currently used methods are not perfect and therefore need to be further developed. The paper proposes two original approaches to development of alternative solutions with the use of simulation modeling and the «Idea conference» method: combined and synthetic. The paper presents results of the use of the approaches for developing alternative solutions aimed at improving structure and operation technology of a railway station.

Keywords: railway stations, decision making, development of alternative solutions, simulation modeling, idea conference, synthetic approach.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-65-70

ВВЕДЕНИЕ

Создание резервов пропускной и перерабатывающей способности требует значительных инвестиций в развитие инфраструктуры железнодорожного транспорта и в совершенствование технологического процесса. Эффективность вложений зависит не только от корректности расчета параметров структуры и технологии работы объектов железнодорожного транспорта (в рамках данного исследования в качестве объектов рассматриваются железнодорожные станции), но и в значительной степени от методики принятия проектных решений, несовершенство которой может привести к экономическим потерям.

Однако, несмотря на риск принятия неэффективных решений, выбор параметров структурных элементов и технологии работы транспортных объектов производится с недостаточной точностью.

Существующий порядок выбора наиболее рационального варианта реализации инвестиционного проекта регламентируется «Методическими рекомендациями по составу разделов обоснования инвестиций и требований к их содержанию (включая расчет экономической эффективности) для инвестиционных проектов ОАО «РЖД»» [1]. В этих рекомендациях предложен такой подход к разработке альтернативных вариантов: «соответствуя принципам вариантного проектирования, а также ввиду практической невозможности в большинстве случаев сразу определить наиболее эффективный вариант реализации проекта, следует в рамках обоснований инвестиций разрабатывать не менее двух конкурентоспособных вариантов сооружений, различающихся конструктивной схемой, планом и профилем пути, организацией строительства, используемыми материалами и технологиями».

Необходимо также отметить, что в данном нормативном документе процесс формирования альтернативных решений остается нерегламентированным, т.е. результатом может стать потеря потенциально наиболее эффективного варианта.

Этот вывод подтверждается и анализом практики применения существующей методики, который показал, что в некоторых случаях недостаточная проработка альтернатив может привести к тому, что решения окажутся неработоспособными, или же к выбору неоптимальных решений и соответственно к экономическим потерям.

Таким образом, для повышения качества и эффективности принимаемых решений необходимо развивать методы формирования исходного множества альтернатив.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Формирование множества альтернатив — один из наиболее ответственных этапов процесса принятия решений и при этом представляющий собой сложную самостоятельную задачу. Однако, по мнению исследователей [2, 3], важность данной задачи при принятии решений недооценивается, хотя совершенно очевидно, что качество выбора ограничено качеством альтернатив.

Сегодня в практике принятия решений в сфере железнодорожного транспорта наибольшее распространение получили три группы методов формирования множества альтернатив: мор-

фологический анализ, генерирование решений с привлечением экспертов и разработка решений на основе результатов, полученных при использовании имитационного моделирования.

Морфологический анализ

Морфологический анализ предполагает рассмотрение каждой альтернативы в виде составных частей (элементов). Под элементами понимаются части, из которых условно состоит альтернатива. В качестве элементов могут выступать и некоторые измеряемые параметры, и отдельные структурные части альтернативы. Метод нашел применение при определении параметров структуры и технологии работы железнодорожных станций. Например, в [4, 5] подробно описана методика формирования перспективных вариантов развития структуры и технологического процесса парка приема сортировочной станции. В [6] представлен процесс формирования множества вариантов конфигурации и параметров новых железных дорог. Достоинство морфологического анализа — возможность генерации исчерпывающего множества альтернативных решений по развитию структуры, технического оснащения и технологии работы объекта железнодорожного транспорта. Недостаток метода — большая размерность множества альтернатив, приводящая к трудностям при расчете экономической и технологической эффективности рассматриваемых вариантов, так как расчеты связаны с большими затратами труда и времени.

Генерирование решений с привлечением экспертов

Формирование начального множества альтернатив с привлечением группы экспертов предусматривает возможность реализации творческого потенциала участников. Этот подход непосредственно связан с такими методами формирования исходного множества альтернатив, как мозговой штурм и конференция идей. Так как последний получил наибольшее распространение, рассмотрим процесс формирования альтернатив на его примере.

Конференция идей — это метод формирования множества альтернативных решений при помощи группы экспертов, задача которых состоит в том, чтобы за короткий промежуток времени сгенерировать множество идей. Важная особенность метода — творческая атмосфера, которая создается и обеспечивается определенными правилами: любая критика строго запрещена; поощрения поддерживаются; высказывание идей фиксируется без оглядки на их реализуемость — собираются все мнения, предложения, идеи. Предложенные решения оцениваются уже после проведения конференции идей.

Опыт формирования множества альтернативных решений с привлечением экспертов позволил выявить основные достоинства и недостатки данного метода. В рамках конференции идей создается более компактное начальное множество альтернатив, что позволяет снизить трудозатраты, связанные с оценкой эффективности альтернатив. Однако методу присущи и недостатки, связанные с трудностью подбора компетентных экспертов и сложностью автоматизации проведения экспертизы. Более того, формулируемые решения зачастую оказываются неработоспособными. Основная причина неудовлетворительных результатов — отсутствие информации о технико-экономических показателях работы исследуемого объекта.



Разработка решений на основе результатов имитационного моделирования

Формированию альтернативных решений с применением имитационного моделирования посвящено множество исследований [7–11].

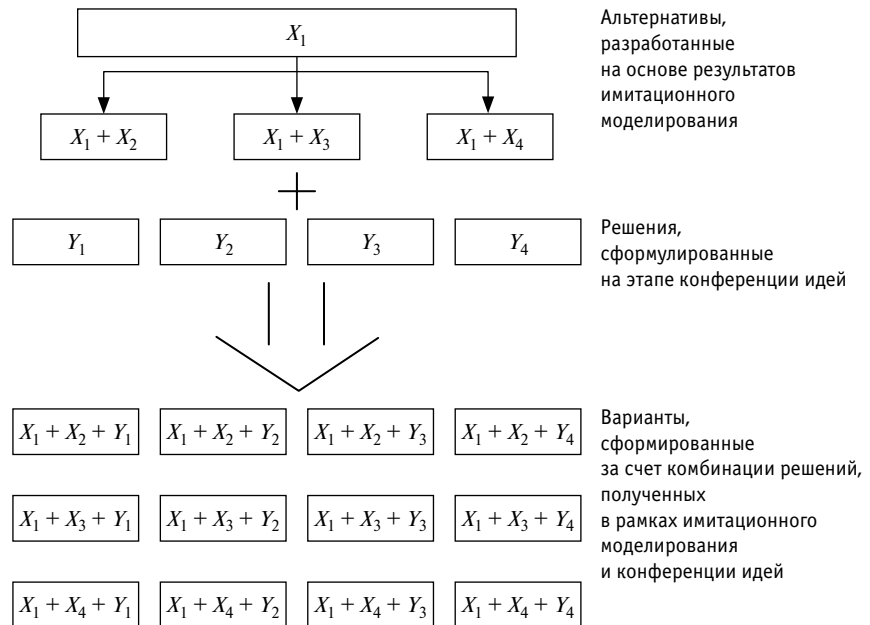
Использование имитационного моделирования в качестве основы для разработки решений позволяет повысить обоснованность и целенаправленность генерируемых альтернатив, что напрямую связано с достоинствами этого метода с точки зрения детализации описания, позволяющей отразить многочисленные особенности конкретного объекта исследования, и точности результатов проведенных расчетов. Однако, по мнению Р. Шеннона, существующий подход к планированию экспериментов, в рамках которого разрабатываются альтернативные решения, не гарантирует сходимости в точку глобального оптимума [12]. То есть реализация данного подхода может привести к принятию нерациональных решений и, как следствие, к неэффективным экономическим потерям.

Таким образом, из представленного обзора очевидно, что рассмотренный метод не лишены недостатков, поэтому, чтобы не допустить потери потенциально эффективных вариантов на данном этапе принятия решений, методику формирования множества альтернатив необходимо совершенствовать.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее перспективным направлением совершенствования методики формирования множества альтернатив является совместное использование методов моделирования и конференции идей, которое позволит, с одной стороны, уменьшить влияние их недостатков на окончательное решение, а с другой — максимально эффективно использовать преимущества обоих методов. В рамках обозначенного направления развития методики формирования альтернативных решений рассмотрим два подхода — комбинированный и синтетический.

Комбинированный подход предусматривает дополнение результатов имитационного моделирования вариантами, сформулированными на конференции идей. Для того чтобы учесть нестандартные решения экспертов и не упустить



Альтернативы, разработанные на основе результатов имитационного моделирования

Решения, сформулированные на этапе конференции идей

Варианты, сформированные за счет комбинации решений, полученных в рамках имитационного моделирования и конференции идей

Рис. 1. Формирование решений на основе комбинации альтернатив, определенных на этапе имитационного моделирования и в процессе конференции идей

наиболее эффективные из них на этапе сужения множества альтернатив, их дополняют работоспособными вариантами, выработанными на этапе имитационного моделирования. Таким образом, за счет комбинации решений формируется дополнительное множество альтернатив (рис. 1).

Однако формальное дополнение альтернатив, сформированных на этапе конференции идей, решениями, выработанными на этапе моделирования, может привести к избыточности вариантов согласования структуры и технологии работы транспортной системы и соответственно к потере потенциально эффективного решения. Для оценки избыточности альтернатив сформированное множество решений дополняется вариантами, которые позволяют определить работоспособность рассматриваемого объекта при исключении отдельных мероприятий, формирующих альтернативное решение.

Синтетический подход предусматривает формирование решений с применением и имитационного моделирования, и конференции идей при минимизации недостатков каждого из методов.

Для реализации синтетического подхода разработан соответствующий алгоритм (рис. 2), уникальная особенность которого — возможность формирова-

ния решений, направленных как на повышение пропускной и перерабатывающей способности, так и на поиск вариантов устранения избыточной мощности устройств на станции. Например, для повышения качества генерируемых решений на этапе конференции идей экспертам предоставляется информация об «узких местах» работы станции (см. рис. 2, блоки 3 и 10) и выдаются специально разработанные классификаторы решений. Фрагмент одного из классификаторов приведен в табл. 1.

Использование конференции идей совместно с методом моделирования позволяет минимизировать риск попадания в точку локального оптимума. А выполнение операции «Формирование множества физически реализуемых решений» благодаря участию экспертов дает возможность на раннем этапе исключить варианты, которые невозможно осуществить, что снижает трудозатраты на проведение исследования.

После того как множество физически реализуемых альтернатив определено, оно проверяется на соответствие ограничению по перерабатывающей способности (см. рис. 2, блоки 7 и 15). Альтернативы попадают во множество работоспособных решений, только если они удовлетворяют ограничению.

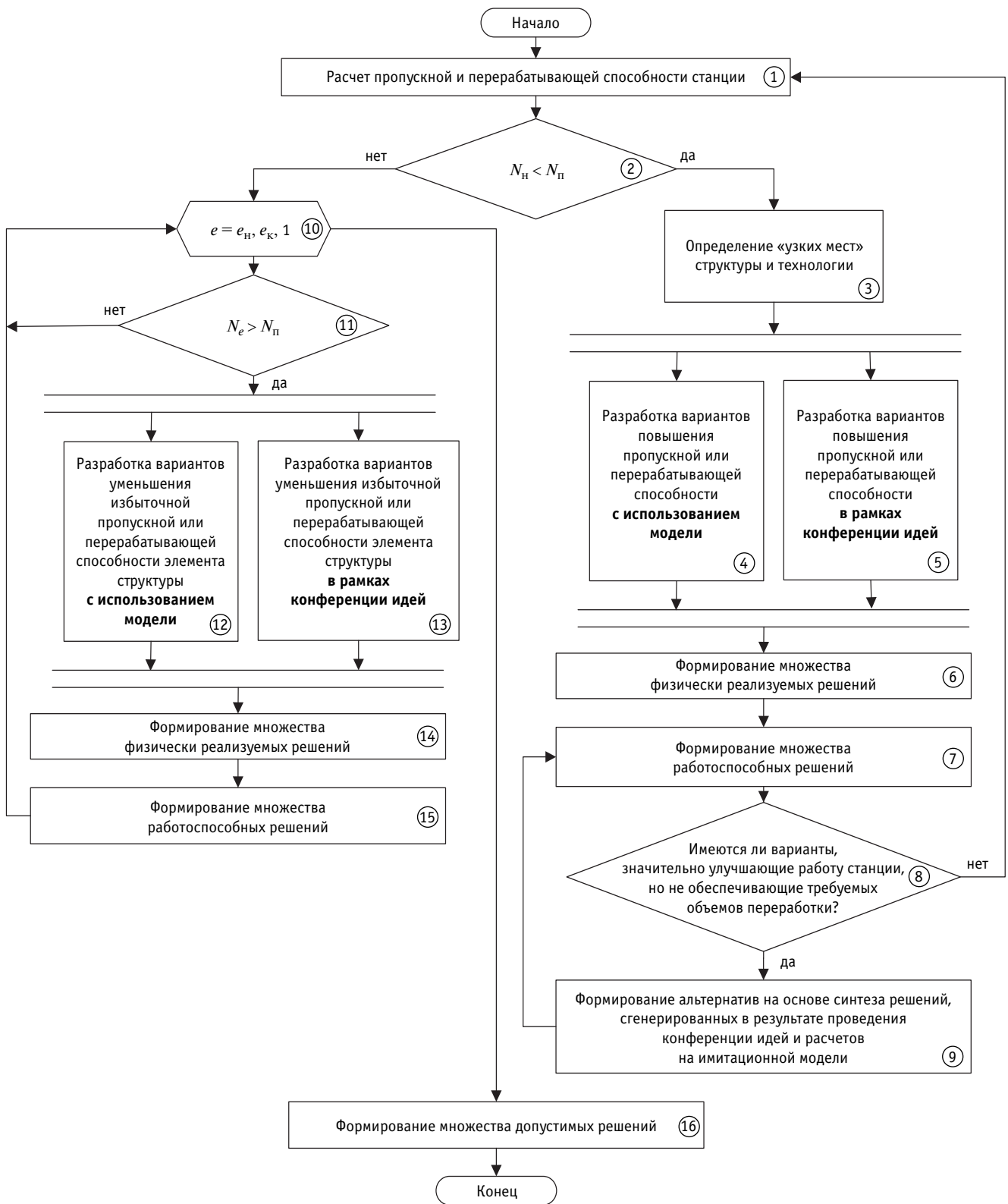


Рис. 2. Алгоритм формирования множества допустимых альтернатив на основе синтетического подхода:

N_H — наличная перерабатывающая способность станции, ваг.; N_P — необходимая перерабатывающая способность станции, ваг.;

N_e — наличная перерабатывающая способность e -го элемента;

e_n — элемент, с которого начинается работа цикла; e_k — количество элементов в структуре станции

Таблица 1

Фрагмент классификатора решений по повышению пропускной или перерабатывающей способности элементов структуры

Элемент структуры с недостаточной пропускной или перерабатывающей способностью	Загрузка по результатам моделирования	Решение, связанное с изменением структуры	Решение, связанное с изменением технологии
Одиночный стрелочный перевод или группа стрелочных переводов	Средняя	–	Изменение специализации путей в парке
	Высокая	Реконструкция горловины для повышения ее маневренности и параллельности выполняемых операций	Перенос части работы в другую горловину

Таблица 2

Сравнение эффективности методик формирования альтернативных решений

Метод	Количество альтернатив		Качество сформированных альтернатив	
	рассчитываемых	рассматриваемых	Приведенные строительно-эксплуатационные расходы наиболее экономически эффективного варианта, млн руб.	Суммарные задержки технологических операций, обусловленные структурой наиболее технологически эффективного варианта, ч
Конференция идей	14	0	–	–
Комбинированный подход	36	12	753,164	74,92
Синтетический подход	25	8	753,164	64,67

Однако при выполнении операции необходимо обратить особое внимание на варианты, которые значительно улучшают работу станции, но не обеспечивают требуемые объемы переработки (см. рис. 2, блок 8). Формальная реализация этой операции может привести к потере потенциально эффективного решения, поэтому при выявлении перспективных альтернатив необходимо рассмотреть возможность их улучшения.

В результате работы алгоритма определяется множество допустимых альтернатив (см. рис. 2, блок 16).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ

Для апробации и оценки предложенных подходов к формированию альтернативных решений проведено исследование грузовой станции Осенцы Свердловской железной дороги со сложной структурой и нестандартным технологическим процессом.

В процессе исследования сформированы множества альтернативных решений по каждому из рассматриваемых подходов (табл. 2).

В результате использование синтетического подхода к формированию альтернативных решений по сравнению с комбинированным позволило снизить количество разрабатываемых вариантов модели станции Осенцы на 11 единиц, а вариантов, требующих расчета экономической и технологической эффективности, — на 4 единицы, что значительно сокращает затраты на проведение расчетов. Кроме того, на основе этого подхода сформировано более качественное множество решений с точки зрения технологической эффективности альтернатив.

Таким образом, разработанная методика формирования альтернативных решений, основанная на синтетическом подходе, позволила повысить качество генерируемых альтернатив и при этом сократить трудозатраты на их исследование. Как следствие, повышение качества разрабатываемых вариантов совершенствования железнодорожной станции значительно снизило риск принятия нерациональных решений.

Литература

1. Методические рекомендации по составу разделов обоснования инвестиций и требований к их содержанию (включая расчет экономической эффективности) для инвестиционных проектов ОАО «РЖД»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 17.12.2012 г. № 384р. Москва : ОАО «РЖД», 2012. 95 с.
2. Диксон Дж. Проектирование систем: изобретательство, анализ и принятие решений / Пер. с англ. Москва : Мир, 1969. 440 с.
3. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в волшебных странах. Москва : Логос, 2000. 296 с.
4. Bobrovskiy V. I., Kozachenko D. N., Vernygora R. V. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata // *Transport Problems*. 2014. Vol. 9. No. 3. Pp. 57–66. ISSN 1896–0596.
5. Функциональное моделирование работы железнодорожных станций : монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Р. В. Вернигора, В. В. Малашкин; ДНУЖТ. Днепропетровск, 2015. 269 с.
6. Быков Ю. А. Теория и практика прогнозирования облика и мощности новых железных дорог: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва : МГУПС, 1999. 320 с.
7. Adamko N., Klima V., Marton P. Designing railway terminals using simulation techniques // *International Journal of Civil Engineering*. 2010. Vol. 8. No. 1. Pp. 58–67.
8. Coordination of Parameters of Transport Elements System in the Conditions of Lack of Traffic and estimated capacity / E. Timukhina, O. Osokin, N. Tushin, A. Koshcheev // *Advances in Intelligent Systems and Computing 1116: VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. *TransSiberia 2019*, Vol. 2 / Editors Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Springer, 2020. Pp. 1133–1142.
9. Coordination of Parameters of Transportation System Elements / E. Timukhina, O. Osokin, V. Permikin, A. Koshcheev // *Advances in Intelligent Systems and Computing 1116: VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. *TransSiberia 2019*, Vol. 2 / Editors Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Springer, 2020. Pp. 633–642.
10. Технично-экономическое обоснование решений по повышению перерабатывающей способности обслуживающих устройств в системах железнодорожного транспорта / Е. Н. Тимухина, Н. В. Кащеева, Н. А. Афанасьева, А. А. Коцеев // *Транспорт Урала*. 2018. № 1 (56). С. 35–44. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-35-44. ISSN 1815–9400.
11. Construction of Efficient Railway Operating Domains Based on a Simulation Examination / A. Borodin, P. Kozlov, V. Kolokolnikov, O. Osokin // *Advances in Intelligent Systems and Computing 1116: VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. *TransSiberia 2019*, Vol. 2 / Editors Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Springer, 2020. Pp. 1143–1151.
12. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука / Пер. с англ. Москва : Мир, 1978. 418 с.

References

1. Guidelines on composition of sections for substantiation of investments and requirements to the content (including calculation of economic efficiency) for investment projects of the JSC «RZD» [Metodicheskie rekomendatsii po sostavu razdelov obosnovaniya investitsiy i trebovaniy k ikh sodержaniyu (vkluchaya raschet ekonomicheskoy effektivnosti) dlya investitsionnykh projektov ОАО «RZhD»]: approved by the Order of JSC «RZD» dated 17.12.2012 No. 384r. Moscow : JSC «RZD», 2012. 95 p.
2. Dixon J. R. Design Engineering: Inventiveness, Analysis and Decision Making [Proektirovanie sistem: izobretatel'stvo, analiz i prinyatie resheniy] / Translated from English. Moscow : World, 1969. 440 p.
3. Larichev O. I. Theory and methods of decision making and the Chronicle of events in magical countries [Teoriya i metody prinyatiya resheniy, a takzhe Khronika sobyitij v volshebnykh stranakh]. Moscow : Logo, 2000. 296 p.
4. Bobrovskiy V. I., Kozachenko D. N., Vernygora R. V. Functional simulation of railway stations on the basis of finite-state automata // *Transport Problems*. 2014. Vol. 9. No. 3. Pp. 57–66. ISSN 1896–0596.
5. Functional simulation for operation of railway stations [Funktional'noe modelirovanie raboty zheleznodorozhnykh stantsiy] : monograph / V. I. Bobrovskiy, D. N. Kozachenko, R. V. Vernygora, V. V. Malashkin; DNURT. Dni-propetrovsk, 2015. 269 p.
6. Bykov Yu. A. Theory and practice of forecasting appearance and capacity of new railways [Teoriya i praktika prognozirovaniya oblika i moshhnosti novykh zheleznykh dorog]: DSc in Engineering Thesis. Moscow : MIIT, 1999. 320 p.
7. Adamko N., Klima V., Marton P. Designing railway terminals using simulation techniques // *International Journal of Civil Engineering*. 2010. Vol. 8. No. 1. Pp. 58–67.
8. Coordination of Parameters of Transport Elements System in the Conditions of Lack of Traffic and estimated capacity / E. Timukhina, O. Osokin, N. Tushin, A. Koshcheev // *Advances in Intelligent Systems and Computing 1116: VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. *TransSiberia 2019*, Vol. 2 / Editors Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Springer, 2020. Pp. 1133–1142.
9. Coordination of Parameters of Transportation System Elements / E. Timukhina, O. Osokin, V. Permikin, A. Koshcheev // *Advances in Intelligent Systems and Computing 1116: VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. *TransSiberia 2019*, Vol. 2 / Editors Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Springer, 2020. Pp. 633–642.
10. Feasibility study of solutions aimed to increase the capacity of serving facilities in systems of railway transport [Tekhnico-ekonomicheskoe obosnovanie resheniy po povysheniyu pererabatyvayushhey sposobnosti ob-sluzhivayushhikh ustroystv v sistemakh zheleznodorozhnogo transporta] / E. N. Timukhina, N. V. Kascheeva, N. A. Afanasyeva, A. A. Koscheev // *Transport of the Urals*. 2018. No. 1 (56). Pp. 35–44. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-35-44. ISSN 1815–9400.
11. Construction of Efficient Railway Operating Domains Based on a Simulation Examination / A. Borodin, P. Kozlov, V. Kolokolnikov, O. Osokin // *Advances in Intelligent Systems and Computing 1116: VIII International Scientific Siberian Transport Forum*. *TransSiberia 2019*, Vol. 2 / Editors Z. Popovic, A. Manakov, V. Breskich. Springer, 2020. Pp. 1143–1151.
12. Shannon R. E. Systems Simulation — the Art and Science [Imitatsionnoe modelirovanie system — iskusstvo i nauka] / Translated from English. Moscow : World, 1978. 418 p.

Объем статьи 0,75 авторских листа

УДК 656.21

Антон Алексеевич Кошечев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Елена Николаевна Тимухина, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Наталья Вячеславовна Кашеева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Николай Евгеньевич Окулов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Николай Васильевич Якушев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

МЕТОДИКА УТОЧНЕНИЯ МНОЖЕСТВА ПАРЕТО НА ОСНОВЕ УЧЕТА СТОХАСТИЧНОСТИ КРИТЕРИАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

Anton Alexeevich Koshchev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Elena Nikolaevna Timukhina, DSc in Engineering, Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Natalya Vyacheslavovna Kashheeva, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikolay Evgenyevich Okulov, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Nikolay Vasilyevich Yakushev, PhD in Engineering, Associate Professor, Operations Management Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Method for clarification of Pareto set on the basis of consideration for stochasticity of criterial functions

Аннотация

Выбор рациональных структурно-технологических параметров объектов железнодорожного транспорта — одна из важнейших задач управления эксплуатационной работой. Как показал анализ, такой выбор осуществляется с недостаточной точностью, а значит, может привести к принятию нерациональных решений. Для повышения качества решений, направленных на развитие инфраструктуры и технологического процесса работы железнодорожных станций, предложено использовать бикритериальный подход. С целью снижения негативных последствий и риска выбора неэффективных альтернатив разработана методика уточнения множества Парето на основе учета стохастичности критериальных функций. Методика включает четыре последовательных этапа: расчет числовых характеристик выборочных совокупностей по выбранным критериям, корреляционный анализ, построение эллипсов рассеивания и однофакторный дисперсионный анализ. Для подтверждения эффективности предлагаемой методики в статье представлены результаты выбора наиболее рационального варианта повышения перерабатывающей способности грузовой железнодорожной станции.

Ключевые слова: железнодорожная станция, принятие решений, бикритериальный подход, множество Парето, стохастичность критериальных функций, эллипсы рассеивания.

Abstract

Selection of rational structural and technological parameters of railway transport objects is an important task in the sphere of operations control. The analysis of theory and practice showed that the selection of structural and technological parameters is carried out with insufficient accuracy and can lead to irrational decisions. In order to increase quality of decisions aimed at development of infrastructure and technology of railway stations the authors propose to use a bicriterial approach. For the decrease of negative subsequences and a risk of making irrational decisions the authors suggest a method for clarification of a Pareto set on the basis of consideration for stochasticity of criterial functions. The method includes the following steps: calculation of confidence interval for assessment of mathematical expectation, correlation analysis, construction of scattering ellipses and single-factor variance analysis. In order to confirm the efficiency of the suggested method the paper presents results of selection of the most rational variant for the increase of estimated capacity of a freight railway station.

Keywords: railway station, decision making, bicriterial approach, Pareto set, stochasticity of criterial functions, scattering ellipses.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-71-76

INTRODUCTION

A comparison of variants aimed at development of railway stations and lines at determination of the best solution is carried out with the use of a feasibility study. The goal of a feasibility study is an assessment of expediency of an invest project aimed at development of structure and technological process of the considered object. The assessment consists in the verification of its economic compliance with goals and interests of the participants [1]. For the assessment of efficiency of invest projects realization there are lots of criteria that can be used to select the most suitable variant. Particularly, it is possible to assess alternative projects on the basis of statistical indicators or with the use of discount indicators of comparative economic efficiency.

In modern foreign and domestic practice all the discount methods are predominant because they consider changes of financial resources costs in time and don't have the drawbacks that are inherent in the static methods. Herewith, it is necessary to notice that there is no common method for selection of invest project among a set of alternative variants with the use of previously discussed methods. Mainly, all these methods orient on economic interests of investors, but not on the efficiency of railway station operation. Moreover, these methods handle only financial traffic and don't fully consider technological process, structure, equipment and personnel of the object.

In result of structural reforms on the railway transport a revision of economic indicators of railway station operation occurred. This led to a situation in which economic indicators stopped fully representing technological efficiency of railway stations.

A decrease of influence of technological efficiency indicators on economic functioning of transport objects led to the fact that at selection of parameters of structure and technology the technological efficiency of their interaction isn't fully considered. In this connection, there is a need in an additional criterion that will provide a complex assessment of accordance of technological process to structure of a transport object for given traffic volumes.

Within the framework of the study we propose to use an indicator «Total delays of technological operations caused by structure» as a criterion of the step of comparison of alternative project solutions under the mandatory condition of achievement of the project goal (given traffic capacity). The use of the suggested criterion with the criterion of a comparative economic efficiency will allow assessing the level of accordance of structural and technological parameters for given traffic volumes in complex.

As a result, for the selection of the most rational variant of project realization it is necessary to carry out a comparison of alternative solutions with multiple criteria.

The difficulty of tasks connected with multiple-criteria selection is in the fact that there is not always a variant that is the best by all criteria at the same time: if a variant is the best by one of the criteria, then by the other criterion, as a rule, the variant will be far from the best. According to the Edgeworth — Pareto principle, a variant selected must be Pareto-optimal, but in the most multiple-criteria tasks a Pareto set is rather large that makes a process of selection of a rational solution difficult. By this rea-

son, a task of a Pareto set contraction connected with the selection of a Pareto-optimal variant as the most efficient arises [2].

By present time we have a variety of approaches to solve the specified task. The most common are methods, within the framework of which a decision maker (DM) has to make a decision according one or another binary relation from given set [3]. These methods include wide spread abroad methods like ELECTRE, MACBETH and PROMETHEE [4–7]. The advantage of these methods is the use of «prepared» preference relation that provides good knowledge of properties of this relation. Speaking about the disadvantages, then the most significant is that the prepared «artificial» relations are rarely fully satisfy a DM [4].

In order to narrow an initial Pareto set many scientists use human-computer procedures. They include iterative procedures for searching the «best» solution with the use of information from a DM on each step [8–10]. A technique of such procedures supposes the use of specific information at each step. But this information is very hard to get from a DM. The excessive difficulty of questions addressed to a DM leads to inaccuracies that are collected at each step and can significantly affect the final variant and lead to decisions that are far from the best.

The next group of methods aimed at narrowing of a Pareto set are methods that are based on visualization of a Pareto set and that use variants of approximation to an «ideal» solution [11, 12]. The main goal of the visualization is to form a better DM's understanding of a problem, information about alternatives and hidden relationships. In other words, visualization allows studying a problem graphically and helps a DM to compare various alternatives. It is important for a DM to distinguish alternatives, determine similarities and differences before making a final decision. Most common methods of visualization are listed in [11, 13–15]. Despite a big number of methods, they don't fully provide accuracy of presenting results in conditions of stochasticity of criterial functions.

So, in order to increase quality and efficiency of decisions it is necessary to develop methods of initial Pareto set contraction further.

MATERIALS AND METHODS

In order to make decisions with many criteria it is necessary to solve a task of comparison of losses by some criteria with benefits by other criteria. If a DM acts rationally, then the selected variant $\hat{x} \in X$ must be Pareto-optimal. In this connection, the establishment of Pareto-optimal alternatives X_0 must be the first step at decision making. Afterwards, in order to reduce possible negative consequences we suggest to constrict a Pareto set with the use of approach based on consideration for stochasticity and only then make a final decision on a new, more precise Pareto set. The more it is possible to constrict a Pareto set, the smaller possible errors may be.

The most precise method for calculation of structural and technological parameters of railway stations is simulation modeling [16]. But this method doesn't provide the only one solution in contrast with strict mathematical and optimization models. It is useful from the point of view of producing statistical information about the operation of the considered object. That is

why, for selection of the most efficient solution it is necessary to study characteristics of dispersion of calculation results according to every considered alternative. In this connection, it is necessary to calculate, construct and assess scattering ellipses.

The ellipse equation is

$$\frac{(x - m_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2r_{xy}(x - m_x)(y - m_y)}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y - m_y)^2}{\sigma_y^2} = \chi^2, \quad (1)$$

where m_x, m_y — mathematical expectations of samples;

r_{xy} — sample correlation coefficient;

σ_x and σ_y — sample mean square deviations;

χ — ellipse size parameter.

In general case (when $r_{xy} \neq 0$) main axis of this ellipse don't match the Oxy coordinate system axis. A centre of the ellipse is in the point (m_x, m_y) and the direction of its symmetry axis in the Oxy coordinate system is determined by the formulas:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} 2\varphi &= \frac{2r_{xy}\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}; \\ \varphi &= \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{2r_{xy}\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

To rotate axis of the coordinate system on a certain angle φ it is necessary to use the following formulas:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \varphi + y \sin \varphi; \\ y' &= -x \sin \varphi + y \cos \varphi. \end{aligned} \quad (3)$$

When rotating the coordinate system and shifting it by m_x and m_y mean square deviations σ_1 and σ_2 will be expressed with the use of σ_x and σ_y as follows:

$$\begin{aligned} \sigma_1^2 &= \sigma_x^2 \cos^2 \varphi + r_{xy} \sigma_x \sigma_y \sin 2\varphi + \sigma_y^2 \sin^2 \varphi; \\ \sigma_2^2 &= \sigma_x^2 \sin^2 \varphi - r_{xy} \sigma_x \sigma_y \sin 2\varphi + \sigma_y^2 \cos^2 \varphi. \end{aligned} \quad (4)$$

In result, the ellipse equation has the following form:

$$\frac{x^2}{(\chi\sigma_1)^2} + \frac{y^2}{(\chi\sigma_2)^2} = 1. \quad (5)$$

When $r_{xy} = 0$, ellipse axis match the coordinate system axis. In connection with that, there is no need to rotate them.

If scattering ellipses for the considered alternatives cross, then they differ insufficiently and it is necessary to consider them together. If scattering ellipses for the considered alternatives don't cross, then alternatives differ sufficiently and it is necessary to consider them independently.

Creation of scattering ellipses allows not only determining dependence or independence of the considered alternatives, but also identifying common parts of confidence intervals for sample averages at least according to one of the criteria. It is a rea-

son to carry out a single-factor variance analysis that checks a hypothesis on the equality of averages in groups.

Within the framework of the single-factor variance analysis a hypothesis on the equality of mathematical expectations is checked. We put forward a hypothesis on the equality of mathematical expectations (sample averages) for p alternatives $H_0 : M(f_i(\hat{x}_1)) = M(f_i(\hat{x}_2)) = \dots = M(f_i(\hat{x}_p))$. In order to check the H_0 it is necessary to use the Fisher's criterion. To execute it let's consider the value of a F_{obs} — an observed value of the Fisher's criterion. To check the F_{obs} it is necessary to determine a critical value of the F_{cr} .

In case of the approval of the hypothesis on equality of averages in groups according to one of the criteria it is possible to compare alternatives by the second criterion. On the basis of the comparison by the second criterion, one can reveal inefficient alternatives that are excluded from consideration then. If in the result of the exception the X_0 set includes the only solution, then this solution will be considered as optimal. Otherwise, the hypothesis is rejected and the considered X_0 set doesn't change.

So, the application of the single-factor analysis allows narrowing the X_0 set by exception of inefficient alternatives. This leads to higher reliability of decisions because probability of making inefficient decisions decreases.

A developed sequence of actions within the clarification of a Pareto set can be presented in the form of an algorithm (fig. 1).

The algorithm enables a maximal contraction of a Pareto set by means of consideration for stochasticity of criterial functions and significantly decreases a probability of making wrong decisions.

RESULTS AND DISCUSSION

Testing of the proposed method for the clarification of a Pareto set was carried out on a freight station Osentsy (Sverdlovsk Railway). In order to realize goals of the study we considered a situation with the increase of traffic volumes on non-public railway tracks up to 850 cars a day.

The study showed that the station can't handle the increased traffic volumes. In this connection, a set of alternative solutions aimed at development of station structure and technology was created. After a pairwise comparison of alternatives we formed a Pareto set that includes 4 variants (No. 6, No. 17, No. 19, No. 20).

To make a high-quality decision it is necessary to construct scattering ellipses. For this purpose, it is necessary to calculate numerical characteristics of sample populations for two criteria: «Discounted construction and operating costs» и «Total delays of technological operations caused by structure». Afterwards, the correlation analysis is carried out.

After getting all necessary information (specifically characteristics of the sample populations and a correlation coefficient) one can start calculating parameters of scattering ellipses with the use of formulas (1)–(5). On the basis of calculated parameters it is possible to construct scattering ellipses (fig. 2).

As the scattering ellipses don't cross, then the considered alternatives differ significantly, that is why it is necessary to consider them as sufficiently different variants. But, according to the fig. 2, confidential intervals for mean square deviation by the criterion «Discounted construction and operating costs» for

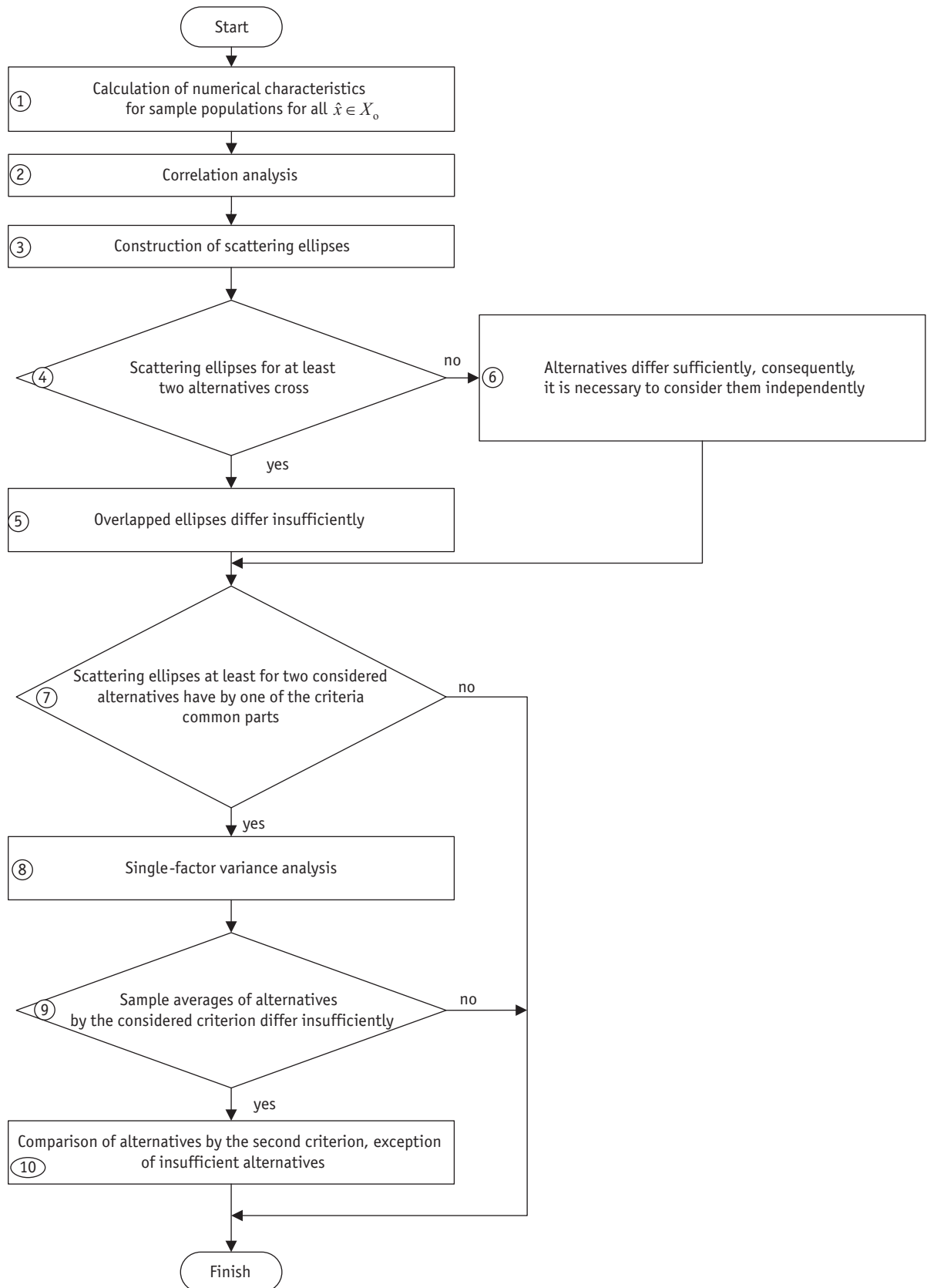


Fig. 1. Algorithm aimed at clarification of a Pareto set

alternatives No. 6 and No. 17 have common parts, so it is advisable to check a hypothesis on the equality of averages in groups. The same situation is with the confidential intervals for mean square deviations by the criterion «Total delays of technological operations caused by structure» for the alternatives No. 17, No. 19 and No. 20: they also have common parts.

For the assessment of significance of differences between averages for two groups of alternatives we executed a single-factor variance analysis. Calculation results are presented in tables 1 and 2.

Since $F_{obs} < F_{cr}$, then the hypothesis on the equality of mathematical expectations is accepted. Both in the first and the second cases sample averages differ insufficiently.

In sight of insufficient difference between mathematical expectations by the criterion «Discounted construction and operating costs», alternatives No. 6 and No. 17 are recognized as parity according to economic efficiency. In connection with that it is possible to compare these alternatives by the criterion «Total delays of technological operations caused by structure». At comparison of parity alternatives No. 6 and No. 17 we determined that the variant No. 6 is ineffective because by the criterion «Total delays of technological operations caused by structure» it has the bigger value of delays with regard to the variant No. 17.

A comparison of variants No. 17, No. 19 and No. 20 showed that they are parity by the criterion «Total delays of technological operations caused by structure». In result of their comparison by the criterion «Discounted construction and operating costs» it is determined that variants No. 19 and No. 20 are ineffective.

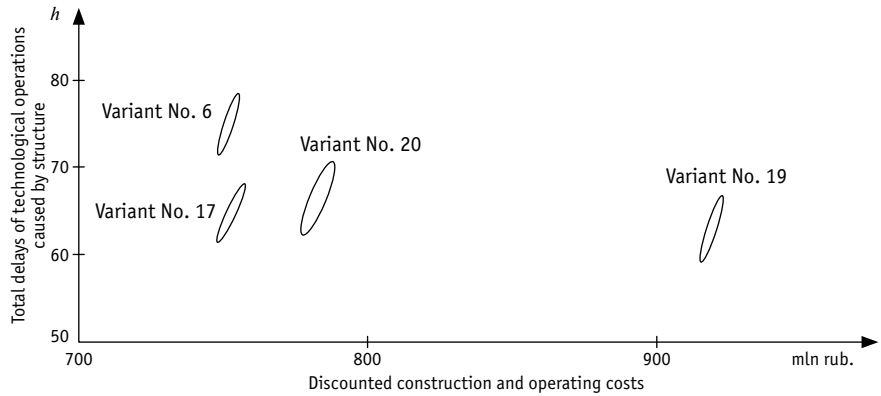


Fig. 2. Scattering ellipses for the considered alternatives

Table 1

Results of the single-factor variance analysis for the alternatives No. 6 and No. 17

Source of variation	SS	df	MS	F_{obs}	F_{cr}
Between groups	16.710	1	16.710	0.553	3.938
Inside groups	2960.097	98	30.205		
Total	2976.807	99			

Table 2

Results of the single-factor variance analysis for the alternatives No. 17, No. 19 and No. 20

Source of variation	SS	df	MS	F_{obs}	F_{cr}
Between groups	318.087	2	159.044	1.284	3.058
Inside groups	18210.088	147	123.878		
Total	18528.176	149			

So, the most rational variant for the increase of station traffic capacity is the solution No. 17.

CONCLUSION

As a result, construction of scattering ellipses and the use of single-factor analysis enabled to clarify the initial Pareto

set, mathematically substantiate parity of the considered variants and make the most rational structural and technological decision aimed at increase of station traffic capacity. In case if the proposed method doesn't provide the only solution, the final decision it is possible to make with the use of known methods of criteria convolution.

Литература

1. Coordination of parameters of transport elements system in the conditions of lack of traffic and estimated capacity / E. Timukhina, O. Osokin, N. Tushin, A. Koshcheev // Advances in Intelligent Systems and Computing. VIII International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2019. 2020. Vol. 2. Pp. 1133–1142. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_111.
2. Decision making based on a bicriteria approach taking into account the stochasticity of criteria functions / A. Koshcheev, G. Timofeeva, E. Timukhina [et al.] // IOP Conference Series:

References

1. Coordination of parameters of transport elements system in the conditions of lack of traffic and estimated capacity / E. Timukhina, O. Osokin, N. Tushin, A. Koshcheev // Advances in Intelligent Systems and Computing. VIII International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia 2019. 2020. Vol. 2. Pp. 1133–1142. DOI: 10.1007/978-3-030-37919-3_111.
2. Decision making based on a bicriteria approach taking into account the stochasticity of criteria functions / A. Koshcheev, G. Timofeeva, E. Timukhina [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012066.

Materials Science and Engineering. 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012066.

3. State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector / G. Yannis, A. Kopsacheili, A. Dragomanovits, V. Petraki // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2020. Vol. 7. Issue 4. Pp. 413–431. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.05.005.
4. Figueira J.-R., Greco S., Ehrgott M. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys // New York: Springer Science+Business Media, 2016. 1048 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-3094-4.
5. Velasquez M., Hester P. T. An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods // International Journal of Operations Research. 2013. No. 10. Pp. 56–66.
6. Corrente S., Greco S., Słowiński R. Multiple Criteria Hierarchy Process with ELECTRE and PROMETHEE // Omega. 2013. Vol. 41. Issue 5. Pp. 820–846. DOI: 10.1016/j.omega.2012.10.009.
7. Do Carmo Silva M., Gomes C., Da Costa Junior C. L. A hybrid multicriteria methodology TOPSIS-MACBETH-2N applied in the ordering of technology transfer offices // Pesquisa Operacional. 2018. Vol. 38. Issue 3. Pp. 413–439. DOI: 10.1590/0101-7438.2018.038.03.0413.
8. Miettinen K., Ruiz F., Wierzbicki A. P. Introduction to Multiobjective Optimization: Interactive Approaches // Multiobjective Optimization: Lecture Notes in Computer Science 5252, 2008. Pp. 27–57. DOI: 10.1007/978-3-540-88908-3_2.
9. Miettinen K., Hakanen J., Podkopaev D. Interactive Nonlinear Multiobjective Optimization Methods // Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys / Editors: S. Greco, M. Ehrgott, J.-R. Figueira. Springer, 2016. Pp. 927–976. DOI: 10.1007/978-1-4939-3094-4_22.
10. Generalised framework for multi-criteria method selection / J. Wątróbski, J. Jankowski, P. Ziemia [et al.] // Omega. 2018. Vol. 86. Pp. 107–124. DOI: 10.1016/j.omega.2018.07.004.
11. Miettinen K. Survey of methods to visualize alternatives in multiple criteria decision making problems // OR Spectrum. 2014. Vol. 36. Issue 1. Pp. 3–37. DOI: 10.1007/s00291-012-0297-0.
12. Ashbolt S. C., Maheepala S., Perera B. J. C. Interpreting a Pareto set of operating options for water grids: a framework and case study // Hydrological Sciences Journal. 2017. Vol. 62. Issue 16. Pp. 2631–2654. DOI: 10.1080/02626667.2017.1398826.
13. Zakharova A. A., Korostelyov D. A., Fedonin O. N. Visualization Algorithms for Multi-criteria Alternatives Filtering // Scientific Visualization. 2019. Vol. 11. No. 4. Pp. 66–80. DOI: 10.26583/sv.11.4.06.
14. Interactive Multiobjective Optimization: A Review of the State-of-the-Art // B. Xin, L. Chen, J. Chen [et al.] // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 41256–41279. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2856832.
15. Korhonen P., Wallenius J. 2008. Visualization in the Multiple Objective Decision-Making Framework // Multiobjective Optimization: Lecture Notes in Computer Science 5252, 2008. Pp. 195–212. DOI: 10.1007/978-3-540-88908-3_8.
16. Технико-экономическое обоснование решений по повышению перерабатывающей способности обслуживаемых устройств в системах железнодорожного транспорта / Е. Н. Тимухина, Н. В. Кащеева, Н. А. Афанасьева, А. А. Кощеев // Транспорт Урала. 2018. № 1 (56). С. 35–44. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-35-44. ISSN 1815–9400.
3. State-of-the-art review on multi-criteria decision-making in the transport sector / G. Yannis, A. Kopsacheili, A. Dragomanovits, V. Petraki // Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2020. Vol. 7. Issue 4. Pp. 413–431. DOI: 10.1016/j.jtte.2020.05.005.
4. Figueira J.-R., Greco S., Ehrgott M. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys // New York: Springer Science+Business Media, 2016. 1048 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-3094-4.
5. Velasquez M., Hester P. T. An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods // International Journal of Operations Research. 2013. No. 10. Pp. 56–66.
6. Corrente S., Greco S., Słowiński R. Multiple Criteria Hierarchy Process with ELECTRE and PROMETHEE // Omega. 2013. Vol. 41. Issue 5. Pp. 820–846. DOI: 10.1016/j.omega.2012.10.009.
7. Do Carmo Silva M., Gomes C., Da Costa Junior C. L. A hybrid multicriteria methodology TOPSIS-MACBETH-2N applied in the ordering of technology transfer offices // Pesquisa Operacional. 2018. Vol. 38. Issue 3. Pp. 413–439. DOI: 10.1590/0101-7438.2018.038.03.0413.
8. Miettinen K., Ruiz F., Wierzbicki A. P. Introduction to Multiobjective Optimization: Interactive Approaches // Multiobjective Optimization: Lecture Notes in Computer Science 5252, 2008. Pp. 27–57. DOI: 10.1007/978-3-540-88908-3_2.
9. Miettinen K., Hakanen J., Podkopaev D. Interactive Nonlinear Multiobjective Optimization Methods // Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys / Editors: S. Greco, M. Ehrgott, J.-R. Figueira. Springer, 2016. Pp. 927–976. DOI: 10.1007/978-1-4939-3094-4_22.
10. Generalised framework for multi-criteria method selection / J. Wątróbski, J. Jankowski, P. Ziemia [et al.] // Omega. 2018. Vol. 86. Pp. 107–124. DOI: 10.1016/j.omega.2018.07.004.
11. Miettinen K. Survey of methods to visualize alternatives in multiple criteria decision making problems // OR Spectrum. 2014. Vol. 36. Issue 1. Pp. 3–37. DOI: 10.1007/s00291-012-0297-0.
12. Ashbolt S. C., Maheepala S., Perera B. J. C. Interpreting a Pareto set of operating options for water grids: a framework and case study // Hydrological Sciences Journal. 2017. Vol. 62. Issue 16. Pp. 2631–2654. DOI: 10.1080/02626667.2017.1398826.
13. Zakharova A. A., Korostelyov D. A., Fedonin O. N. Visualization Algorithms for Multi-criteria Alternatives Filtering // Scientific Visualization. 2019. Vol. 11. No. 4. Pp. 66–80. DOI: 10.26583/sv.11.4.06.
14. Interactive Multiobjective Optimization: A Review of the State-of-the-Art // B. Xin, L. Chen, J. Chen [et al.] // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 41256–41279. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2856832.
15. Korhonen P., Wallenius J. 2008. Visualization in the Multiple Objective Decision-Making Framework // Multiobjective Optimization: Lecture Notes in Computer Science 5252, 2008. Pp. 195–212. DOI: 10.1007/978-3-540-88908-3_8.
16. Feasibility study of solutions aimed to increase the capacity of serving facilities in systems of railway transport [Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie resheniy po povysheniyu pererabatyvayushhey sposobnosti obsluzhivayushhikh ustroystv v sistemakh zheleznodorozhnogo transporta] / E. N. Timukhina, N. V. Kasheeva, N. A. Afanasyeva, A. A. Koscheev // Transport of the Urals. 2018. No. 1 (56). Pp. 35–44. DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-35-44. ISSN 1815–9400.

Объем статьи 0,8 авторских листа

УДК 621.432.3:621.43.068

Александр Владимирович Гриценко, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), профессор кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Россия,

Константин Вячеславович Глемба, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка и технология и механизация животноводства» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Россия,

Григорий Николаевич Салимоненко, руководитель проектов департамента управления проектами и инвестициями по развитию ООО «ОМГ СДМ», Челябинск, Россия,

Алексей Николаевич Медведев, кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель Челябинского высшего военного авиационного краснознаменного училища штурманов — филиала Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» в г. Челябинске, Челябинск, Россия

КОНТРОЛЬ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ ЕГО ВЫБЕГА

Alexander Vladimirovich Gritsenko, DSc in Engineering, Professor, Automobile Transport Department, South Ural State University (NIU), Professor, Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University (SURSAU), Chelyabinsk, Russia,

Konstantin Vyacheslavovich Glemba, PhD in Engineering, Associate Professor, Researcher, Automobile Transport Department, South Ural State University (NIU), Associate Professor, Operation of the Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry Department, South Ural State Agrarian University (SURSAU), Chelyabinsk, Russia,

Grigoriy Nikolaevich Salimonenko, Project Manager, Project Management and Investment Development Department, OMG SDM LLC, Chelyabinsk, Russia,

Alexey Nikolaevich Medvedev, PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer, Chelyabinsk Higher Military Aviation Red Banner School of Navigators (branch of the Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovskiy and Yu. A. Gagarin» in Chelyabinsk), Chelyabinsk, Russia

Monitoring of the internal combustion engine exhaust system according to the parameters of its inertial stop

Аннотация

В настоящее время все выпускаемые в России автомобили должны соответствовать нормам Евро-5 и Евро-6. Нормативы токсичности непрерывно ужесточаются и могут быть достигнуты только при использовании специальных систем, узлов и механизмов, в частности, это касается каталитических нейтрализаторов и датчиков кислорода. Потеря их функциональных свойств в процессе эксплуатации приводит к значительному превышению норм выбросов — в 1,5–15 раз, а при некоторых режимах — еще к большему. С целью снижения вредного воздействия неработоспособных выпускных систем на работу автомобильных двигателей и окружающую среду предложен новый метод диагностирования, в основе которого лежит контроль времени выбега на тестовых режимах. Для реализации метода разработаны исследовательский моторный комплекс, приспособление для имитации сопротивления в системе выпуска, догрузатель бензинового двигателя и осциллограф. В качестве чувствительного диагностического параметра принят такой показатель, как время выбега. Имитация неисправностей выпускного тракта реализована путем формирования в нем искусственного сопротивления. В результате выполненных исследований установлены предельные значения сопротивления и временные параметры выбега. Новый метод доказал свою эффективность высокой достоверностью оценки технического состояния двигателя.

Ключевые слова: диагностирование, выбег двигателя, механические потери, метод нагружения, эквивалентное сечение выпускной системы, пневматическое сопротивление.

Abstract

Currently, all manufactured cars in Russia must comply with Euro 5 and Euro 6 standards. The requirements for toxicity are constantly being tightened and can be achieved only with the use of special systems, assemblies and mechanisms, in particular, this applies to catalytic converters and oxygen sensors. The loss of their functional properties during operation leads to significant increases in emission standards by an amount of 1.5–15 times, and in some modes, emissions are significantly higher. To significantly reduce the harmful effects of inoperable exhaust systems on the operation of the car engine and the environment, a new diagnostic method based on the control of the run-out time in test modes is proposed. To implement the proposed diagnostic method, a research engine complex, a device for simulating resistance in the exhaust system, a gasoline engine loader and an oscilloscope have been developed and proposed for use. An indicator is accepted as a sensitive diagnostic parameter — this is the engine stop time. Imitation of exhaust tract malfunctions was carried out by forming artificial resistance in it. As a result of the conducted research, the limit values of the resistance and the time parameters of the engine stop time were established. The new method has proven its effectiveness by high reliability of the assessment of the technical condition.

Keywords: diagnostics, engine run-out, mechanical losses, engine loading method, equivalent exhaust system cross-section, pneumatic resistance.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-77-83

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение норм токсичности значительно повлияло на конструктивное исполнение и функции выпускной системы современных автомобилей [1, 2]. Обеспечить соблюдение всех необходимых экологических норм возможно только за счет оснащения автомобилей многокомпонентными катализаторами с обратной связью и системой управления двигателем [3, 4]. Кроме того, для этой же цели служит мониторинг элементов выпускной системы [5, 6]. На данный момент элементы системы выпуска очень чувствительны к изменению качества топлива и ухудшению процесса сгорания [7, 8]. Нередко заявленные сроки эксплуатации многокомпонентных катализаторов составляют 150–300 тыс. км, но на практике первые отказы проявляются уже при пробегах 50–100 тыс. км. Используемые в настоящее время методы диагностирования слишком трудоемки и не лишены недостатков [9, 10]. Поэтому для снижения вредного воздействия неработоспособных выпускных систем на работу двигателя автомобиля и окружающую среду необходима разработка новых методов, которые бы исключали возможность ошибки при диагностике и снижали трудоемкость сервиса [11, 12]. С учетом сказанного целью работы является повышение эффективности диагностирования системы выпуска двигателя автомобиля (по времени выбега на тестовых режимах).

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведем краткий обзор методов и средств диагностирования, применяемых при контроле технического состояния системы выпуска, которые можно представить в следующем виде: мотор-тестеры, диагностические сканеры, осциллографы, газоанализаторы, специальные приборы и приспособления [1, 13]. Сегодня среди специалистов в области диагностирования большую популярность получили мобильные осциллографы. Их преимуществами являются возможность проводить точечный контроль любых электронных элементов систем автомобиля и дешевизна, в качестве недостатков следует назвать существенную трудоемкость, невозможность контроля параметров электронного блока управления, сложность анализа информации [11]. Распространенными средствами контроля системы выпуска и других систем являются газоанализаторы, отличающиеся высокой чувствительностью к изменениям технического состояния систем двигателя, но также имеющие ряд недостатков — сложность селективной оценки отдельных элементов и систем, дороговизна и существенная трудоемкость на прогрев прибора.

Для повышения эффективности диагностирования предлагается новый способ, связанный с величиной выбега двигателя. Однако при его реализации связь между структурными и диагностическими параметрами имеет неопределенность, раскрыть которую позволит выдвинутая научная гипотеза: определение технического состояния выпускной системы (в частности, каталитического нейтрализатора) за счет измерения величины времени выбега двигателя. Необходимо также рассмотреть теоретические аспекты использования нового метода и проверить возможность его реализации.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Перед представлением теоретической модели, связывающей параметры свободного выбега, следует ввести некоторые ограничения и рассмотреть подобие процесса выбега турбокомпрессора (ТКР) двигателя [11]. Безусловно, ТКР имеет гораздо меньшие массогабаритные размеры и совершает гораздо большее число оборотов в минуту. В случае когда ТКР (коленчатый вал) вращается с постоянной скоростью, уравнение движения ротора (коленчатого вала) можно записать в общем виде:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_K - M_M, \quad (1)$$

где $J \frac{d\omega}{dt}$ — момент от сил инерции движущихся масс ротора (коленчатого вала) ТКР, Н·м;

J — момент инерции ротора (коленчатого вала) относительно оси, кг·м²;

$\frac{d\omega}{dt}$ — угловое ускорение или замедление ротора (коленчатого вала) в зависимости от режима работы, рад/с²;

M_T — эффективный момент, развиваемый турбиной (двигателем), Н·м;

M_K — момент, потребляемый компрессором, Н·м;

M_M — момент механических сопротивлений вращению ротора (коленчатому валу), Н·м.

Из уравнения (1) можно выразить процесс замедления ротора (коленчатого вала):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_T - M_K - M_M}{J}. \quad (2)$$

В случае когда происходит выбег ротора (коленчатого вала), моменты M_K и M_T равны нулю, т.е. кинетическая энергия движущихся масс ротора (коленчатого вала) расходуется на преодоление тормозного момента. Тогда уравнение движения ротора (коленчатого вала) на режиме выбега имеет следующий вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = -M_M. \quad (3)$$

Момент сопротивления вращающихся деталей двигателя M_T постоянный и практически не зависит от угловой скорости [4–6]. С учетом этого выражение углового ускорения (замедления) ε коленвала будет таким:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{d\tau} = -\frac{1}{j}(M_T + k\omega), \quad (4)$$

где ω — угловая скорость вращения, рад/с;

τ — временной интервал, с;

j — момент инерции вращающихся деталей двигателя;

k — степень влияния ω на коэффициент трения.

Решение дифференциального уравнения (4) при начальных условиях $\omega = \omega_0$ и $\tau = 0$ дает зависимость

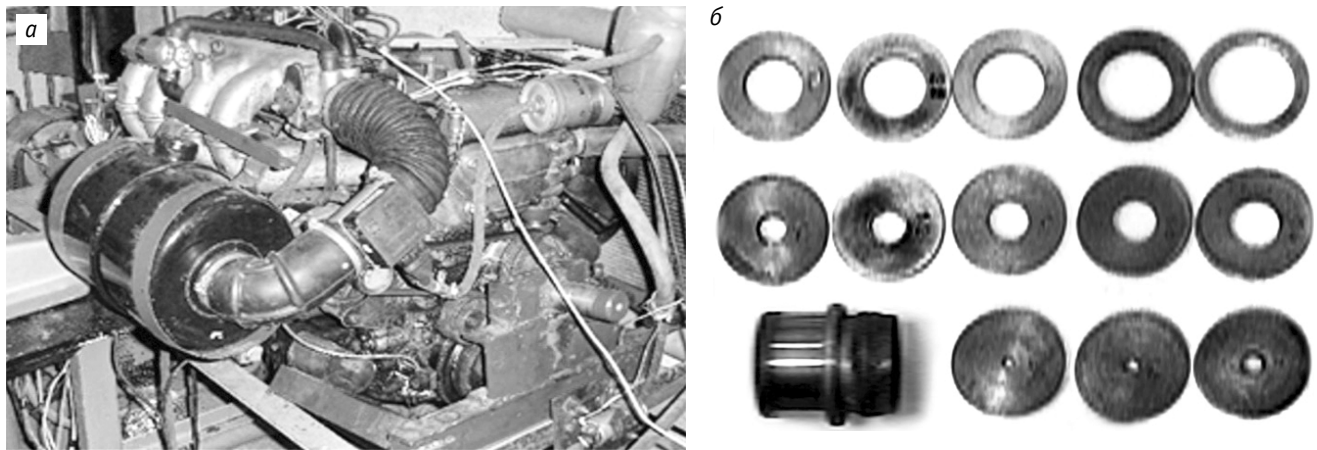


Рис. 1. Исследовательский моторный комплекс (а) и приспособления для имитации сопротивления в системе выпуска (б)

$$\omega = \frac{\varepsilon_0}{k} e^{\frac{k}{j}\tau} - \frac{M_T}{k}, \quad (5)$$

где ε_0 — ускорение (замедление) в начальный момент времени (при $\tau = 0$).

Параметр ε_0 (при $\tau = 0$) найдем из выражения

$$\varepsilon_0 = -\frac{1}{j}(M_T + k\omega_0). \quad (6)$$

Время (продолжительность) выбега τ_B определяется из выражения (6) при условии $\omega = 0$. После логарифмирования и преобразования получим

$$\tau_B = \frac{j}{k} \ln \left(\frac{-\varepsilon_0 j}{M_T} \right). \quad (7)$$

При измерении выбега угловую скорость коленчатого вала можно записать в виде

$$\omega = \omega_0 e^{-a\tau} - \omega_{\Pi}, \quad (8)$$

где ω_{Π} — снижение угловой скорости вала ротора из-за установки дополнительного сопротивления на выхлопе, рад/с; a — конструктивный параметр.

С учетом выражения (8) время выбега τ_B при $\omega = 0$ примет вид

$$\tau_B = \frac{1}{a} \ln \frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_{\Pi}}. \quad (9)$$

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Методика экспериментов включала разработку исследовательского моторного комплекса (установка на базе инжекторного бензинового двигателя ЗМЗ-4062.10

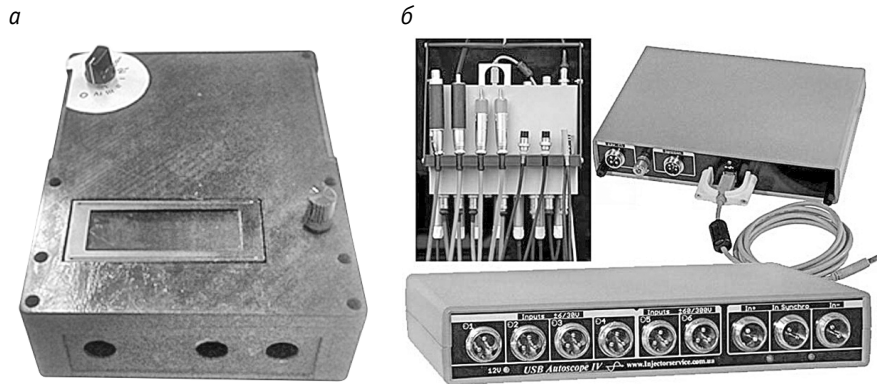


Рис. 2. Диагностические средства:

- а — догрузатель бензинового двигателя ДБД-4;
- б — USB Autoscope-4 (осциллограф Постолювского)

с впрыском топлива перед впускным клапаном) и подготовку приспособления для имитации сопротивления в системе выпуска (набор насадок со сменными шайбами тарированных эквивалентных сечений) (рис. 1).

В качестве диагностических средств использовали осциллограф Постолювского (USB Autoscope-4) [10] в связке с разработанным авторами прибором — догрузателем бензинового двигателя ДБД-4, который подключали в разрыв разъема питания электромагнитных форсунок и модулей системы зажигания (рис. 2) [11, 12]. Приборное средство ДБД-4 имитировало нагрузку при работе двигателя путем его нагружения мощностью механических потерь отключаемых цилиндров, т.е. прибор позволил реализовать функцию создания тестовой нагрузки за счет полного или частичного отключения искробразования и топливоподдачи в цилиндрах.

Осциллограф Постолювского использовался для контроля параметров времени выбега и числа оборотов, совершенных коленчатым валом до полной остановки двигателя. При проведении экспериментальных исследований осуществляли пуск ДВС, значение частоты вращения двигателя устанавливали на уровне 5500 мин^{-1} . Одновременно с текущим процессом работы двигателя обеспечивался старт запуска развертки осциллограммы прибора USB Autoscope-4, после чего устанавливалось начальное значение частоты вращения коленчатого вала двигателя, включалась запись, одновременно включалось зажигание (рис. 3).

Далее в режиме записи осуществлялся выбег коленчатого вала до его полной остановки. Затем запись прекращалась, и текущий временной участок сохранялся в памяти компьютерного устройства, сопряженного с USB Autoscope-4.

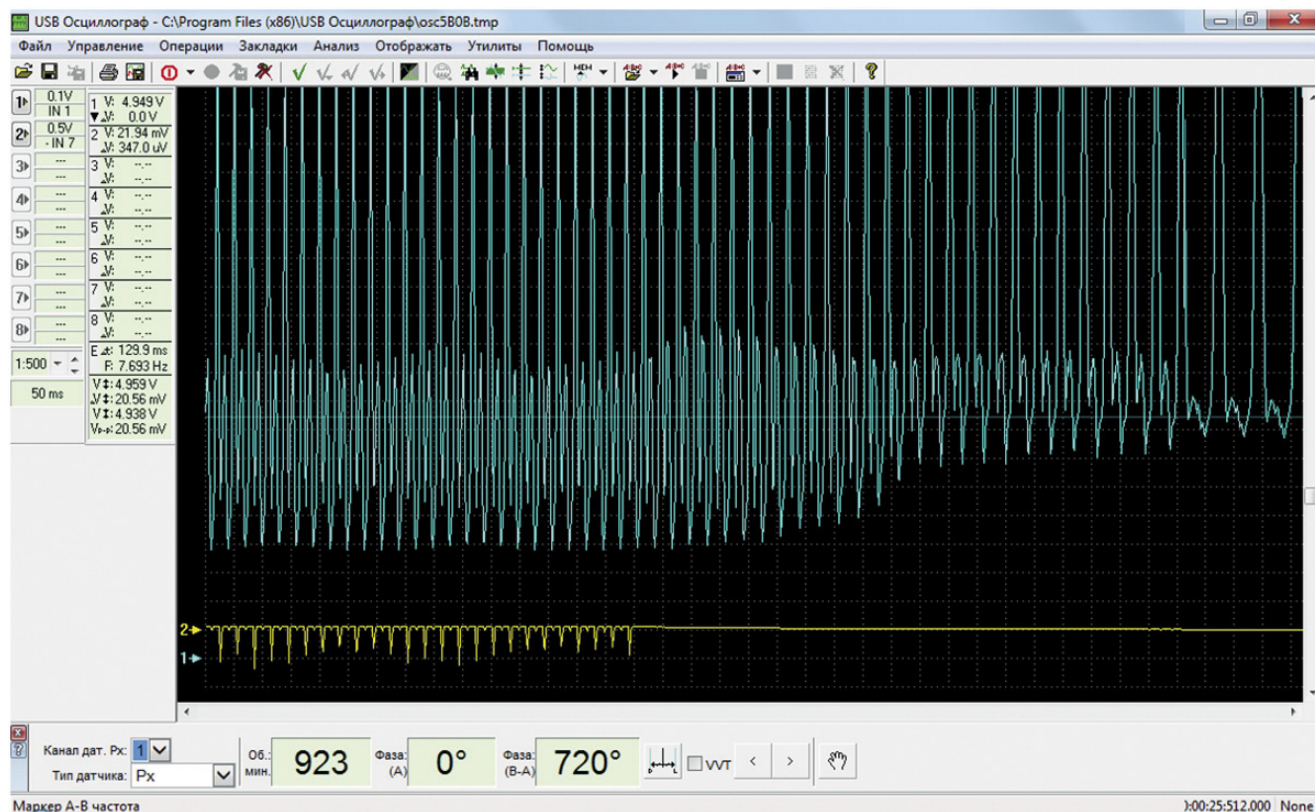


Рис. 3. Текущая развертка осциллограммы, записанная USB Autoscope-4:

- 1 — изменение мгновенной величины давления в первом цилиндре двигателя внутреннего сгорания;
2 — изменение сигнала первичной цепи системы зажигания

Экспериментальные данные обрабатывались для трех вариантов выбега: 1 — при свободном выбеге коленвала двигателя и полностью прикрытой дроссельной заслонке; 2 — при свободном выбеге коленвала и полностью открытой дроссельной заслонке; 3 — при свободном выбеге коленвала, установке различных мерных шайб (формировании искусственного сопротивления) в выпускную систему и полностью открытой заслонке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим экспериментальную зависимость изменения времени выбега от значений эквивалентного сечения при определенном диаметре выпускной трубы для условий начала выбега с 5000, 4000 и 3000 мин⁻¹ (рис. 4).

Перед измерениями на работающем двигателе педаль газа устанавливается начальное значение частоты вращения коленвала. Во время испытаний при достижении заданной частоты педаль газа

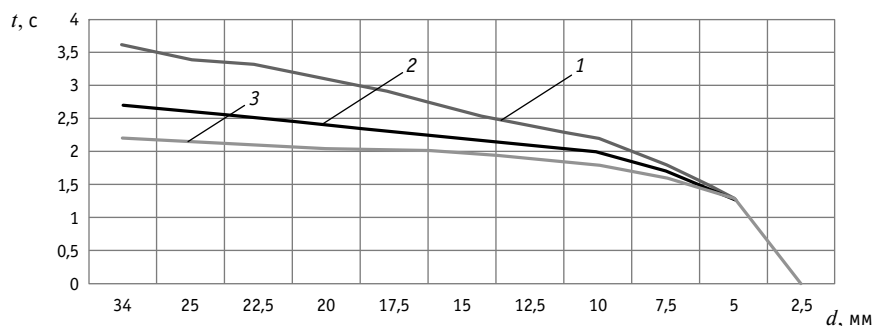


Рис. 4. Зависимость изменения времени выбега (t) от значений эквивалентного сечения при диаметре выпускной трубы (d) для условий начала выбега:

- 1 — с 5000 мин⁻¹; 2 — с 4000 мин⁻¹; 3 — с 3000 мин⁻¹

фиксируется, чтобы обеспечить стабильность показаний, после чего она полностью отпускается, и осуществляется выбег до полной остановки двигателя (заслонка является фактором торможения воздушного потока). Как видно из рис. 4, максимальная разница значений времени выбега наблюдается при эквивалентном сечении с диаметром выпускной трубы 34 мм (что соответствует номинально-

му значению сопротивления выпускного тракта). Однако угол наклона зависимостей времени выбега несколько отличается. Так, для больших начальных частот вращения коленвала угол наклона больше. Фактически в пределах диаметра от 34 до 10 мм время выбега изменяется линейно. После прохождения точки, соответствующей диаметру 10 мм, угол наклона зависимостей резко увеличива-

ется и совпадает для всех трех приведенных вариантов выбега. Однако уже в этой точке обнаруживается критическое сопротивление выпускного тракта, после которого невозможно установить начальную частоту вращения коленчатого вала на уровне 5000, 4000 и 3000 мин^{-1} . Точка баланса наблюдается при меньшей частоте вращения. Как показали многочисленные эксперименты, область эквивалентных сечений с диаметром менее 10 мм является критической, после которой работа двигателя затруднена или совсем невозможна.

Рассмотрим показательную зависимость изменения времени выбега от значений начальной частоты вращения коленвала при различных значениях эквивалентного сечения диаметра выпускной трубы (рис. 5). Как видно из рис. 5, с ростом сопротивления выпускного тракта (или с уменьшением эквивалентного сечения) время выбега двигателя снижается. Причем самая существенная динамика сокращения времени выбега наблюдается в начале процесса роста сопротивления. Так, разность времени выбега между двумя соседними зависимостями составляет 0,3 с при уменьшении эквивалентного сечения с 34 до 25 мм. При уменьшении же эквивалентного сечения менее 20 мм разность в сокращении времени выбега становится менее заметна (разность между двумя соседними зависимостями меньше 0,1 с).

Известно, что важным диагностическим параметром является полное число оборотов до остановки двигателя. На рис. 6 показана зависимость изменения этого параметра от значений эквивалентного сечения при определенном диаметре выпускной трубы и условии начала выбега начиная со значения частоты в 5000 мин^{-1} .

Из рис. 6 видно, что в начальном диапазоне изменения диаметра в пределах 34–15 мм график зависимости имеет почти линейный вид, но далее она динамично изгибается вниз, и при 10 мм условие начала выбега для 5000 мин^{-1} не соблюдается, т.е. двигатель уже не может изначально набрать заданных высоких оборотов. Как следствие, чем больше становится сопротивление выпускного тракта (т.е. при уменьшении диаметра выпускной трубы), тем ниже будет уровень мак-

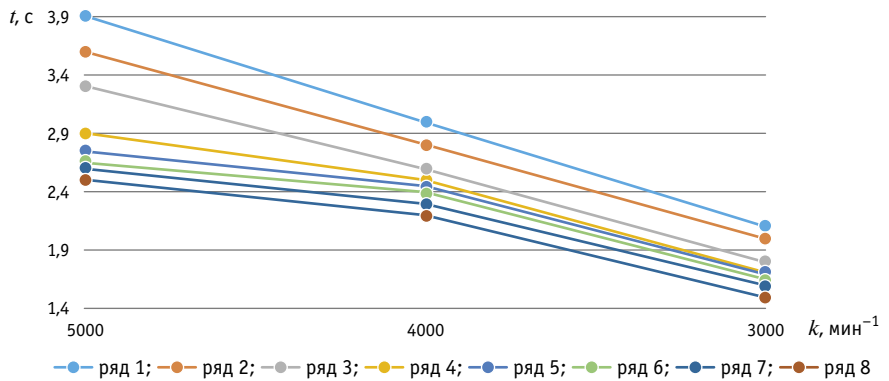


Рис. 5. Зависимость изменения времени выбега (t) от начальной частоты вращения коленвала (k) при различных значениях эквивалентного сечения диаметра выпускной трубы, мм:
 34 (ряд 1); 25 (ряд 2); 22,5 (ряд 3); 20 (ряд 4); 17,5 (ряд 5); 15 (ряд 6); 12,5 (ряд 7); 10 (ряд 8)

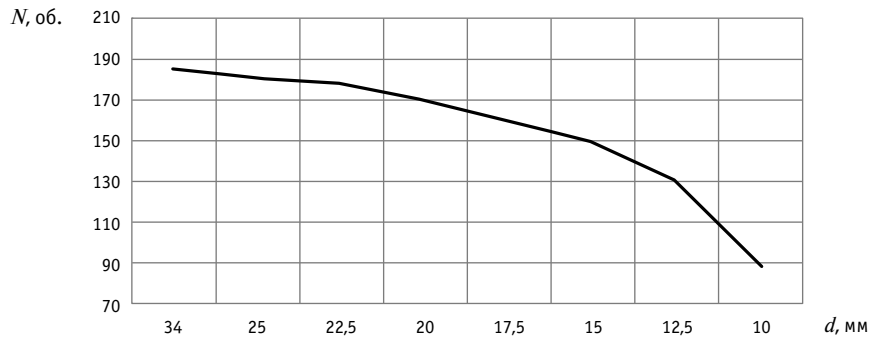


Рис. 6. Зависимость изменения полного числа оборотов (N) до остановки двигателя от значения эквивалентного сечения при диаметре выпускной трубы (d) и условии начала выбега с частоты 5000 мин^{-1}

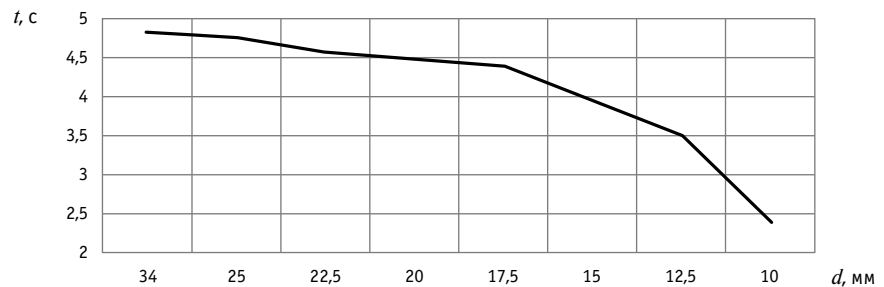


Рис. 7. Зависимость изменения времени выбега (t) от эквивалентного сечения диаметра выпускной трубы (d) при условии начала выбега с частоты 5000 мин^{-1}

симально возможных оборотов коленвала при устойчивой работе двигателя в начале выбега.

На рис. 7 представлена зависимость изменения времени выбега от значений эквивалентного сечения диаметра выпускной трубы при начале выбега с частоты 5000 мин^{-1} , имеющая ниспадающий характер, который динамично снижается ближе к значению 10 мм.

Особенностью зависимости, показанной на рис. 7, является условие контроля выбега: в момент начала отчета выбега дроссельная заслонка поддерживается полностью открытой в течение всего выбега — до полной остановки коленвала двигателя. Педаль газа в процессе испытания удерживается до установления нужной частоты вращения, а в момент начала отсчета выбега поддерживается

полностью нажатой в течение всего выбега и до полной остановки коленвала. При этом создается минимальное сопротивление движению воздуха, время выбега несколько увеличивается по сравнению с вариантом при закрытой дроссельной заслонке. Зависимость на рис. 7 имеет показательный вид и может быть использована для определения технического состояния системы выпуска на любой стадии эксплуатации автомобиля.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал недостаточную эффективность технологий и средств диагностирования выпускных систем. Установлено, что альтернативным эффективным методом является диагностирование по величине времени выбега двигателя. Для реализации предлагаемого метода разработаны исследовательский моторный комплекс, приспособление для имитации сопротивления в системе выпуска, догружатель бензинового двигателя ДБД-4. При проведении экспериментальных исследований и обработке полученных данных установлено, что в качестве чувствительного диагностического параметра

при определении технического состояния системы выпуска можно принимать время выбега двигателя.

При анализе экспериментальной зависимости изменения времени выбега от эквивалентного сечения при определенном диаметре выпускной трубы и при условии начала выбега с частот 5000, 4000 и 3000 мин⁻¹ установлена максимальная разность значений времени выбега при эквивалентном сечении 34 мм (что соответствует номинальному значению сопротивления выпускного тракта). После прохождения точки, соответствующей 10 мм, угол наклона зависимостей резко увеличивается и совпадает для всех трех приведенных вариантов выбега. Однако уже в точке 10 мм обнаруживается критическое сопротивление выпускного тракта, после которого невозможно установить начальную частоту вращения коленвала на уровне 5000, 4000 и 3000 мин⁻¹. Точка баланса наблюдается при меньшей частоте вращения. Как показали многочисленные эксперименты, область эквивалентных сечений менее 10 мм является критической, после нее работа двигателя становится затрудненной или совсем невозможной.

Литература

1. Развитие технических средств диагностирования тракторных ДВС по параметрам рабочих процессов / О. Ф. Савченко, В. В. Альт, С. Н. Ольшевский, И. П. Добролюбов // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 106–112. ISSN 2587–6864.
2. Passive Exhaust System With Cylinder Deactivation / Y. Bemman, T. Frei, C. Jones, M. Keck // SAE Technical Paper 2005-01-2351, 2005. DOI: 10.4271/2005-01-2351.
3. Экспертная система контроля технического состояния автомобилей / А. Д. Шумилин, В. В. Лянденбургский, М. К. Капунова [и др.] // Научное обозрение. 2016. № 4. С. 85–89. ISSN 1815–4972.
4. Study of utilization of petrol engine equipped with exhaust gas recirculation (EGR) and catalytic converter to reduce consumption and NOx emission / F. de Araújo Porto, B. Bailona, J. Camargo [et al.] // SAE Technical Paper 2006-01-2809, 2006. DOI: 10.4271/2006-01-2809.
5. Лешаков И. А., Кравченко И. Н., Ерофеев М. Н. Математическая модель расчета основных параметров каталитических нейтрализаторов // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 5. С. 76–80. ISSN 1812–7320.
6. Lapuerta M., Hernández J., Armas O. Kinetic Modelling of Gaseous Emissions in a Diesel Engine // SAE Technical Paper 2000-01-2939, 2000. DOI: 10.4271/2000-01-2939.
7. Вертей М. Л. Обоснование способа разгона двигателя с принудительным впрыском топлива и электрическим управлением топливopодачей при проведении тестового диагностирования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 2 (124). С. 112–116. ISSN 1996–4277.
8. Senapati U., McDevitt I., Hankinson A. Vehicle Refinement Challenges for a Large Displacement Engine with Cylinder Deactivation Capability // SAE Technical Paper 2011-01-1678, 2011. DOI: 10.4271/2011-01-1678.
9. Способ диагностирования выпускного тракта поршневого двигателя внутреннего сгорания / А. В. Гриценко, С. С. Куков,

References

1. Development of technical means of diagnosing tractor engine workflow settings [Razvitiye tekhnicheskikh sredstv diagnostirovaniya traktornykh DVS po parametram rabochikh protsessov] / O. F. Savchenko, V. V. Alt, S. N. Olshevsky, I. P. Dobrolyubov // Proceedings of GOSNITI. 2015. Vol. 118. Pp. 106–112. ISSN 2587–6864.
2. Passive Exhaust System With Cylinder Deactivation / Y. Bemman, T. Frei, C. Jones, M. Keck // SAE Technical Paper 2005-01-2351, 2005. DOI: 10.4271/2005-01-2351.
3. Expert system of monitoring the technical condition of vehicles [Ekspertnaya sistema kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobiley] / A. D. Shumilin, V. V. Lyandenbursky, M. K. Kapunova [et al.] // Science Review. 2016. No. 4. Pp. 85–89. ISSN 1815–4972.
4. Study of utilization of petrol engine equipped with exhaust gas recirculation (EGR) and catalytic converter to reduce consumption and NOx emission / F. de Araújo Porto, B. Bailona, J. Camargo [et al.] // SAE Technical Paper 2006-01-2809, 2006. DOI: 10.4271/2006-01-2809.
5. Leshakov I. A., Kravchenko I. N., Erofeev M. N. A mathematical model to calculate the main parameters of catalytic converters [Matematicheskaya model' rascheta osnovnykh parametrov kataliticheskikh neytralizatorov] // Modern high technologies. 2013. No. 5. Pp. 76–80. ISSN 1812–7320.
6. Lapuerta M., Hernández J., Armas O. Kinetic Modelling of Gaseous Emissions in a Diesel Engine // SAE Technical Paper 2000-01-2939, 2000. DOI: 10.4271/2000-01-2939.
7. Verтей M. L. Substantiation of free acceleration method for electronically controlled forced fuel injection engine in the process of testing diagnostics [Obosnovanie sposoba razgona dvigatelya s prinuditel'ny'm vpryskom topliva i elektricheskim upravleniem toplivopodachey pri provedenii testovogo diagnostirovaniya] // Vestnik of Altai State Agricultural University. 2015. No. 2 (124). Pp. 112–116. ISSN 1996–4277.
8. Senapati U., McDevitt I., Hankinson A. Vehicle Refinement Challenges for a Large Displacement Engine with Cylinder Deactivation Capability // SAE Technical Paper 2011-01-1678, 2011. DOI: 10.4271/2011-01-1678.

- К. А. Цыганов, А. В. Горбунов: патент 2474805 Российская Федерация. № 2011139288; заявл. 26.09.2011; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6.
10. Руководство по эксплуатации USB Autoscope III: руководство по работе с программой USB осциллограф. URL: http://www.autoscaners.ru/catalogue/files/689/program_usb_oscilloscope.pdf (дата обращения: 12.11.2021).
 11. Gritsenko A. V., Zadorozhnaya E. A., Shepelev V. D. Diagnostics of friction bearings by oil pressure parameters during cycle-by-cycle loading // Tribology in Industry. 2018. Vol. 40. No. 2. Pp. 300–310.
 12. Plaksin A. M., Gritsenko A. V., Glemba K. V. Experimental studies of cylinder group state during motoring // Procedia Engineering 2. Ser. 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. Pp. 1188–1191.
 13. Connolly F. Direct Estimation of Cyclic Combustion Pressure Variability Using Engine Speed Fluctuations in an Internal Combustion Engine // SAE Technical Paper 940143, 1994.
9. Method of diagnosing the exhaust tract of a piston internal combustion engine [Sposob diagnostirovaniya vypusknogo trakta porshnevoogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya] / A. V. Gritsenko, S. S. Kukov, K. A. Tsyganov, A. V. Gorbunov: patent 2474805 Russian Federation. No. 2011139288; filed 26.09.2011; publ. 27.02.2013, Bulletin No. 6.
 10. USB Autoscope III Operating Manual: manual for working with the USB oscilloscope program [Rukovodstvo po ekspluatatsii USB Autoscope III: rukovodstvo po rabote s programmoy USB ostsilograph]. URL: http://www.autoscaners.ru/catalogue/files/689/program_usb_oscilloscope.pdf (access date: 12.11.2021).
 11. Gritsenko A. V., Zadorozhnaya E. A., Shepelev V. D. Diagnostics of friction bearings by oil pressure parameters during cycle-by-cycle loading // Tribology in Industry. 2018. Vol. 40. No. 2. Pp. 300–310.
 12. Plaksin A. M., Gritsenko A. V., Glemba K. V. Experimental studies of cylinder group state during motoring // Procedia Engineering 2. Ser. 2nd International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016. Pp. 1188–1191.
 13. Connolly F. Direct Estimation of Cyclic Combustion Pressure Variability Using Engine Speed Fluctuations in an Internal Combustion Engine // SAE Technical Paper 940143, 1994.

Объем статьи 0,84 авторских листа

УДК 621.432.3: 621.43.068

Александр Владимирович Гриценко, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), профессор кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Россия,

Константин Вячеславович Глемба, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник кафедры «Автомобильный транспорт» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), доцент кафедры «Эксплуатация машинно-тракторного парка и технология и механизация животноводства» Южно-Уральского государственного аграрного университета (ЮУрГАУ), Челябинск, Россия,

Григорий Николаевич Салимоненко, руководитель проектов департамента управления проектами и инвестициями по развитию ООО «ОМГ СДМ», Челябинск, Россия

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ГАЗОАНАЛИЗА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

Alexander Vladimirovich Gritsenko, DSc in Engineering, Professor, Automobile Transport Department, South Ural State University (NIU), Professor, Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety Department, South Ural State Agrarian University (SURSAU), Chelyabinsk, Russia,

Konstantin Vyacheslavovich Glemba, PhD in Engineering, Associate Professor, Researcher, Automobile Transport Department, South Ural State University (NIU), Associate Professor, Operation of the Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry Department, South Ural State Agrarian University (SURSAU), Chelyabinsk, Russia,

Grigoriy Nikolaevich Salimonenko, Project Manager, Project Management and Investment Development Department, OMG SDM LLC, Chelyabinsk, Russia

Engine diagnostics by selective gas analysis of exhaust gases

Аннотация

В статье рассмотрен метод индивидуального газоанализа автомобильных двигателей с использованием перспективных диагностических средств, включая осциллограф и электронно-управляемое нагрузочное устройство. Обсуждены нижние и верхние пределы изменения варьируемых параметров токсичности для современных бензиновых автомобилей независимо от числа цилиндров. Предлагаемая обобщенная теоретическая модель может применяться для оценки текущего состояния каталитических нейтрализаторов, свечей зажигания, электромагнитных форсунок, а также для прогнозирования ресурса на предстоящие циклы использования.

Ключевые слова: двигатель, диагностирование, экология, токсичность, отработавшие газы, механические потери, эквивалентное сечение, пневматическое сопротивление.

Abstract

In the paper the method of individual gas analysis of vehicles with using promising means, including an oscilloscope and an electronically controlled load device, is considered. During the research, the lower and upper limits of the variation of the variable toxicity parameters for modern gasoline cars, regardless of the number of cylinders, are theoretically justified. This generalized theoretical model can be used by machine-building plants and car service enterprises to assess the current state of catalytic converters, spark plugs, electromagnetic injectors, as well as forecasting the resource for the upcoming use cycles.

Keywords: engine, diagnostics, ecology, toxicity, exhaust gases, mechanical losses, equivalent cross section, pneumatic resistance.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-84-91

ВВЕДЕНИЕ

Процесс автомобилизации непосредственно связан с негативным воздействием на окружающую среду, что требует незамедлительного решения ряда вопросов, в частности разработки и внедрения экологических систем на автомобиле [1–3], а в перспективе — полной дезактивации вредных компонентов отработавших газов (ОГ) [4–6]. В мировой практике достигнуты вполне реалистичные и весьма существенные результаты. Например, уровень концентрации отработавших газов в автомобилях Евро-6 по сравнению с Евро-0 снижен: для бензиновых двигателей по компонентам CO и C_xH_y — в 2,72 и 2 раза соответственно, для дизельных двигателей по компонентам CO и NO_x — в 5,44 и 6,25 раза соответственно. Однако дальнейшее снижение концентрации токсичных компонентов в отработавших газах весьма затруднительно, так как требует сложных работок автомобильных систем и ведет к значительному удорожанию автомобилей [7, 8].

В условиях насыщения отечественных и зарубежных автомобилей электронными системами растет спрос на цифровое (электронное) диагностическое оборудование. Наблюдается устойчивый тренд: чем чаще возникают отказы в процессе эксплуатации по соответствующей системе

или узлу, тем большее количество разработок диагностического оборудования сопровождает эту автомобильную систему. Анализ показывает, что число отказов систем топливоподачи, зажигания и выпуска в двигателе находится на очень высоком уровне. Основные причины — работа в условиях запыленности и существенного перепада температур, эксплуатация в крайних северных и южных регионах с агрессивным климатом, несоблюдение регламента сервисных работ (СР), ошибки при проведении СР, низкое качество используемого топлива, смазочных материалов и других расходных материалов, механические повреждения при эксплуатации в сложных дорожных условиях и т.д. [9, 10]. Одним из наиболее эффективных способов повышения экологических показателей транспортного средства является применение каталитического нейтрализатора (КН) в системе выпуска ОГ. Использование некачественного топлива и повышенные вибрации при эксплуатации существенно снижают ресурс КН. Железосодержащие при-

садки, используемые в составе топлива для увеличения октанового числа бензина, являются небезопасным содержимым для КН. При завышенной концентрации указанных присадок частицы железа оседают на активной поверхности КН, сокращая срок его службы, так как химические реакции с углеродом и азотом ухудшаются.

В ходе проведенных исследований были выявлены основные системы двигателя, влияющие на его экологические показатели, изучены методы контроля этих систем и предложены перспективные (рис. 1). Как видно из схемы, представленной на рис. 1, определены три системы двигателя — питания, зажигания и выпуска. В этих системах выделены наиболее подверженные износу элементы: электромагнитная форсунка (ЭМФ), свеча зажигания и КН. Для ЭМФ определены наиболее известные диагностические параметры при контроле ее технического состояния: пропускная способность, производительность и герметичность. Анализ известных диагностических параметров



Рис. 1. Элементы систем двигателя и применяемые параметры диагностирования

позволил определить среди них самые перспективные: пульсацию давления; пульсацию тока и напряжения; разгон двигателя и отклонение частоты вращения коленчатого вала при изменении состава смеси. При оценке состояния свечей зажигания выявлены такие известные диагностические параметры, как ток, напряжение, напряжение ионизации и сопротивление. Однако наиболее информативными параметрами являются пульсация тока и напряжения; отклонение частоты вращения коленвала двигателя при тестовом воздействии; динамика разгона двигателя при тестовом воздействии. При контроле и оценке технического состояния двигателя известными методами используют следующие параметры: герметичность; загрязнение КН; концентрации CO, CH, O₂ и NO₂. Перспективными для оценки технического состояния КН являются такие параметры, как пульсация давления в выпускном коллекторе при создании тестовых воздействий и оценка противодействия при использовании метода динамической компрессии. Итогом анализа неисправностей в системах двигателя стало формирование перспективных методов и средств диагностирования, в число которых вошли метод индивидуального газоанализа, осциллограф и разработанный авторами статьи догружатель бензинового двигателя ДБД-4 [11].

Система выпуска современных транспортных средств должна снижать уровень шума, возникающий при работе двигателя, осуществлять отвод и охлаждение ОГ и снижать уровень загрязнения окружающей среды. На рис. 2а показан КН, имеющий идеальные квадратные ячейки, без следов деформации и отложений. На рис. 2б представлен КН с оплавленными ячейками, который уже не может выполнять своих функций и, как правило, имеет предельное пневматическое сопротивление, существенно мешающее очистке цилиндров двигателя.

На большинстве современных автомобильных и тракторных двигателей система выпуска представляет собой набор стандартных элементов, в число которых входят КН и два λ-зонда. Проанализируем систему выпуска ряда мировых лидеров — производителей двигателей внутреннего сгорания. Изучение конструктивных схем расположения КН и системы

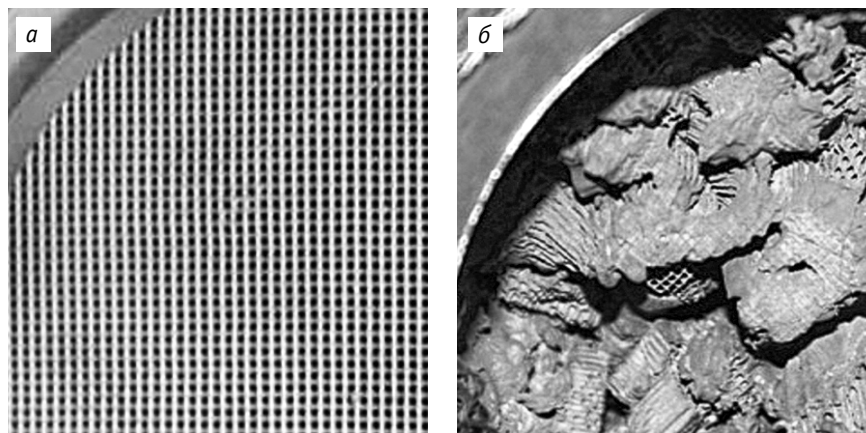


Рис. 2. Сегмент сечения каталитического нейтрализатора:
 а — с идеальными ячейками (новый); б — с оплавленными ячейками (предельное состояние)

выпуска ОГ на автомобилях Ford Motor Co. и Honda Motor Co., Ltd. показало, что оба ведущих предприятия использовали один и тот же подход к концепту формированию выпускного тракта. Многие американские, японские и европейские производители пошли по одинаковому пути развития в области машиностроения. Анализ конструкций систем выпуска ОГ позволил выявить наиболее совершенный вариант — это выпускной тракт Toyota Motor Co., Ltd., имеющий отдельные контуры, которые потом объединяются в один с установкой контрольного λ-зонда. Первые же λ-зонды размещены сразу перед каталитическими нейтрализаторами обоих контуров, что дает возможность проводить индивидуальный (поцилиндровый) контроль концентрации кислорода. С точки зрения контролепригодности это наилучший вариант.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для реализации индивидуального газоанализа при тестовом диагностировании более применим метод последовательного отключения цилиндров, основным преимуществом которого является отсутствие дорогостоящих и громоздких стендов. Однако для использования этого метода необходимо приборное средство, реализующее функцию отключения части цилиндров или отдельных его рабочих циклов. Данное диагностическое средство существенно выигрывает по стоимости и значительно опережает по функциональным возможностям известные стенды и приборные средства.

Рассмотрим особенности применяемого метода, основой которого является определение мощности механических потерь в виде разницы суммы индикаторных мощностей цилиндров и их эффективной мощности, снимаемой с двигателя. При отключении цилиндров двигателя частота вращения его коленвала выдерживается постоянной, и тогда данное условие можно представить в виде

$$N_i = \sum_1^j N_{ij};$$

$$N_{i-1} = 0 + N_{i2} + N_{i3} + N_{i4}, \quad (1)$$

где N_i — индикаторная мощность двигателя, Вт, Н;

N_{ij} — индикаторная мощность j -го цилиндра ($j = 1, 2, 3, 4$), Вт;

N_{i-1} — индикаторная мощность двигателя при выключенном 1-м цилиндре, Вт.

Дальнейший алгоритм вычислений выглядит следующим образом:

$$N_e = N_i - N_m; N_{e-j} = N_{i-j} - N_{m-jr} \quad (2)$$

где N_e — эффективная мощность двигателя, Вт;

N_m — мощность механических потерь в двигателе, Вт;

N_{e-j} — эффективная мощность двигателя при выключенном j -м цилиндре, Вт;

N_{i-j} — индикаторная мощность двигателя при выключенном j -м цилиндре, Вт;

N_{m-j} — мощность механических потерь в двигателе при выключенном j -м цилиндре, Вт.

Таким образом, последовательное выключение каждого из четырех цилиндров позволяет определить их эффективную мощность.

При моделировании взаимосвязи параметров токсичности автомобильных бензиновых двигателей с техническим состоянием трех элементов (КН, ЭМФ и свечи зажигания) были использованы данные работ [12–14]. По результатам в виде дискретных точек, соответствующих двум уровням открытия дроссельной заслонки (20 и 40 %), выполнено моделирование выходных параметров, таких как частота вращения коленвала, содержание CO , CO_2 , CH , O_2 . Обработка полученной теоретической модели проводилась в программном продукте Sigma Plot, верификация и сравнительные исследования выполнены с применением Excel и Mathcad. Данные исследований позволили создать обобщенную математическую модель, учитывающую взаимосвязь качества состава ОГ на участке до местоположения КН с техническим состоянием свечей зажигания, ЭМФ и самого нейтрализатора. Результаты исследований обобщены в ряд функциональных зависимостей, содержащих такие параметры, как частота вращения коленвала двигателя (n), уровень содержания в ОГ кислорода (O_2), углеводородов (CH), оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO_2), при изменяющихся факторах — зазоре свечи зажигания (Z), пропускной способности форсунок (F), эквивалентном сечении нейтрализатора (R).

При обработке данных согласно расчетной модели в программе MATLAB Simulink (рис. 3) в зависимости от комбинации трех входных составляющих получены функции различных выходных параметров.

На рис. 4 представлены результаты для одного из параметров. Анализ изменений в ОГ концентрации O_2 в зависимости от значений эквивалентного сечения КН, пропускной способности ЭМФ, зазора свечи зажигания показал, что концентрация O_2 резко падает с увеличением эквивалентного сечения КН с 10 до 34 мм и пропускной способности ЭМФ с 94 до 106 %, но возрастает с увеличением зазора свечи зажигания с 0,3 до 1,1 мм.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Подготовленный испытательный стенд на базе двигателя ЗМЗ-4062.10 (рядный 4-цилиндровый мотор с четырьмя клапанами на цилиндр) состоит из сочлененной рамы с навесным оборудованием, необходимым для проведения испытаний (рис. 5), нагрузочного электродвигателя, коробки передач, подключаемых в противофазе вращению коленчатого вала двигателя [11]. Электродвигатель с частотным преобразователем может независимо прокручивать коленвал на различных скоростях, поддерживая эталонную равномерность его вращения и существенно нивелируя неравномерность и нестабильность вращения.

Отключение отдельных циклов ЭМФ осуществляется при помощи разработанного авторами прибора — догружателя бензинового двигателя ДБД-4, подсоединенного в разрыв цепи управления всех четырех ЭМФ и позволяющего производить коррекцию длительности импульсов впрыска, отключать форсунки — полностью или по циклам [11, 15]. После того как прибор подсоединяется к двигателю, на его дисплее появляются четыре строки параметров — время впрыска всех четырех ЭМФ (рис. 6), что указывает на полную готовность прибора к работе перед пуском испытательного стенда.

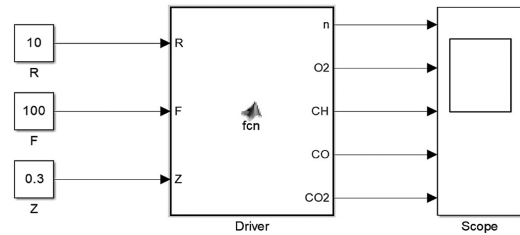


Рис. 3. Расчетная модель в программном продукте MATLAB Simulink

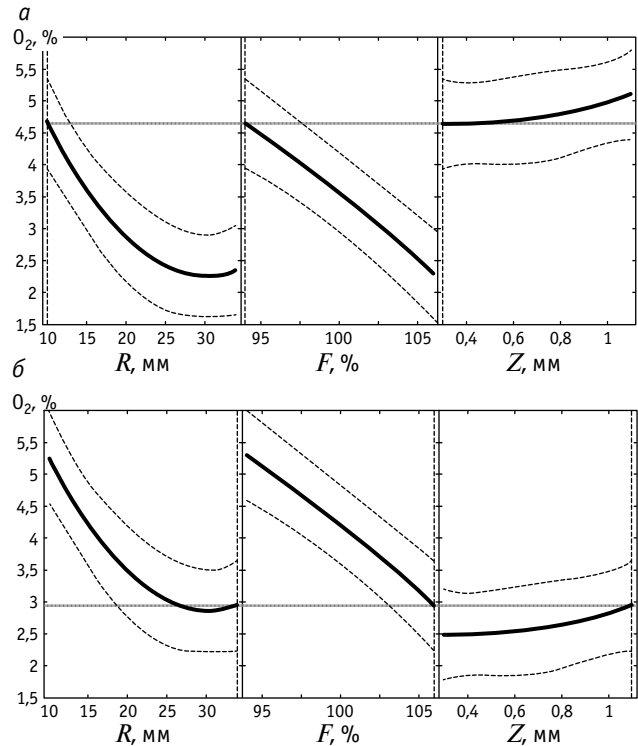


Рис. 4. Зависимость концентрации компонента O_2 (%) в отработавших газах от эквивалентного сечения R (мм) КН, пропускной способности F (%) ЭМФ и зазора Z (мм) свечи зажигания:
 а — при $R = 10$ мм, $F = 94$ %, $Z = 0,3$ мм;
 б — при $R = 34$ мм, $F = 106$ %, $Z = 1,1$ мм

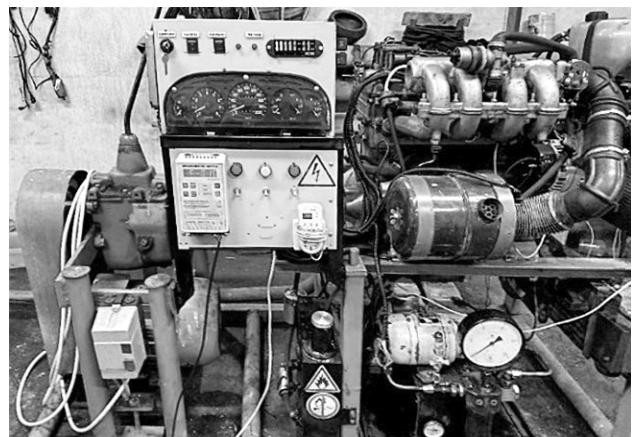


Рис. 5. Исследовательский стенд на базе двигателя ЗМЗ-4062.10

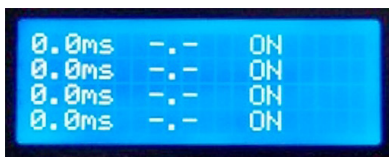


Рис. 6. Показания догрузателя бензинового двигателя ДБД-4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить зависимости (рис. 7), графики которых могут быть описаны уравнениями вида:

$$n(F, Z) = 92149 - 1890,7 \cdot F + 691,6 \cdot Z + 9,8 \cdot F^2 - 291,6 \cdot Z^2; \quad (3)$$

$$O_2(F, Z) = -478,8 + 9,9 \cdot F + 2,01 \cdot Z - 0,051 \cdot F^2 - 1,42 \cdot Z^2. \quad (4)$$

Как показывает анализ, при минимальном зазоре свечи зажигания 0,3 мм (см. рис. 7а) и минимальной пропускной способности ЭМФ в 94 % наблюдается значительное снижение частоты вращения коленвала двигателя до 1280 мин⁻¹, что говорит о тяжелых условиях процесса сгорания топливно-воздушной смеси (ТВС). При увеличении пропускной способности ЭМФ до 100 % и неизменном минимальном искровом промежутке свечи зажигания 0,3 мм частота вращения незначительно возрастает до 1440 мин⁻¹. С увеличением пропускной способности ЭМФ до 106 % наблюдается рост частоты вращения до 2360 мин⁻¹. Следовательно, выходной параметр — частота вращения коленвала двигателя — является наиболее чувствительным диагностическим параметром к изменению технического состояния ЭМФ и КН.

При условии искрового промежутка в свече зажигания 0,3 мм (см. рис. 7б) и пропускной способности ЭМФ в 94 % со-

держание компонента O₂ в пробе ОГ составляет 5,2 %. Такое высокое значение указывает на плохое сгорание ТВС из-за ее переобеднения. Увеличение же зазора с 0,7 до 1,1 мм (при неизменной пропускной способности форсунки) незначительно влияет на процентное содержание O₂ (возрастание на 0,02 %). В зоне сочетания этих факторов виден явный перегиб графика в сторону понижения содержания O₂. При увеличении пропускной способности топливной форсунки до 106 % и искровом промежутке 0,3 мм содержание O₂ составляет 1,31 %, что сказывается на улучшении процесса сгорания ТВС. С увеличением искрового промежутка свечи зажигания наблюдается пик содержания O₂ до 2,05 % (при зазоре 0,7 мм) с дальнейшим снижением концентрации до 1,37 % (при зазоре 1,1 мм), что связано с достаточным напряжением ионизации.

По результатам экспериментальных исследований были построены графические зависимости (рис. 8), которые также могут быть описаны уравнениями вида:

$$n(R, F) = 130752 - 2696,6 \cdot R + 187,7 \cdot F + 13,8 \cdot R^2 - 3,19 \cdot F^2; \quad (5)$$

$$O_2(R, F) = -504,1 + 10,4 \cdot R + 0,1 \cdot F - 0,05 \cdot R^2 - 0,002 \cdot F^2. \quad (6)$$

Результаты показывают (см. рис. 8а), что минимальная частота вращения коленвала двигателя достигается при пропускной способности ЭМФ в 94 % и эквивалентном сопротивлении КН в 10 мм. При этом частота вращения составляет 1600 мин⁻¹, что говорит о неблагоприятных условиях процесса сгорания ТВС при нарастании противодавления в выпускной системе и недостаточной пропускной способности ЭМФ. С увеличением эквивалентного сечения КН до 34 мм с шагом 12 мм частота вращения коленвала увеличивается, достигая максимального зна-

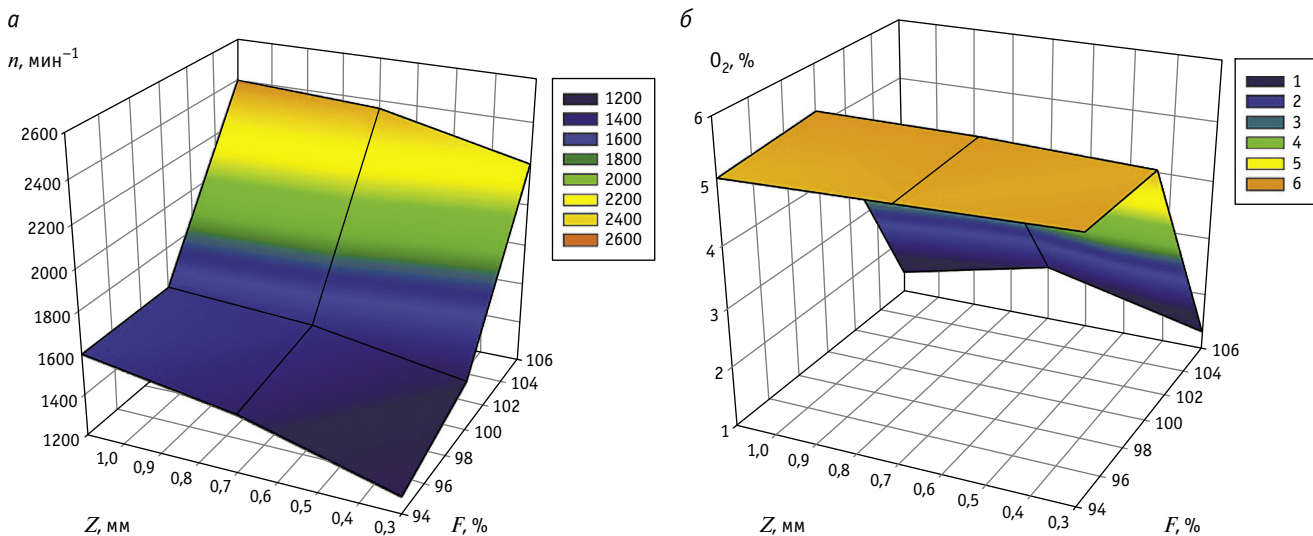


Рис. 7. Поверхности отклика зависимости изменения частоты вращения коленвала двигателя (а) и концентрации O₂ (б) при постоянном значении эквивалентного сечения КН (R = 10 мм) от зазора Z (мм) свечи зажигания и пропускной способности F (%) ЭМФ

чения в 3080 мин⁻¹. Это указывает на меньшее сопротивление системы выпуска ОГ, но уже в области богатой ТВС наблюдается максимальная частота вращения коленвала — 3840 мин⁻¹. Увеличение же пропускной способности ЭМФ до 106 % при эквивалентном сечении КН в 10 мм приводит к росту частоты вращения коленвала ДВС только до 2400 мин⁻¹.

Из рис. 8б видно, что содержание O₂ в пробе ОГ остается предельно высоким на уровне 5,5 % при пропускной способности ЭМФ в диапазоне 94–100 % и при изменении эквивалентного сечения КН с 10 до 34 мм с шагом 12 мм. Это указывает на неблагоприятные условия сгорания ТВС. При увеличении пропускной способности ЭМФ до 106 % и изменении эквивалентного сечения КН с 10 до 34 мм с шагом 12 мм содержание

O₂ в пробе ОГ заметно снижается, что говорит об оптимальном горении ТВС при данном сочетании факторов, когда минимальное содержание O₂ составляет 1,37 %.

По результатам экспериментальных исследований были построены графические зависимости (рис. 9), которые также можно описать уравнениями вида:

$$n(R, Z) = 219,2 + 188,5 \cdot R + 1341 \cdot Z - 3 \cdot R^2 - 708,3 \cdot Z^2; \quad (7)$$

$$O_2(R, Z) = 1,1 + 0,17 \cdot R - 2,3 \cdot Z - 0,003 \cdot R^2 + 1,12 \cdot Z^2. \quad (8)$$

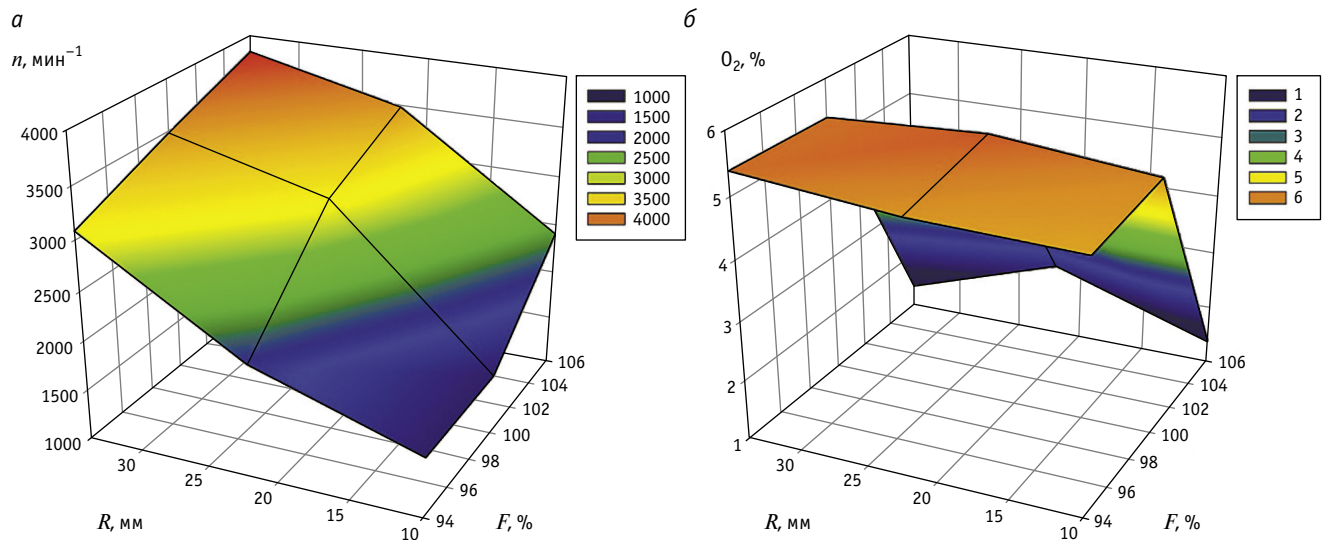


Рис. 8. Поверхности отклика зависимости изменения частоты вращения коленвала двигателя (а) и концентрации O₂ (б) при постоянном значении зазора свечи зажигания (Z = 1,1 мм) от эквивалентного сечения R (мм) КН и пропускной способности F (%) ЭМФ

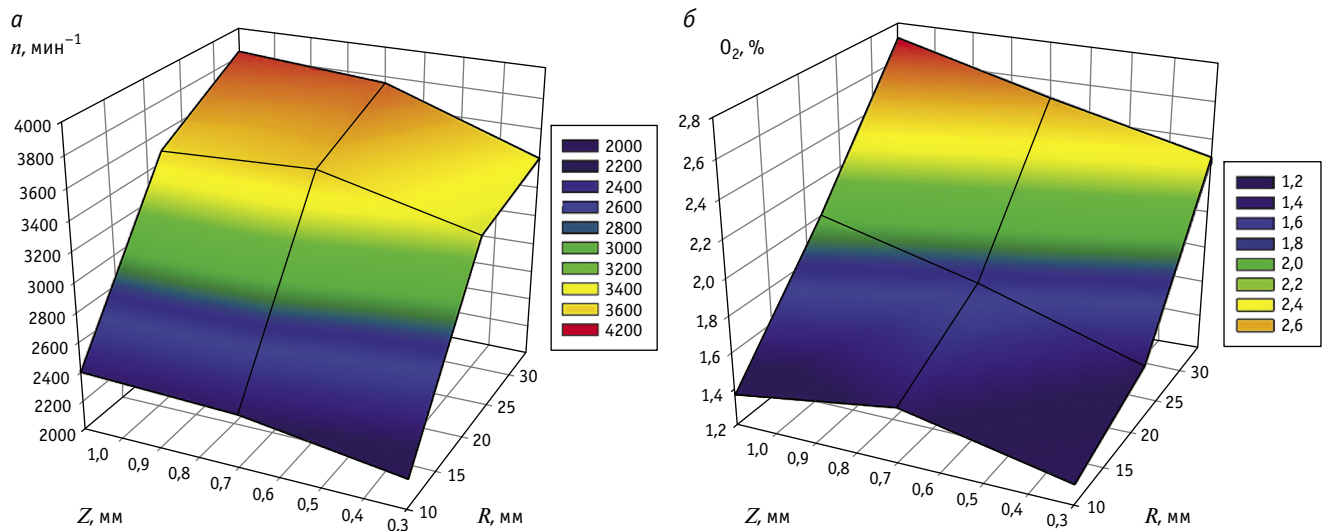


Рис. 9. Поверхности отклика зависимости изменения частоты вращения коленвала двигателя (а) и концентрации O₂ (б) при постоянном значении пропускной способности ЭМФ (F = 106 %) от зазора Z (мм) свечи зажигания и эквивалентного сечения R (мм) КН

Таблица 1

Сравнение данных концентрации O_2 (%) в эксперименте и в математической модели при различных значениях F (%) пропускной способности ЭМФ

$F, \%$	$O_2, \%$		ΔO_2	%
	Эксперимент	Математическая модель		
94	2,7	2,8	0,1	3,57
97	2,22	2,3	0,08	3,48
100	1,55	1,6	0,05	3,12
103	1	1	0	0
107	0,48	0,48	0	0

Таблица 2

Сравнение полученных данных изменения частоты вращения коленвала n (мин^{-1}) в эксперименте и в математической модели при различных значениях R (мм) эквивалентного сечения КН

$R, \text{мм}$	$n, \text{мин}^{-1}$		Δn	%
	Эксперимент	Математическая модель		
10	1670	1750	150	4,57
12	1900	1950	50	2,56
17	2400	2500	100	4
21	2900	2900	0	0
27	3150	3000	150	5
33	2900	2950	50	1,69

Из анализа рис. 9а следует, что минимальная частота вращения коленвала составляет 2200 мин^{-1} при сочетании факторов — минимальном искровом зазоре свечи зажигания в $0,3 \text{ мм}$ и эквивалентном сечении КН в 10 мм . Это связано с низким напряжением ионизации свечи зажигания, а также со значительным противодавлением в выпускной системе. С увеличением эквивалентного сечения КН до 22 мм наблюдается рост частоты вращения коленвала до 3520 мин^{-1} , что связано со снижением противодавления выпускной системы. При номинальном сопротивлении нейтрализатора при сечении в 34 мм и искровом зазоре свечи зажигания в $0,3 \text{ мм}$ частота вращения коленвала составляет 3400 мин^{-1} . При росте искрового промежутка свечи зажигания с $0,7$ до $1,1 \text{ мм}$ наблюдается максимальный рост частоты вращения коленвала до 3840 мин^{-1} .

Анализ рис. 9б показывает, что наименьшее содержание в пробе ОГ компонента O_2 с величиной в $1,31 \%$ наблюдается при таком сочетании факторов: искровой промежуток свечи зажигания — $0,3 \text{ мм}$, эквивалентное сечение КН — 10 мм . Это связано с накоплением выхлопных газов в системе выпуска ОГ. При росте искрового промежутка свечи зажигания до $1,1 \text{ мм}$ с шагом $0,4 \text{ мм}$ и неизменном эквивалентном сечении КН в 10 мм значительного повышения содержания O_2 в пробе ОГ не наблюдается, что также указывает на накопление газов в выпускной системе. При изменении сопротивления нейтрализатора при сечении от 22 до 34 мм с шагом 12 мм происходит повышение содержания O_2 в пробе ОГ, что свидетельствует о затруднениях процесса сгорания ТВС.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В ходе сравнительных испытаний была выполнена проверка сочетания экспериментальных и теоретических данных параметров концентрации O_2 (%) при различных значениях пропускной способности F (%) ЭМФ (табл. 1), графическая интерпретация представлена на рис. 10.

Кроме того, также была проведена проверка сочетания экспериментальных и теоретических данных изменения частоты вращения коленвала n (мин^{-1}) при различных значениях эквивалентного сечения R (мм) КН (табл. 2), графическая интерпретация представлена на рис. 11.

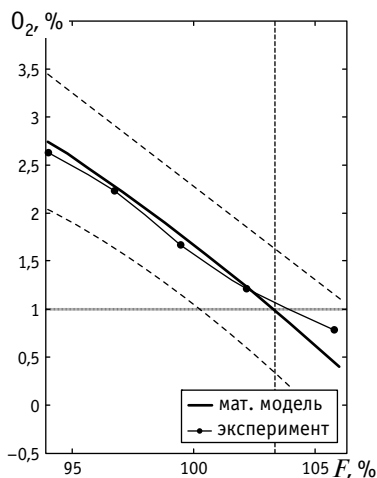


Рис. 10. Сравнение параметров концентрации O_2 (%) при различных значениях пропускной способности F (%) ЭМФ в эксперименте и математической модели

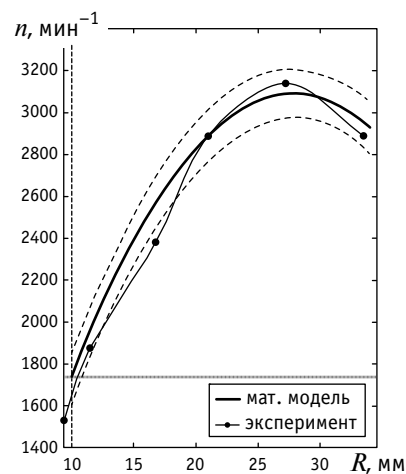


Рис. 11. Сравнение параметров частоты вращения коленвала n (мин^{-1}) при различных значениях эквивалентного сечения R (мм) КН в эксперименте и математической модели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо отметить, что КН, который устанавливается в бензиновых двигателях экологического стандарта Евро-2 и выше, устраняет из ОГ

наиболее вредные компоненты CH , NO_x , CO , преобразуя их в водяной пар, углекислый газ и азот. Причем новый КН имеет идеально квадратные и чистые ячейки без следов деформации и отложений. Неис-

правный же КН не может выполнять своих функций по преобразованию токсичных компонентов ОГ, так как имеет предельное сопротивление, которое существенно мешает очистке цилиндров двигателя.

В практике эксплуатации систем зажигания рабочие зазоры свечи зажигания находятся в пределах 0,7–1,1 мм. Для современных систем зажигания межэлектродный зазор свечи уже превысил 1,3 мм, следовательно, в последующем теоретическом моделировании необходимо изменять верхнее ограничение за-

зора, а минимальное его значение (0,3 мм) соответствует уровню границы пропусков воспламенения ТВС в камере сгорания.

При проведении исследований согласно матрице планирования эксперимента сложность обработки экспериментальных данных была обусловлена влиянием вариации ТВС и граничными пределами изменения коэффициента смесеобразования (избытка воздуха) α . При этом сравнение теоретических и экспериментальных данных показало высокую сходимость (около 95–96 %).

Литература

1. Diesel engine diagnostic training program / A. Ivanov, V. Konovalov, V. Lyandenbursky [et al.] // E 3S Web Conf. 164, 12009 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202016412009.
2. Развитие технических средств диагностирования тракторных ДВС по параметрам рабочих процессов / О. Ф. Савченко, В. В. Альт, С. Н. Ольшевский, И. П. Добролюбов // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 106–112. ISSN 2587–6864.
3. Экспертная система контроля технического состояния автомобилей / А. Д. Шумилин, В. В. Лянденбургский, М. К. Капунова // Научное обозрение. 2016. № 4. С. 85–89. ISSN 1815–4972.
4. Лешаков И. А., Кравченко И. Н., Ерофеев М. Н. Математическая модель расчета основных параметров каталитических нейтрализаторов // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 5. С. 76–80. ISSN 1812–7320.
5. Passive Exhaust System With Cylinder Deactivation / Y. Bemman, T. Frei, C. Jones, M. Keck // SAE Technical Paper 2005-01-2351, 2005. DOI: 10.4271/2005-01-2351.
6. Senapati U., McDevitt I., Hankinson A. Vehicle Refinement Challenges for a Large Displacement Engine with Cylinder Deactivation Capability // SAE Technical Paper 2011-01-1678, 2011. DOI: 10.4271/2011-01-1678.
7. Lapuerta M., Hernández J., Armas O. Kinetic Modelling of Gaseous Emissions in a Diesel Engine // SAE Technical Paper 2000-01-2939, 2000. DOI: 10.4271/2000-01-2939.
8. Study of utilization of petrol engine equipped with exhaust gas recirculation (EGR) and catalytic converter to reduce consumption and NOx emission / F. S. de Araújo Porto, B. A. Bailona, J. R. Camargo [et al.] // SAE Technical Paper 2006-01-2809, 2006. DOI: 10.4271/2006-01-2809.
9. Вертей М. Л. Обоснование способа разгона двигателя с принудительным впрыском топлива и электрическим управлением топливopодачей при проведении тестового диагностирования // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 2 (124). С. 112–116. ISSN 1996–4277.
10. Connolly F. Direct Estimation of Cyclic Combustion Pressure Variability Using Engine Speed Fluctuations in an Internal Combustion Engine // SAE Technical Paper 940143, 1994.
11. Способ диагностирования выпускного тракта поршневого двигателя внутреннего сгорания / А. В. Гриценко, С. С. Куков, К. А. Цыганов, А. В. Горбунов: патент 2474805 Российская Федерация. № 2011139288; заявл. 26.09.2011; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6.
12. Environmental control and test dynamic control of the engine output parameters / A. Gritsenko, V. Shepelev, G. Salimonenko [et al.] // FME Transactions. 2020. Vol. 48. Issue 4. Pp. 889–898.
13. Control of the exhaust gas tract resistance of modern engines by the run-down time during testing / A. Gritsenko, V. Shepelev, K. Lukomsky [et al.] // Tribology in Industry. 2020. Vol. 42. No. 4. Pp. 627–640.
14. Гриценко А. В., Куков С. С., Бакайкин Д. Д. Теоретическое исследование работы электромагнитной форсунки и ее влияние на процесс топливopодачи // Вестник МГАУ им. В. П. Горячкина. 2012. № 3 (54). С. 40–42. ISSN 1728–7936.
15. Гриценко А. В., Zadorozhnaya E. A., Shepelev V. D. Diagnostics of friction bearings by oil pressure parameters during cycle-by-cycle loading // Tribology in Industry. 2018. Vol. 40. No. 2. Pp. 300–310.

Объем статьи 1 авторский лист

References

1. Diesel engine diagnostic training program / A. Ivanov, V. Konovalov, V. Lyandenbursky [et al.] // E 3S Web Conf. 164, 12009 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/202016412009.
2. Development of technical means of diagnosing tractor engine workflow settings [Razvitie tekhnicheskikh sredstv diagnostirovaniya traktornykh DVS po parametram rabochikh protsessov] / O. F. Savchenko, V. V. Alt, S. N. Olshevsky, I. P. Dobrolyubov // Proceedings of GOSNITI. 2015. Vol. 118. Pp. 106–112. ISSN 2587–6864.
3. Expert system of monitoring the technical condition of vehicles [Ekspertnaya sistema kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobiley] / A. D. Shumilin, V. V. Lyandenbursky, M. K. Kapunova [et al.] // Science Review. 2016. No. 4. Pp. 85–89. ISSN 1815–4972.
4. Leshakov I. A., Kravchenko I. N., Erofeev M. N. A mathematical model to calculate the main parameters of catalytic converters [Matematicheskaya model' rascheta osnovnykh parametrov kataliticheskikh neytralizatorov] // Modern high technologies. 2013. No. 5. Pp. 76–80. ISSN 1812–7320.
5. Passive Exhaust System With Cylinder Deactivation / Y. Bemman, T. Frei, C. Jones, M. Keck // SAE Technical Paper 2005-01-2351, 2005. DOI: 10.4271/2005-01-2351.
6. Senapati U., McDevitt I., Hankinson A. Vehicle Refinement Challenges for a Large Displacement Engine with Cylinder Deactivation Capability // SAE Technical Paper 2011-01-1678, 2011. DOI: 10.4271/2011-01-1678.
7. Lapuerta M., Hernández J., Armas O. Kinetic Modelling of Gaseous Emissions in a Diesel Engine // SAE Technical Paper 2000-01-2939, 2000. DOI: 10.4271/2000-01-2939.
8. Study of utilization of petrol engine equipped with exhaust gas recirculation (EGR) and catalytic converter to reduce consumption and NOx emission / F. S. de Araújo Porto, B. A. Bailona, J. R. Camargo [et al.] // SAE Technical Paper 2006-01-2809, 2006. DOI: 10.4271/2006-01-2809.
9. Verтей M. L. Substantiation of free acceleration method for electronically controlled forced fuel injection engine in the process of testing diagnostics [Obosnovanie sposoba razgona dvigatelya s prinuditel'nyim vpryskom topliva i elektricheskim upravleniem toplivopodachey pri provedenii testovogo diagnostirovaniya] // Vestnik of Altai State Agricultural University. 2015. No. 2 (124). Pp. 112–116. ISSN 1996–4277.
10. Connolly F. Direct Estimation of Cyclic Combustion Pressure Variability Using Engine Speed Fluctuations in an Internal Combustion Engine // SAE Technical Paper 940143, 1994.
11. Method of diagnosing the exhaust tract of a piston internal combustion engine [Sposob diagnostirovaniya vypusknogo trakta porshnevoogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya] / A. V. Gritsenko, S. S. Kukov, K. A. Tsyganov, A. V. Gorbunov: patent 2474805 Russian Federation. No. 2011139288; filed 26.09.2011; publ. 27.02.2013, Bulletin No. 6.
12. Environmental control and test dynamic control of the engine output parameters / A. Gritsenko, V. Shepelev, G. Salimonenko [et al.] // FME Transactions. 2020. Vol. 48. Issue 4. Pp. 889–898.
13. Control of the exhaust gas tract resistance of modern engines by the run-down time during testing / A. Gritsenko, V. Shepelev, K. Lukomsky [et al.] // Tribology in Industry. 2020. Vol. 42. No. 4. Pp. 627–640.
14. Gritsenko A. V., Kukov S. S., Bakaykin D. D. Theoretical investigation of electromagnetic injectors and its impact on fuel [Teoreticheskoe issledovanie raboty elektromagnitnoy forsunki i ee vliyanie na protsess toplivopodachi] // Vestnik of MSAU named after V. P. Goryachkin. 2012. No. 3 (54). Pp. 40–42. ISSN 1728–7936.
15. Gritsenko A. V., Zadorozhnaya E. A., Shepelev V. D. Diagnostics of friction bearings by oil pressure parameters during cycle-by-cycle loading // Tribology in Industry. 2018. Vol. 40. No. 2. Pp. 300–310.

УДК 629.4.064.5

Александр Петрович Буйносов, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Михаил Гелиевич Дурандин, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Олег Иванович Тутынин, аспирант кафедры «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

УВЕЛИЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ НА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА, ПУТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ГЛУБОКОГО РАЗРЯДА

Alexander Petrovich Buynosov, DSc in Engineering, Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Mikhail Gelievich Durandin, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Oleg Ivanovich Tutynin, postgraduate student, Electric Traction Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Increase of life cycle of storage batteries used on technical means of railway transport by protection from deep discharge

Аннотация

Модернизация старых видов накопителей энергии приводит к появлению новых, более надежных, эффективных и энергоемких, устройств аккумулярования, но в то же время — более сложных и дорогостоящих. Поэтому поддержание работоспособности и увеличение жизненного цикла традиционных, простых по своей технологии, батарей на железнодорожном транспорте остается по-прежнему актуальной проблемой. В статье рассмотрены причины быстрого выхода из строя одного из самых распространенных видов аккумуляторных батарей, используемых на автомобильном и железнодорожном транспорте, — свинцово-кислотных (SLA). Описаны последствия такого опасного явления, как сульфатация электродов, возникающего по причине глубокого разряда аккумулятора, выявлены дополнительные факторы, приводящие к сульфатации. Предложена принципиальная электрическая схема защиты от критически низкого заряда батарей на основе простых электрических аппаратов — контактора, реле, переключателя, диодов.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, техническое средство, аккумуляторная батарея, жизненный цикл, глубокий разряд, заряд, сульфатация, перегрев, схема защиты, контактор, реле напряжения, переключатель, реле контроля температуры.

Abstract

Modernization of old types of energy storages leads to appearance of new more reliable, efficient and energy-intensive storage devices. But at the same time, they become more complicated and more expensive. That is why maintenance and increase of life cycle for traditional and technologically simple batteries is still actual problem. The paper considers reasons of quick failure one of the most widely spread types of storage batteries used in railway and motor transport — lead-acid batteries. The paper presents consequences of such dangerous phenomenon as sulphation of electrodes arising due to deep discharge of a battery. The authors have revealed additional factors that lead to sulphation. As a result, the authors suggest a principal protection circuit from a critically low charge of batteries on the basis of simple electric devices — a contactor, a relay, a switch and diodes.

Keywords: railway transport, technical mean, storage battery, life cycle, deep discharge, charge, sulphation, overheating, protection circuit, contactor, voltage relay, switch, temperature control relay.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-92-96

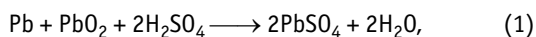
В современном мире, когда автономные источники энергии играют важнейшую роль и в бытовой, и в производственной жизнедеятельности человека, все большую актуальность приобретает использование аккумуляторных накопителей энергии. Сегодня сложно представить сферу, где эти элементы хранения энергии еще не применяются, но особенно широкое распространение они получили в транспортной индустрии, которая является одним из главных драйверов развития аккумуляторной технологии [1, 2].

Существует множество видов аккумуляторных батарей: от традиционных свинцово-кислотных (SLA) до инновационных — литий-ионных (Li-Ion) и литий-полимерных (Li-Pol) — со своими преимуществами и недостатками [3]. Использование двух последних видов на транспорте и в альтернативной энергетике — наиболее надежный и оптимальный вариант, но из-за высокой стоимости материалов и сложности технологии изготовления он является весьма затратным, поэтому чаще применяется первый вид — с меньшей стоимостью и с низкой долговечностью [4, 5].

Главная причина низкой долговечности свинцовых батарей вызвана несоблюдением таких условий их эксплуатации, как рабочая температура и диапазон уровня заряда, который находится в пределах от 20 до 95 % [6]. Причем если первый фактор устраняется без особых трудностей, то устранить второй в процессе эксплуатации довольно непросто. Соответственно поддержание рекомендуемого диапазона заряда остается актуальной задачей для увеличения жизненного цикла аккумуляторной батареи [7, 8].

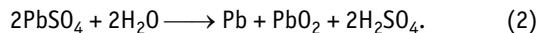
Принцип работы аккумуляторной батареи таков, что в процессе эксплуатации она может работать в трех режимах — в режиме накопления, хранения и отдачи заряда. Разряд — это естественный процесс. Однако если на автомобильном транспорте батарея применяется только для запуска двигателя и во время движения отданный заряд восполняется от исправно работающего генератора, то при использовании батареи как альтернативного источника, например, для поддержания рабочего напряжения на тяговой подстанции или на другом энергетическом объекте в случае аварии разряд может достигать критически низких показателей, что приводит к его выходу из строя [9, 10].

Глубокий разряд негативно воздействует и на свойства электролита, и на сами свинцовые пластины, но что касается потери свойств электролита, то они легко восполняются за счет заряда батареи или полной замены жидкости [11]. Особую же опасность при критическом уровне заряда представляет интенсивная сульфатация пластин, т.е. образование слоя кристаллов сульфата свинца на пластинах. Этот процесс является естественным в режиме разряда и имеет следующую химическую формулу:



где Pb — свинец (отрицательный электрод);
PbO₂ — оксид свинца (положительный электрод);
H₂SO₄ — серная кислота (электролит);
PbSO₄ — сульфат свинца (сульфатация пластин);
H₂O — вода.

Процесс сульфатации по своей природе является обратимым в режиме зарядки не критически разряженной батареи, кристаллы сульфата свинца при повышении плотности электролита имеют свойство растворяться [12]:



При преодолении порогов критической разрядки кристаллы сульфата свинца укрепляются и становятся крупными, при зарядке батареи не разрушаются и остаются на поверхности и в порах пластин. В результате активная масса электродов покрывается сплошным плотным слоем сернистого свинца, изолирующим электроды и препятствующим нормальному их контакту с электролитом, а рабочая площадь пластин сокращается. Соответственно исходная электроемкость падает, батарея разряжается быстрее, дальнейшее систематическое нарушение условий эксплуатации приводит к сокращению жизненного цикла и к окончательной неисправности аккумуляторной батареи [13, 14].

Суть предлагаемого метода повышения жизненного цикла аккумуляторных батарей состоит в том, чтобы вместо использования специальных сложных устройств защиты от глубокого разряда разработать схему на базе простых электрических аппаратов и таким образом получить более простую и одновременно надежную защитную систему [15, 16].

Допустим, мы имеем систему бесперебойного питания постоянного напряжения величиной U , которая начинает работать в случае аварии основного источника. Как правило, для достижения необходимого уровня напряжения U используется множество последовательно соединенных аккумуляторных батарей, поэтому выход одного источника из системы аварийного питания приведет к энергетическому голоданию потребителей и негативным последствиям.

Схему защиты от критического разряда (рис. 1) можно применять как для системы, состоящей из нескольких батарей, так и для одной батареи, требуется только правильно подобрать электрические аппараты под основные характеристики источников.

В силу того что мы имеем дело с постоянным током, необходимо учесть фактор гашения электрической дуги. При переменном токе явление электрической дуги не столь опасно из-за своего переменного характера с периодическим переходом через ноль. В эти моменты выделение энергии в дуге прекращается, и дуга каждый раз самопроизвольно гаснет, а затем снова загорается. При высоких напряжениях в цепях постоянного тока возникает мощный дуговой разряд, который способен привести к неисправностям коммутационного аппарата. В настоящее время данная проблема решается за счет контакторов с дугогасительными камерами. Этот способ эффективный, но наличие таких приспособлений делает аппарат громоздким — неудобным при монтаже и эксплуатации. В предлагаемой схеме защиты батареи (см. рис. 1) используется четырехполюсный контактор постоянного тока без дугогасительных камер, гашение дуги выполняется путем деления длинной дуги на несколько коротких. В нашей схеме один полюс занят отрицательным потенциалом, а остальные три — положительным, разрывающим цепь в трех местах (см. рис. 1).

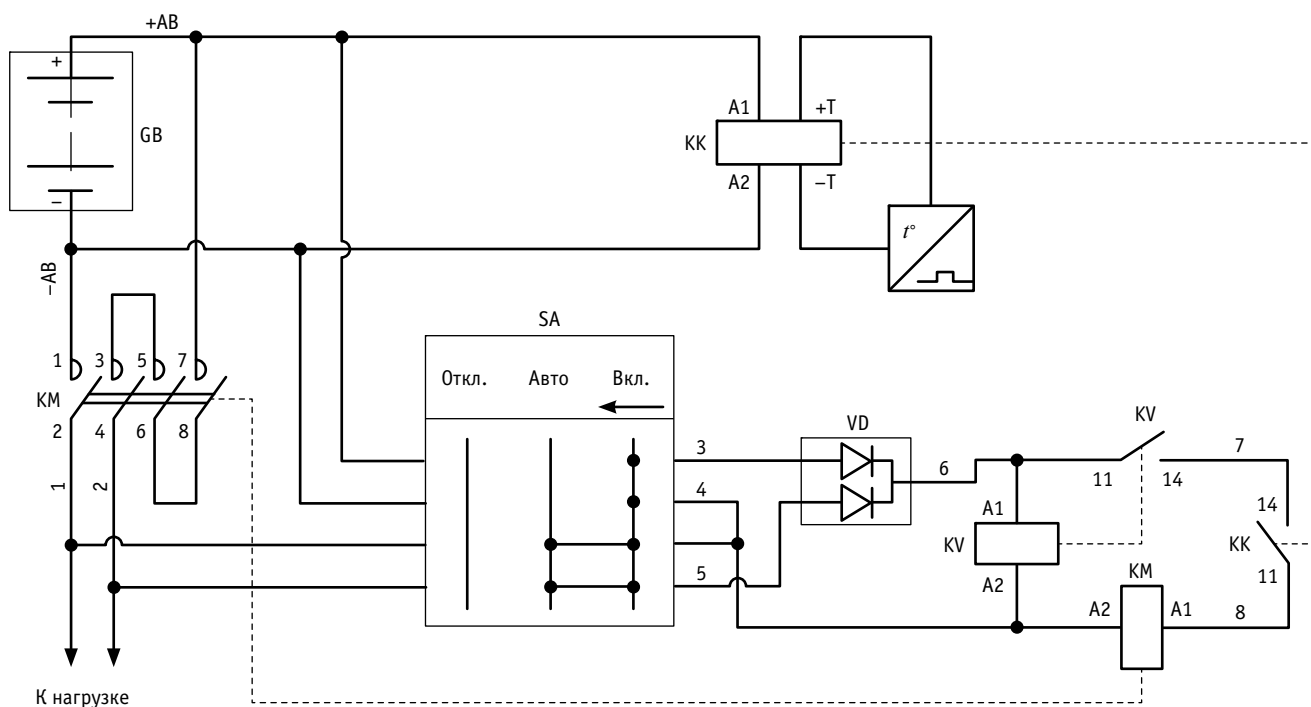


Рис. 1. Схема защиты аккумуляторных батарей от глубокого разряда и перегрева

В состав схемы защиты от глубокого разряда (см. рис. 1) входят: система аккумуляторных батарей GB, электромагнитный контактор KM с четырьмя нормально разомкнутыми контактами, пакетный переключатель на три положения с возвратом из третьего положения SA, диодный мост VD, состоящий из двух диодов, электромагнитное реле напряжения KV с одним нормально разомкнутым контактом и реле контроля температуры KK с одним нормально разомкнутым контактом в комплекте с термодатчиком.

Основная функция контактора KM заключается в дистанционном коммутировании силовой цепи, всего контактор имеет два положения: включено и отключено соответственно. Пакетный переключатель SA выполняет функцию управления коммутацией цепи от источника до потребителя, имеет три режима: полное отключение, автоматическое управление, принудительный взвод контактора KM с возвратом во второе положение. Диодный мост VD выполняет функцию задания правильного направления питающего тока. Реле напряжения KV регулирует замыкание контура управления схемы: при рабочем напряжении контакт замкнут, при низком — разомкнут.

Основная функция реле контроля температуры KK состоит в защите аккумуляторных батарей от перегрева в режиме разряда, поскольку при данном режиме работы в аккумуляторной батарее происходит преобразование химической энергии в электрическую, при которой система батарей может нагреваться как от собственного выделения тепла, так и от соседних с ней. Особенно актуальна защита от перегрева в условиях высоких температур окружающей среды,

поэтому важно дополнительно обеспечить охлаждение аккумуляторного блока.

Перед включением схемы требуется произвести настройку по напряжению реле KV. При этом глубокий разряд считается равным или менее 20 % напряжения батареи [6], потому предел по отключению реле составляет $0,3U$ батареи, а оставшиеся 10 % можно использовать в принудительном режиме, если такая необходимость возникнет. Вторым параметром настройки — рабочей температурой, в этом случае регулировка производится по рекомендуемым значениям завода — изготовителя аккумуляторной батареи, обычно диапазон температур задается в пределах от -20 до $+35$ °.

Принцип действия схемы защиты от критического питания состоит в следующем (см. рис. 1). При подключении проводов +AB и -AB к клеммам аккумуляторной батареи ток потечет к контактору KM, переключателю SA и к катушке реле KK. После включения третьего положения переключателя ток потечет по цепи 3 через диодный мост VD, по положительному потенциалу 6 к катушке реле KV и параллельно — к его нормально открытому контактору. При подаче на электромагнит KV рабочего уровня напряжения контакт реле замкнется, и ток потечет по цепи 7 к контакту теплового реле KK. Если соблюдается заранее настроенный температурный диапазон, то контакт замкнется, и по цепи 8 ток будет питать электромагнитную катушку KM, которая сработает и замкнет четыре своих контакта, коммутируя при этом силовую цепь. Далее питание распределяется на непосредственно нагрузку и управляющую цепь через переключатель SA.

комотивов по данным микропроцессорных систем управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. Т. 63. № 3. С. 69–75. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63). ISSN 1813-9108.

4. Буйносов А. П., Наговицын В. С., Марулин С. Л. Методология развития систем мониторинга, диагностирования, обслуживания и ремонта подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 110–113. ISSN 2079-5920.
5. Худояров Д. Л., Тюшев И. А. Развитие систем бортовой диагностики локомотивов // Инновационный транспорт. 2018. № 4 (30). С. 43–48. ISSN 2311-164X.
6. Буйносов А. П., Худояров Д. Л., Тюшев И. А. Алгоритмизация процесса расшифровки диагностической информации современных локомотивов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2020. № 4 (53). С. 9–11. ISSN 1818-5509.
7. Наговицын В. С., Буйносов А. П. Структурная классификация технических средств диагностики тягового подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 326–329. ISSN 2079-5920.
8. Буйносов А. П. Модель эксплуатационного износа сложных систем железнодорожного транспорта // Вестник транспорта Поволжья. 2010. № 4 (24). С. 21–25. ISSN 1997-0722.
9. Буйносов А. П., Наговицын В. С., Боярских Г. С. Уральский характер (Свердловской дороге — 120 лет) // Локомотив. 1998. № 10. С. 8–10. ISSN 0869-8147.
10. Буйносов А. П., Умылин И. В. Разработка схемы стабилизации зарядки аккумуляторных батарей на моторвагонном подвижном составе // Вестник транспорта Поволжья. 2016. № 4. С. 36–39. ISSN 1997-0722.
11. Development of a model of a source of stabilized battery charge current on electric trains with rheostatic braking / A. Buynosov, A. Borodin, A. Alexandrov, I. Umylin // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. Pp. 255–280.
12. Васильев В. А. Анализ возможности применения емкостных накопителей энергии на электрическом подвижном составе // Известия ПГУПС. 2011. № 1 (26). С. 35–44. ISSN 2658-6851.
13. Логинова Е. Ю., Коваленко А. В. Аккумуляторные накопители энергии на метропоездах // Мир транспорта. 2014. Т. 12. № 1 (50). С. 50–57. ISSN 1992-3252.
14. Титова Т. С., Евстафьев А. М. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии // Известия ПГУПС. 2017. Т. 14. № 2. С. 200–210. ISSN 2658-6851.
15. Мазнев А. С., Евстафьев А. М. Применение энергонакопительных устройств на электроподвижном составе // Транспорт Урала. 2009. № 2 (21). С. 83–85. ISSN 1815-9400.
16. Буйносов А. П., Дурандин М. Г., Тутьнин О. И. Перспективы использования накопителей электрической энергии на моторвагонном подвижном составе // Вестник УрГУПС. 2020. № 4 (48). С. 35–45. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-4-35-45. ISSN 2079-0392.

niya elektricheskikh mashin lokomotivov po dannym mikroprotsessornykh sistem upravleniya] // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2019. Vol. 63. No. 3. Pp. 69–75. DOI: 10.26731/1813-9108.2019.3(63). ISSN 1813-9108.

4. Buynosov A. P., Nagovitsyn V. S., Marulin S. L. The methodology for the development of systems for monitoring, diagnosis, maintenance and repair of rolling stock [Metodologiya razvitiya sistem monitoringa, diagnostirovaniya, obsluzhivaniya i remonta podvizhnogo sostava] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2018. No. 11. Pp. 110–113. ISSN 2079-5920.
5. Khudoyarov D. L., Tyushev I. A. Development of locomotive on-board diagnostics systems [Razvitie sistem bortovoy diagnostiki lokomotivov] // Innotrans. 2018. No. 4 (30). Pp. 43–48. ISSN 2311-164X.
6. Buynosov A. P., Khudoyarov D. L., Tyushev I. A. Algorithmization of interpretation process of diagnostic information from modern locomotives [Algoritmizatsiya protsessa rasshifrovki diagnosticheskoy informatsii sovremennykh lokomotivov] // Works of RGUPS. 2020. No. 4 (53). Pp. 9–11. ISSN 1818-5509.
7. Nagovitsyn V. S., Buynosov A. P. Structural classification of means of diagnostics of the traction rolling stock [Strukturnaya klassifikatsiya tekhnicheskikh sredstv diagnostiki tyagovogo podvizhnogo sostava] // Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2012. No. 6. Pp. 326–329. ISSN 2079-5920.
8. Buynosov A. P. A work wear model of rail transport complex systems [Model' ekspluatatsionnogo iznosa slozhnykh sistem zheleznodorozhnogo transporta] // Bulletin of transport of the Volga region. 2010. No. 4 (24). Pp. 21–25. ISSN 1997-0722.
9. Buynosov A. P., Nagovitsyn V. S., Boyarskikh G. S. The Ural character (Sverdlovsk Railway — 120th anniversary) [Ural'skiy kharakter (Sverdlovskoy doroge — 120 let)] // Locomotive. 1998. No. 10. Pp. 8–10. ISSN 0869-8147.
10. Buynosov A. P., Umylin I. V. Development of schemes for stabilizing the battery charging on multiple unit rolling stock [Razrabotka sxemy stabilizatsii zaryadki akkumulyatornykh batarey na motorvagonnom podvizhnom sostave] // Bulletin of transport of the Volga region. 2016. No. 4. Pp. 36–39. ISSN 1997-0722.
11. Development of a model of a source of stabilized battery charge current on electric trains with rheostatic braking / A. Buynosov, A. Borodin, A. Aleksandrov, I. Umylin // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1115. Pp. 255–280.
12. Vasilyev V. A. The analysis of application possibility of the capacitor energy storing devices on the electric rolling stock [Analiz vozmozhnosti primeneniya emkostnykh nakopiteley energii na elektricheskom podvizhnom sostave] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2011. No. 1 (26). Pp. 35–44. ISSN 2658-6851.
13. Loginova E. Yu., Kovalenko A. V. Accumulating power storage devices for metro trains [Akkumulyatornye nakopiteli energii na metropoezdakh] // World of Transport and Transportation. 2014. Vol. 12. No. 1 (50). Pp. 50–57. ISSN 1992-3252.
14. Titova T. S., Evstafeyev A. M. Energy efficiency improvement of locomotives with energy storages [Povyshenie energeticheskoy effektivnosti lokomotivov s nakopiteleyami energii] // Proceedings of Petersburg Transport University. 2017. Vol. 14. No. 2. Pp. 200–210. ISSN 2658-6851.
15. Maznev A. S., Evstafeyev A. M. Application of energy storage devices on electric rolling stock [Primenenie energonakopitel'nykh ustroystv na elektropodvizhnom sostave] // Transport of the Urals. 2009. № 2 (21). Pp. 83–85. ISSN 1815-9400.
16. Buynosov A. P., Durandin M. G., Tutynin O. I. Prospects for using electric energy storage devices on motor-car rolling stock [Perspektivy ispol'zovaniya nakopiteley elektricheskoy energii na motorvagonnom podvizhnom sostave] // Herald of USURT. 2020. No. 4 (48). Pp. 35–45. DOI: 10.20291/2079-0392-2020-4-35-45. ISSN 2079-0392.

Объем статьи 0,6 авторских листа

УДК 621.316

Евгений Александрович Третьяков, кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия,
Егор Геннадьевич Авдиенко, аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), Омск, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЕЗДА В ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ ПО ДАННЫМ БОРТОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Evgeniy Alexandrovich Tretyakov, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia,
Egor Gennadyevich Avdienko, postgraduate student, Electric Rolling Stock Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, Russia

Determination of train parameters on route according to data from on-board measurement systems on freight electric locomotives

Аннотация

В статье предложен подход к определению фактических параметров движения поезда по данным бортовых систем измерений для повышения эффективности использования системы автоматического ведения электроподвижного состава. Выполнен анализ научных трудов в области совершенствования системы автоведения электровоза. Представлены результаты сопоставления тяговых расчетов в программе КОРТЭС и реальных данных с бортовых систем измерений электровоза серии 2ЭС6 на участке Западно-Сибирской железной дороги. Обоснована возможность применения данных, полученных с бортовых систем измерений в режиме реального времени, для определения таких параметров поезда, как вращающий момент тяговых двигателей, сила тяги электровоза, внешние силы сопротивления движению, приведенная масса поезда и пр. Предложенный подход к определению параметров поезда по данным текущих измерений позволит повысить точность выдачи управляющих воздействий и эффективность использования системы автоведения поезда.

Ключевые слова: электроподвижной состав, система автоведения, тяговые расчеты, уравнение движения, бортовые системы измерения, повышение эффективности.

Abstract

The paper suggests an approach to determination of actual train operation parameters according to data from on-board measurement systems in order to increase efficiency of application of automatic electric motive power operation systems. The authors have analysed scientific works in the sphere of improvement of automatic electric locomotive operation. The paper also presents results of comparison of grade computations in KORTES and real data from on-board measurement systems on 2ES6 electric locomotives that operate on a section of the West-Siberian Railway. As a result, the authors have substantiated a possibility to apply data gained from on-board measurement systems in real-time mode for determination of such train parameters as tractive effort torque of traction motors, electric locomotive traction effort, external forces of train tractive resistance, reduced gross load hauled and etc. The approach to determination of train parameters according to data of current measurements allows increasing peculiarity of transmission of control actions and efficiency of an automatic train operation system.

Keywords: electric motive power, automatic train operation system, movement equation, on-board measurement systems, increase of efficiency.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-97-102

В настоящее время для повышения эффективности деятельности и конкурентоспособности холдинга «РЖД» внедряются прорывные информационные технологии. В их основу положены программы развития компании ОАО «РЖД», а также научно-технический проект «Цифровая железная дорога» [1–3]. Эти стратегии предполагают внедрение имитационного моделирования, технологии «Промышленный интернет вещей», использование «Больших данных», что открывает возможность обрабатывать огромные массивы данных, а в дальнейшем прогнозировать на их основе поездную ситуацию в режиме реального времени.

Развитие цифровых информационных интеллектуальных технологий требует разработки иных подходов к системе автоматического управления (автоведения) поездом, связанных с использованием не только данных измерений локомотива в процессе движения, но и более совершенных алгоритмов, обеспечивающих учет большего количества факторов и прогнозирование развития ситуации в процессе движения. Актуальность данной тематики также обусловлена необходимостью повышения доли использования системы автоведения в процессе поездки, так как в некоторых случаях эта система не способна в полной мере выполнять необходимые алгоритмы управления.

В области совершенствования системы автоведения известно достаточно большое количество научных исследований (например, работы Л. А. Баранова [4–6], В. А. Лазаряна [7], Л. А. Мугинштейна [8], Б. Д. Никифорова [9], А. В. Плакса [10], М. С. Пясики [11], И. А. Ябло [12]). Среди них тематике исследования наиболее близки работы [13] и [14], которые посвящены применению искусственных нейронных сетей (ИНС) для модели поезда в тяговых расчетах на основе обработки данных о текущих параметрах движения электровоза. К главным недостаткам предлагаемых подходов в области совершенствования системы

автоведения поезда на основе нейронных сетей можно отнести следующие. Во-первых, поиск оптимальных уставок силы тяги решается на основе обучения искусственных рекуррентных нейронных сетей по ретроспективным данным за последние 30 с среди массы аналогичных на исследуемом участке поездок с минимальным расходом электроэнергии, без учета реальных внешних факторов в текущий момент. При этом система автоведения настраивается на «лучшую» оптимальную из заложенных в базу и выполненных в прошлом поездок, т.е. не обладает адаптивностью к изменению внешних факторов на основе измеренных текущих поездных данных (состояние локомотива, погодные условия, состояние пути и т.п.). Во-вторых, параметры движения определяются по действующим правилам тяговых расчетов (ПТР), т.е. удельные сопротивления движению задаются с использованием эмпирических формул, что снижает вероятность получения оптимальных режимов ведения поезда.

В связи с вышесказанным авторами предлагаются, среди прочего, следующие основные пути повышения эффективности использования системы автоведения грузовых электровозов: отказ от части правил тяговых расчетов, выполняемых на основе эмпирических зависимостей, и переход к мгновенным тяговым расчетам по данным текущих измерений;

определение ряда параметров электровоза и поезда на основе текущих измерений (массы состава, силы тяги, сил сопротивления движению, силы инерции и пр.);

построение энергооптимальной траектории движения поезда в режиме реального времени с учетом данных текущих измерений электровоза.

Как известно, ПТР [15] устанавливают основные нормы, принимаемые в расчетах, определяют порядок и методику тяговых расчетов, а также служат основой для расчета расхода электроэнергии и топлива на тягу поездов. Согласно [15], сопротивления движению поезда определяются по эмпирическим формулам, при этом фактическое удельное сопротивление движению поезда даже с учетом поправочных коэффициентов от воздействия окружающей среды может отличаться от расчетного в 3–4 раза, как показано в [15].

Выполним сопоставление результатов моделирования тока электровоза 2ЭС6 на части участка Московка — Кабаклы в программном комплексе КОРТЭС и фактических значений, полученных с регистраторов параметров движения (рис. 1).

Как следует из рис. 1, на протяжении всего участка значение фактического тока электровоза существенно расходится с моделируемым.

Сегодня бортовые измерительные системы современных электровозов создают основу для определения параметров движения поезда по фактическим данным в режиме реального времени. Что касается ранее применявшихся подходов, базирующихся на ПТР, то они не учитывают фактические эксплуатационные условия в достаточном объеме.

При помощи данных, расшифрованных с регистраторов параметров движения электровозов серии 2ЭС6, нами исследованы законы управления током возбуждения на реостатных и ходовых позициях в режиме тяги, в том числе чтобы определить устойчивые взаимосвязи между параметрами силовой цепи электровоза, соответствующими заявленным характеристикам тяговых электродвигателей и локомотива.

Согласно руководству по эксплуатации 2ЭС6, закон управления током возбуждения определяется по выражению

$$I_B = I_{B,уст} + k \cdot I_{я'} \quad (1)$$

где I_B — ток возбуждения тягового электродвигателя, А;

$I_{я'}$ — ток якоря тягового электродвигателя, А;

$I_{B,уст}$ — уставка тока возбуждения, А;

k — коэффициент компаундирования.

На рис. 2 представлена зависимость тока возбуждения от тока якоря на реостатных позициях по данным регистратора параметров движения электровоза серии 2ЭС6.

Анализ рис. 2 позволяет сделать вывод, что на реостатных позициях наблюдается удовлетворительная сходимость измеренных данных с законом управления током возбуждения при $I_{B,уст} = \text{const}$ по выражению (1).

Для повышения достоверности результатов исследований рассмотрим участки движения поезда на реостатных позици-

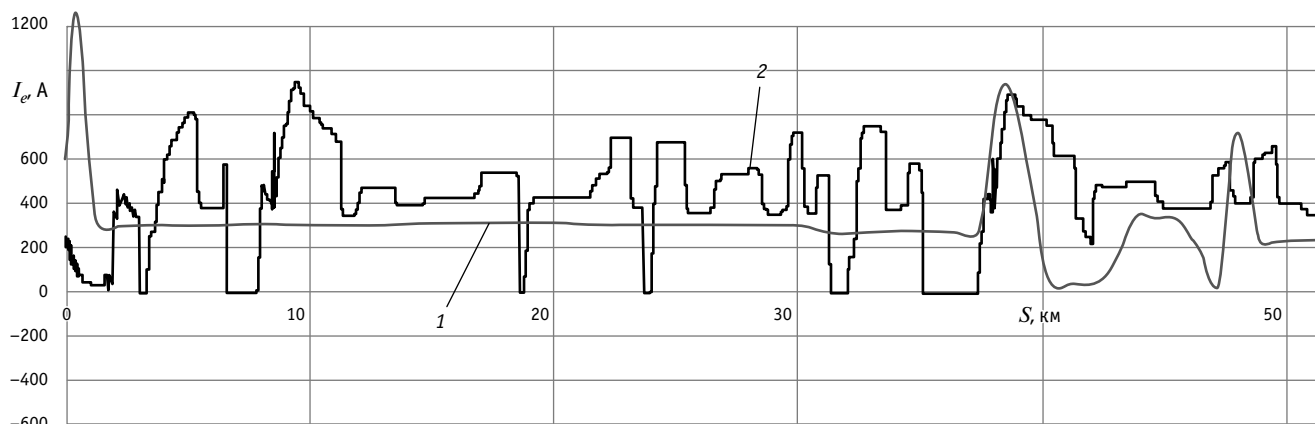


Рис. 1. Ток электровоза:

1 — по программе КОРТЭС; 2 — с бортовых измерительных систем

ях с высокой сходимостью экспериментальных точек и аппроксимирующей прямой, описывающей закон управления током возбуждения при $I_{в.уст} = \text{const}$. При этом на реостатных позициях с 1 по 22 выполняется набор скорости, описываемый уравнением движения поезда. На ходовых позициях при постоянной скорости движения отсутствует возможность определения ряда параметров поезда по измеренным данным.

На рис. 3 показаны три группы кластеров по диапазонам значений $I_{в.уст}$.

Из представленных данных следует, что закон изменения $I_{в}$ при $I_{в.уст} < 150$ А соответствует уравнению (1). Кроме того, закон управления током возбуждения на электровозе 2ЭС6 обеспечивает изменение жесткости скоростных характеристик тяговых электродвигателей при $I_{в.уст} = \text{var}$, как оказалось, на ходовых позициях. Зная закон изменения $I_{в}$ можно вырабатывать более точные управляющие воздействия системы автоведения грузового электровоза.

Использование текущих измерений бортовых систем электровозов и мгновенных тяговых расчетов, как предлагается, позволит повысить достоверность определения параметров движения грузового

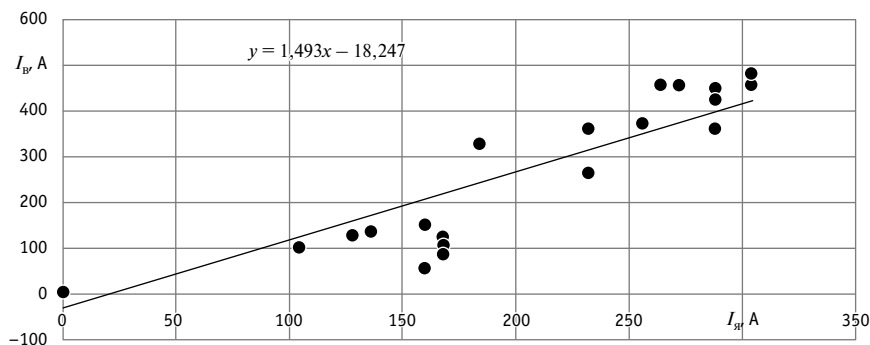


Рис. 2. Зависимость тока возбуждения от тока якоря на реостатных позициях

го поезда и окружающей инфраструктуры в режиме реального времени, а значит, эффективность системы автоведения.

Рассмотрим возможность использования данных с бортовых систем электровозов серии 2ЭС6 для определения параметров поезда, включая вращающий момент тяговых электродвигателей, силу тяги секций электровоза, фактическое суммарное сопротивление движению, инертные свойства и пр.

Уравнение движения поезда в первой форме записывается в виде [15]

$$m(1 + \gamma) \frac{dv}{dt} + \xi W = \xi F_k, \quad (2)$$

где m — масса состава, т;

$(1 + \gamma)$ — коэффициент инерции вращающихся частей;

dv — изменение скорости, м/с;

dt — изменение времени, с;

ξ — переводной коэффициент;

W — сопротивление движению поезда, кН;

F_k — сила тяги электровоза, кН.

С точки зрения свойств инертности поезда выражение $m(1 + \gamma)$ можно рассматривать как единое целое. Поскольку на основе данных измерений нельзя выделить составляющие поступательного и вращательного движения, можно принять $m' = m(1 + \gamma)$.

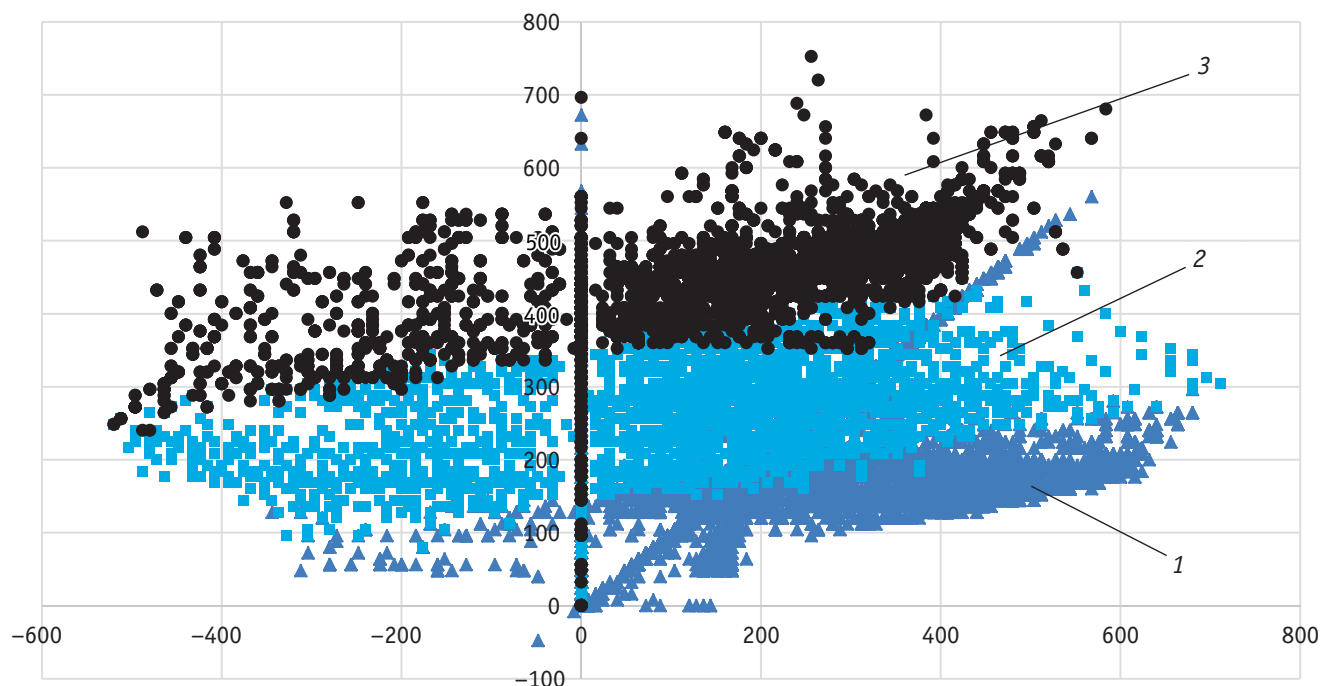


Рис. 3. Кластеризация зависимости $I_{в}$ от $I_{я}$ при различных значениях $I_{в.уст}$:
 1 — при $I_{в.уст} < 150$ А; 2 — при $I_{в.уст}$ от 150 до 350 А; 3 — при $I_{в.уст}$ от 350 до 660 А

Силу тяги электровоза можно определить на основе данных измерений регистраторами параметров движения (так называемых РПМ-файлов) по выражению

$$F_{\text{РПМ}} = 8 \cdot M \frac{3,44 \cdot \eta}{1,21 \cdot 10^3}, \quad (3)$$

где M — вращающий момент тягового электродвигателя, Н · м;
 η — КПД двигателя.

Выражение для вращающего момента тягового электродвигателя ДПТ-810 получено авторами на основе аппроксимации известной магнитной характеристики от тока возбуждения I_B [15]:

$$M = \frac{I_B}{868,678 + 2,676 \cdot I_B}. \quad (4)$$

Микропроцессорная система управления и диагностики электровоза 2ЭС6 также выполняет расчет силы тяги электровоза $F_{\text{расч}}$ по данным измерений.

На рис. 4 представлены зависимости $F_{\text{расч}}$ и $F_{\text{РПМ}}$ на участке Московка — Кабаклы на С-соединении тяговых электродвигателей.

Как следует из рис. 4, наиболее высокая сходимость наблюдается на реостатных позициях С-соединения (до 50-й секунды).

На основе экспериментальных данных бортовых систем можно получить значения таких параметров, как сопротивление движению и приведенная масса поезда. Из формулы (1) для исследуемого участка с набором скорости на реостатных позициях следует, что $\frac{dv}{dt} > 0$.

Если рассматривать составляющие уравнения (1) в малых приращениях, то с достаточно высокой точностью можно записать:

$$\begin{cases} m' \frac{v_{i+1} - v_i}{t_{i+1} - t_i} + \xi W = \xi F_{\text{Ки}}; \\ m' \frac{v_{i+2} - v_{i+1}}{t_{i+2} - t_{i+1}} + \xi W = \xi F_{\text{К}(i+1)}, \end{cases} \quad (5)$$

где v_i, v_{i+1}, v_{i+2} — мгновенная скорость движения поезда в моменты времени t_i, t_{i+1}, t_{i+2} , м/с;

$F_{\text{Ки}}, F_{\text{К}(i+1)}$ — мгновенные значения силы тяги поезда в соответствующие моменты времени ($F_{\text{К}} = F_{\text{РПМ}}$), Н·м.

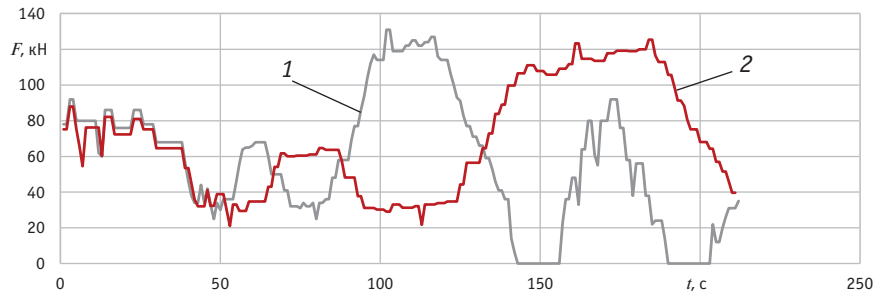


Рис. 4. Значения силы тяги на С-соединении: 1 — $F_{\text{РПМ}}$; 2 — $F_{\text{расч}}$

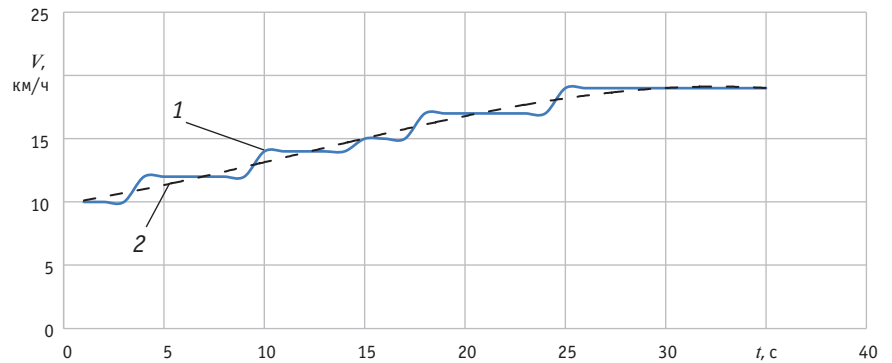


Рис. 5. Аппроксимация функции скорости движения поезда:

1 — график скорости; 2 — аппроксимирующий полином третьего порядка

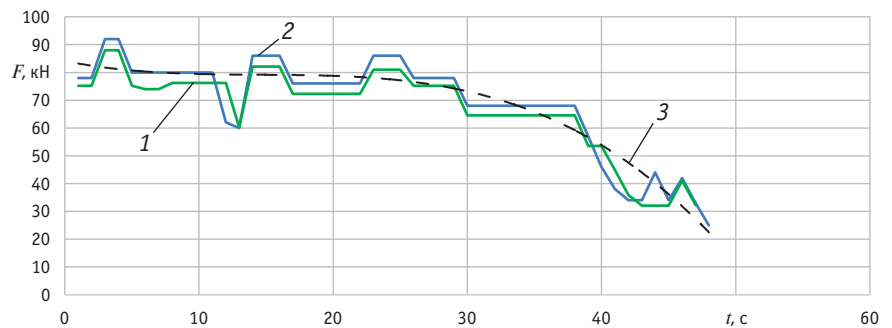


Рис. 6. Изменение силы тяги поезда при наборе скорости:

1 — $F_{\text{РПМ}}$; 2 — $F_{\text{расч}}$; 3 — аппроксимирующий полином третьего порядка

Аналогично составляется система уравнения для последующих групп моментов времени. Систему уравнения (5) можно представить в матричной форме относительно неизвестных:

$$\begin{bmatrix} m' \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_{i+1} - v_i}{t_{i+1} - t_i} + \xi \\ \frac{v_{i+2} - v_{i+1}}{t_{i+2} - t_{i+1}} + \xi \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \xi F_{\text{Ки}} \\ \xi F_{\text{К}(i+1)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Чтобы исключить нулевые приращения скорости, обусловленные разряд-

ностью бортовой измерительной системы электровоза (шаг измерения скорости составляет 1 км/ч), график скорости по времени на участке Московка — Кабаклы предлагается аппроксимировать полиномом третьего порядка (рис. 5).

Аналогично на участке Московка — Кабаклы (реостатные позиции 1–22 на С-соединении) аппроксимирована функция силы тяги $F_{\text{РПМ}}$ (рис. 6). Мгновенные значения силы тяги в соответствующие моменты времени задавались в выражение (5) на основе аппроксимирующей кривой.

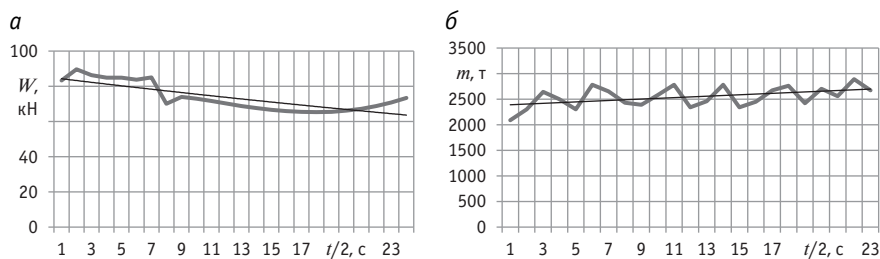


Рис. 7. Расчетные значения силы сопротивления движению (а) и мгновенной эквивалентной меры инертности поезда (б)

В результате решения системы уравнений (б) получены мгновенные значения приведенной массы и сопротивления движению поезда (рис. 7). Среднее значение приведенной массы на участке с набором скорости составило 2520 т, среднее значение сопротивления движению — 70 кН.

Таким образом, результаты определения эквивалентной массы и удельно-

го сопротивления движению поезда, полученные на основе мгновенных тяговых расчетов и данных текущих измерений с бортовых систем электровозов, показали статистическую устойчивость. Их использование в режиме реального времени даст возможность повысить не только точность определения силы тяги с учетом фактического влияния внешней сре-

ды, но и эффективность системы автоведения грузовых электровозов в целом.

При использовании предлагаемого подхода не требуется задавать исходные данные (тип вагона, массу вагона и поезда, количество осей поезда, расчетную массу электровоза и пр.), так как необходимые переменные уравнения движения поезда можно получить на основе текущих измерений бортовых систем электровоза с учетом фактических, а не расчетных внешних условий и влияния инфраструктуры.

Научный интерес представляет также определение параметров поезда по мгновенным тяговым расчетам и данным текущих измерений с бортовых систем электровозов во всех режимах работы, включая движение с установившейся скоростью, выбег, торможение, что является предметом дальнейших исследований авторов.

Литература

1. Долгосрочная программа развития открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2025 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 г. № 466р. Москва, 2019. 135 с.
2. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204. Москва, 2018. 19 с.
3. Концепция реализации комплексного научно-технического проекта «Цифровая железная дорога»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 05.12.2017 г. № 1285. Москва, 2017. 92 с.
4. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом. Ч. 1. Теория автоматического управления / Л. А. Баранов, А. Н. Савоскин, О. Е. Пудовиков [и др.]; под ред. Л. А. Баранова и А. Н. Савоскина. Москва, 2013. 398 с.
5. Микропроцессорные системы автоведения подвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев, В. М. Максимов; под ред. Л. А. Баранова. Москва: Транспорт, 1990. 272 с.
6. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь; под ред. Л. А. Баранова. Москва: МИИТ, 2001. 164 с.
7. Мугинштейн Л. А., Лисицын А. Л. Нестационарные режимы тяги: Сцепление. Критическая норма массы поезда. Москва: Интекст, 1996. 176 с.
8. Локомотивная система управления и обеспечения безопасности / Б. Д. Никифоров, М. Д. Рабинович, А. А. Хацкелевич [и др.] // Железнодорожный транспорт. 2004. № 8. С. 60–64. ISSN 0044–4448.
9. Плакс А. В. Системы управления электрическим подвижным составом. Москва: УМЦ ЖДТ; Маршрут, 2005. 358 с.
10. Пястик М. С. Энергооптимальная система автоведения электровозов, адаптированная к условиям движения: диссертация на со-

References

1. Long-term development program of the JSC «Russian Railways» up to 2025 [Dolgosrochnaya programma razvitiya otkrytogo aktsionernogo obshhestva «Rossiyskie zheleznye dorogi» do 2025 goda]: approved by the Order of the Government of the Russian Federation from 19.03.2019 No. 466r. Moscow, 2019. 135 p.
2. On national goals and strategic tasks of development of the Russian Federation for the period up to 2024 [O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda]: Decree of the President of the Russian Federation dated 07.05.2018 No. 204. Moscow, 2018. 19 p.
3. Concept of realization of complex scientific and technical project «Digital railway» [Kontseptsiya realizatsii kompleksnogo nauchno-tekhnicheskogo proekta «Tsifrovaya zheleznyaya doroga»]: approved by the Order of the JSC «RZD» dated 05.12.2017 No. 1285. Moscow, 2017. 92 p.
4. Automated systems for electric motive power control. Part 1. Automatic control theory [Avtomatizirovannye sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom. Ch. 1. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya] / L. A. Baranov, A. N. Savoskin, O. E. Pudovikov [et al.]; ed. by L. A. Baranov and A. N. Savoskin. Moscow, 2013. 398 p.
5. Microprocessor systems for automatic rolling stock operation [Mikroprotsessornyye sistemy avtovedeniya podvizhnogo sostava] / L. A. Baranov, Ya. M. Golovicher, E. V. Erofeev, V. M. Maximov; ed. by L. A. Baranov. Moscow: Transport, 1990. 272 p.
6. Optimization of train operation control [Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov] / L. A. Baranov, E. V. Erofeev, I. S. Meleshin, L. M. Chin'; ed. by L. A. Baranov. Moscow: MIIT, 2001. 164 p.
7. Muginshteyn L. A., Lisitsyn A. L. Non-stationary modes of traction: Adhesion. Critical gross load hauled limit [Nestatsionarnyye rezhimy tyagi: Stseplenie. Kriticheskaya norma massy poezda]. Moscow: Intext, 1996. 176 p.
8. Locomotive system for control and provision of safety [Lokomotivnaya sistema upravleniya i obespecheniya bezopasnosti] / B. D. Nikiforov, M. D. Rabinovich, A. A. Khatskelevich [et al.] // Railway Transport. 2004. No. 8. Pp. 60–64. ISSN 0044–4448.
9. Plaks A. V. Systems for electric motive power control [Sistemy upravleniya elektricheskim podvizhnym sostavom]. Moscow: UMTs ZhDT; Route, 2005. 358 p.

искание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2003. 101 с.

11. Ябло И. А. Численный метод определения энергооптимального управления движением поезда // Железнодорожный транспорт на новом этапе развития. Москва : Интекст, 2003. С. 129–135.
12. Правила тяговых расчетов для поездной работы: распоряжение ОАО «РЖД» от 12.05.2016 г. № 867р. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (дата обращения: 04.03.2022).
13. Малахов С. В. Оптимизация энергозатрат на тягу поездов на основе уточненного метода тяговых расчетов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2021. 147 с.
14. Перестенко А. Ю. Повышение эффективности использования магистральных грузовых электровозов посредством управления режимами эксплуатации: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск, 2021. 18 с.
15. Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. Теория электрической тяги / Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1983. 328 с.

10. Pyasik M. S. Energy-optimal automatic train operation system for electric locomotives adapted to operation conditions [Energooptimal'naya sistema avtovedeniya elektrovozov, adaptirovannaya k usloviyam dvizheniya]: PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2003. 101 p.

11. Yabko I. A. Numerical method for determination of energy-optimal train operation control [Chislennyy metod opredeleniya energooptimal'nogo upravleniya dvizheniem poezda] // Railway transport on a new stage of development. Moscow: Intext, 2003. Pp. 129–135.
12. Rules of grade computations for train operation [Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty]: Order of the JSC «RZD» dated 12.05.2016 No. 867r. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200079084> (access date: 04.03.2022).
13. Malakhov S. V. Optimization of energy losses on traction of trains on the basis of refined method of grade computations [Optimizatsiya energozatrat na tyagu poezdov na osnove utochnennogo metoda tyagovykh raschetov]: PhD in Engineering Thesis. Moscow, 2021. 147 p.
14. Perestenko A. Yu. Increase of efficiency of using mainline freight electric locomotives by means of control of operation modes [Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya magistral'nykh gruzovykh elektrovozov posredstvom upravleniya rezhimami ekspluatatsii]: Synopsis of PhD in Engineering Thesis. Omsk, 2021. 18 p.
15. Rozenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N. Theory of electric traction [Teoriya elektricheskoy tyagi] / 2rd edition, revised and enlarged. Moscow : Transport, 1983. 328 p.

Объем статьи 0,7 авторских листа

УДК 621.315.65 (08)

Татьяна Анатольевна Несенюк, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические машины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Виктор Николаевич Соколов, кандидат химических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Петр Сергеевич Гончарь, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ RFID-КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯТОРОВ

Tatyana Anatolyevna Nesenyuk, PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Machinery Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Viktor Nikolaevich Sokolov, PhD in Chemistry, Associate Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Petr Sergeevich Gonchar, PhD in Pedagogic, Associate Professor, Natural Science Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Pilot tests of system for RFID-control of insulators

Аннотация

В статье рассмотрены результаты опытно-промышленных испытаний системы RFID-контроля штыревых изоляторов на линиях устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и продольного электроснабжения (ПЭ) действующего участка железной дороги. Система RFID-контроля включает в себя штыревые изоляторы со встроенными RFID-индикаторами, регистрирующее устройство и программное обеспечение. Цель испытаний — оценка нового метода бесконтактного контроля диэлектрического состояния изоляторов в условиях эксплуатации на действующей линии электропередачи (ЛЭП). В случае снижения диэлектрической прочности система RFID-контроля фиксирует дефектный изолятор регистрирующим устройством и при помощи программного обеспечения устанавливает его точное местоположение на контролируемом участке воздушной линии электропередачи (ВЛ). На первом этапе все исследования выполнены с использованием разработанного прототипа переносного RFID-регистратора, определяющего зоны действия RFID-индикаторов в области опоры линии СЦБ. Оператор фиксирует ответные сигналы индикаторов через каждые 30°, двигаясь радиально через каждые 1, 2, 3, 4 и 5 м относительно опоры ЛЭП. По результатам исследований первого этапа разработана технология установки индикатора на штыревые изоляторы действующей линии электропередачи. Обосновано внедрение системы RFID-контроля изоляторов ВЛ в сетях с изолированной нейтралью для линий СЦБ и ПЭ.

Ключевые слова: линия электропередачи, система RFID-контроля изоляторов, штыревой изолятор с RFID-индикатором, опытно-промышленные испытания, RFID-регистратор, диаграммы направленности, линии устройств СЦБ и ПЭ.

Abstract

The paper considers results of pilot tests of a system for RFID-control of bracket insulators on signalling and interlocking lines and longitudinal power supply lines on an operating railway section. The system for RFID-control includes bracket insulators with built-in RFID-indicators, a registration device and software. The aim of tests is to assess a new method of contactless control of dielectric conditions of insulators in operation on an operating power transmission line. In condition of decrease of dielectric strength the system for RFID-control fixes the fault insulator by the registration device and with the use of software determines its exact location on a controlled section of an aerial power supply line. On the first stage all studies are carried out with the use of developed prototype of a portable RFID-registrator that determines operation areas of RFID-indicators in the area of a signalling and interlocking line pole. An operator fixes response signals of insulators after every 30° moving radially after every 1, 2, 3, 4 and 5 m regarding a power supply pole. As a result of studies of the first stage, the authors have developed a technology for installation of an indicator on bracket insulators of an operating power transmission line. Moreover, they have substantiated an introduction of the system for RFID-control of VL insulators in networks with insulated neutral for signals and interlocking lines and longitudinal power supply lines.

Keywords: power transmission line, system for RFID-control of insulators, bracket insulator with RFID-indicator, pilot testing, RFID-registrator, directional diagrams, signals and interlocking lines and longitudinal power supply lines.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-103-110

103

Апрель – Июнь

ВВЕДЕНИЕ

Воздушные линии (ВЛ) напряжением 6–35 кВ относятся к числу наиболее распространенных в системе электроснабжения. На российских железных дорогах они применяются в качестве линий продольного электроснабжения (ПЭ), для питания систем сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и для питания иных нетяговых потребителей, причем их протяженность составляет около 55 тыс. км.

Одна из основных задач в системе электроснабжения — обеспечение безаварийной работы линий СЦБ и ПЭ, так как от надежности их функционирования зависит выполнение графика грузоперевозок. Наиболее часто встречающимся видом нарушений в работе систем электроснабжения является однофазное замыкание на землю. Около 20 % всех отказов происходит из-за пробоя или перекрытия изоляции. Под воздействием климатических и эксплуатационных факторов (механических, электродинамических усилий, атмосферных или коммутационных перенапряжений) снижаются диэлектрические свойства изоляторов, и, как следствие, происходит старение материала, загрязнение его поверхности, что вызывает пробой или перекрытие изоляторов [1–3].

Пробой и перекрытие изоляторов приводят к однофазным замыканиям на землю, что сопровождается нарушением работы системы электроснабжения. Из-за малых токов замыкания на землю в линиях с изолированной нейтралью диагностировать повреждения достаточно сложно и трудоемко. Определить место замыкания следует как можно быстрее, поскольку при таком аномальном режиме работы старение изоляции происходит не только на участке, где возникает однофазное замыкание, но и на смежных линиях данного напряжения. Кроме того, проходящий емкостный ток нарушает работу слабонагруженных трансформаторов, в том числе силовых трансформаторов и трансформаторов напряжения. Как правило, поиск места однофазного замыкания проводят визуальным осмотром с помощью бинокля.

Проблема обнаружения дефектных изоляторов решается учеными и научно-исследовательскими группами на протяжении многих лет. В частности, разработаны контактные (они травмоопасны, так как предполагают работу на высоте и не исключают попадание людей под напряжение) и бесконтактные методы неразрушающего контроля. Укрупненно все методы неразрушающего контроля можно разделить на группы. Так, к первой группе относятся методы, применяемые с отключенной линией электропередачи (ЛЭП), например: ультразвуковой неразрушающий контроль, акустико-эмиссионный контроль, метод возбуждения резонансных колебаний, лазерно-индукционный метод [4]. Вторая группа включает методы с работой под напряжением: акустический, тепловой, оптический, ультрафиолетовый, инфракрасный, спектральный радиочастотный [5–10]. При этом методы неразрушающего контроля могут сочетаться [11–16]. В последнее время приобрели популярность встроенные датчики контроля. Многие производители предлагают устанавливать на изоляторы одноразовые или многократные механические индикаторы, которые разрушаются под действием перенапряжений или в случае перекрытия изоляторов [17, 18]. Разра-

батываются датчики емкостного типа с использованием сотовой связи для передачи данных [12]. Применяются ультрафиолетовые датчики, которые размещаются под каждой опорой ЛЭП и могут определять загрязнение изоляторов, сравнивая показатели условно «чистого» изолятора с контролируемыми изоляторами ВЛ, что позволяет дать рекомендации по очистке загрязнений. Проводятся исследования по использованию нейронной сети для оценки напряжения пробоя на изоляторах [13, 14]. Очевидно, что такое количество методов и разработок свидетельствует об актуальности решения проблемы, связанной с контролем состояния изоляторов.

Как правило, для выявления дефектных изоляторов применяют топографический метод, основанный на визуальном осмотре. В настоящее время этот метод используют при плановых обходах и осмотрах воздушной линии электропередачи и при поиске места замыкания на землю. Вместе с тем основной недостаток данного метода заключается в том, что увидеть пробой или перекрытие изолятора достаточно трудно, а в некоторых случаях практически невозможно, так как изоляторы находятся на высоте опоры, которая в зависимости от напряжения составляет от 7 до 50 м. На частично загрязненной поверхности увидеть дорожку перекрытия очень сложно, а внутренний пробой визуально практически не обнаруживается.

Для того чтобы приблизиться к изоляторам ЛЭП, широко используются, особенно в труднодоступных местах, беспилотные летательные аппараты (БЛА) со встроенными фото- и инфракрасными камерами. Однако полученные при облетах БЛА фотоснимки только частично позволяют обнаружить следы прохождения тока, но, как и в случае с топографическим методом, найти перекрытие изолятора или предопределить снижение диэлектрической прочности беспилотные летательные аппараты практически не способны. Инфракрасные камеры работают только при включенной линии под нагрузкой, поэтому при отключении ЛЭП воспользоваться данным методом невозможно.

В статье [19] предлагается дополнительно устанавливать на беспилотный летательный аппарат RFID-регистратор, который независимо от того, включена или отключена ЛЭП, без визуализации укажет на место пробоя изолятора. RFID-регистратор можно разместить на специализированном автомобильном или железнодорожном транспорте. Исследование контактной сети и предупреждение аварийных ситуаций осуществляет вагон-лаборатория испытания контактной сети (ВИКС), который оборудован комплексными системами диагностирования, в том числе системой дефектировки тарельчатых фарфоровых изоляторов контактной сети переменного тока. Однако применяемые методы не охватывают контроль изоляторов контактной сети постоянного тока и линий ПЭ и СЦБ, расположенных вдоль железнодорожного пути [10]. В настоящее время ООО «Уральский центр диагностики оборудования» по просьбе Свердловской дирекции по энергообеспечению филиала ОАО «РЖД» разработало проект установки системы контроля изоляторов, включая подключение стационарного RFID-регистратора с антеннами, а ООО «Мобильные системы диагностики» установило оборудование на ВИКС, что позволило использовать систему автоматизированного RFID-контроля изоляторов не только для линий СЦБ и ПЭ, но и для контактной сети.

Одним из авторов данной статьи Т. А. Несенюк разработана система бесконтактного RFID-контроля изоляторов ЛЭП [20]. Для линий СЦБ и ПЭ напряжением 6–10 кВ в основном применяются штыревые изоляторы типа ШФ-10 или ШФ-20. Не изменив конструктивных особенностей штыревого изолятора, ООО «Уральский центр диагностики оборудования» совместно с Global Insulator Group разработал встроенный RFID-индикатор, который определяет снижение диэлектрической прочности штыревых изоляторов по проходящему через них току. RFID-индикатор может не только выявить пробитый изолятор, но и определить его предотказное состояние при подборе сечения токопроводящей части радиочастотной метки-наклейки. RFID-метка имеет уникальный код, состоящий из 14 знаков, который позволяет идентифицировать изолятор на ЛЭП. RFID-индикатор не требует визуального осмотра изолятора, срабатывая при прохождении тока через изолятор.

Проверено, что индикатор работает в сложных условиях эксплуатации, эргономичен, не создает неравномерности распределения напряженности электромагнитного поля по изолятору, что увеличивает срок эксплуатации последнего. Встроенная в индикатор пассивная метка не требует дополнительного питания, а исполнение в виде наклейки позволяет легко монтировать ее к изолятору. С помощью индикатора можно определить как наружный, так и внутренний пробой изоляторов. Кроме того, RFID-индикатор маркирует изолятор, а уникальный цифровой код позволяет вводить и использовать технические характеристики, данные по монтажу и техническому обслуживанию для анализа работы линии и в целом системы электроснабжения.

Состояние индикатора определяется имеющим программное обеспечение стационарным либо переносным регистрирующим устройством. Его можно размещать на ВИКС, автомобиль или на беспилотный летательный аппарат ЛЭП. Регистрирующее устройство подключается по проводной либо беспроводной связи с ноутбуком, компьютером, планшетом, сотовым телефоном. С помощью программного обеспечения задается контролируемый участок и осуществляется контроль диэлектрического состояния линии. При этом, имея общую базу данных о контролируемых участках ЛЭП или контактной сети (КС), можно проводить диагностику несколькими регистраторами, проезжая на ВИКС, управляя БЛА или проходя с обходом вдоль контролируемого участка ЛЭП. Все данные обрабатываются с помощью программного обеспечения и выдаются в виде отчетного документа с указанием даты, участка, номеров и типов опор, схематичного расположения изоляторов на опоре. Местоположение, указанное в отчетном документе, позволяет в случае снижения диэлектрических свойств минимизировать время на поиск дефектного изолятора и восстановление изоляции.

По результатам разработки компонентов системы RFID-контроля (RFID-индикаторов, переносного и стационарного регистратора, демонстрационной версии программного обеспечения), лабораторных испытаний и испытаний в сертифицированных лабораториях была составлена и согласована программа опытно-промышленных испытаний на площадке Трансэнерго Свердловской дирекции по энергообеспечению филиала ОАО «РЖД».

Цель испытаний — оценить работоспособность системы RFID-контроля штыревых изоляторов для линий СЦБ и ПЭ. Для достижения этой цели был составлен поэтапный план совместных работ. Площадками для проведения опытных испытаний выбраны два участка действующей линии ПЭ и СЦБ Свердловской дирекции по энергообеспечению филиала ОАО «РЖД». В статье описан первый этап — регистрация считывающим устройством RFID-индикаторов, закрепленных к штыревым изоляторам линий СЦБ и ПЭ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Действующие участки линий СЦБ и ПЭ Трансэнерго Свердловской дирекции по энергообеспечению филиала ОАО «РЖД» имеют одноцепные линии электропередачи, которые располагаются вдоль железнодорожного полотна на расстоянии 5–25 м на железобетонных опорах. Питающее напряжение линий составляет 10 кВ, частота 50 Гц, используется трехфазная система электроснабжения, работающая по схеме с изолированной нейтралью. ЛЭП СЦБ получает питание от двух тяговых подстанций и передает электрическую энергию сигнальным установкам, входным светофорам и постам электрической централизации. Линия ПЭ предназначена для резервного питания линий СЦБ, питает нетяговых железнодорожных потребителей.

Бригадой электромонтеров контактной сети была смонтирована первая партия опытных образцов 50 RFID-индикаторов. Разработанные RFID-индикаторы представляют собой крепежные элементы для стандартных стеклянных и фарфоровых штыревых изоляторов с креплением на штырь диаметром 20 мм. Схема устройства штыревого изолятора с RFID-индикатором показана на рис. 1. На участке линии СЦБ были установлены индикаторы для 50 фарфоровых изоляторов ШФ-20 и ШФ-10. В табл. 1 условно приведены исследуемые объекты опытно-промышленных испытаний системы RFID-контроля изоляторов ВЛ

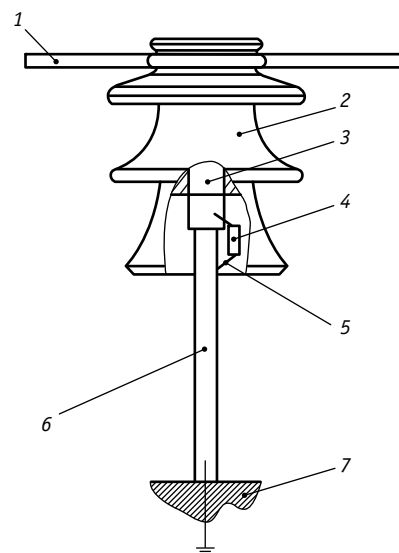


Рис. 1. Упрощенная схема штыревого изолятора с RFID-индикатором:
1 — провод ЛЭП; 2 — изолятор; 3 — крепежный элемент;
4 — RFID-индикатор; 5 — крепление индикатора; 6 — штырь;
7 — заземленная траверса

СЦБ с номерами и типами опор, схематично изображено расположение изоляторов на траверсе с привязкой к железнодорожному пути. Нумерацию опор на схеме присвоили для упрощения монтажа: так, по отношению к железнодорожному пути ближний изолятор обозначается цифрой 1, по мере удаления нумерация изоляторов увеличивается ($N + 1$). RFID-индикаторы имеют свой индивидуальный 14-значный код, с помощью программного обеспечения каждому изолятору по 14-значному коду присваивается месторасположение на опоре контролируемого участка. Присвоенный закодированный номер в табл. 1 записан шестью знаками, которые использовались для дальнейшего математического анализа и построения диаграмм.

Для установки RFID-индикаторов выбранный участок был отключен и соблюдены все меры безопасности. После демонтажа крепежных элементов (полиэтиленовых колпачков) и съема изоляторов электромонтеры бригады контактной сети осуществляли монтаж индикаторов, оставляя эксплуатируемые штыревые изоляторы. При монтаже руководствовались инструкцией первого варианта. Задача монтажников состояла в том, чтобы наклеить метку на крепежный элемент — модернизированный колпачок, записать номер метки на схематичном рисунке и смонтировать индикатор на опоре, после

чего установить изолятор. Наиболее сложным для монтажников оказалось прикрепить на открытом воздухе самоклеящуюся метку-наклейку, определить необходимое направление положения индикатора на траверсе и соблюсти необходимые размеры при насадке колпачка на штырь. Из-за недоработки технологии при монтаже первой партии индикаторов был допущен ряд ошибок.

После монтажа индикаторов согласно «Программе испытаний системы RFID-контроля штыревых изоляторов для линий СЦБ и ПЭ» осуществлена регистрация RFID-индикаторов, закрепленных к штыревым изоляторам на заданном участке линий СЦБ и ПЭ. Для проведения испытаний системы RFID-контроля штыревых изоляторов на первом этапе были использованы регистрирующее устройство РЧИ-1 с регулируемой мощностью считывателя до 33 дБм, ноутбук марки Dell с программным обеспечением, позволяющим фиксировать результаты испытаний. Регистрирующее устройство РЧИ-1 работало в двух режимах: автономно, показывая индивидуальный код метки на экране считывателя, и совместно с ноутбуком по Bluetooth, определяя местоположение изоляторов, фиксируя отклики как при включенной, так и при отключенной ЛЭП и отражая результаты на экране монитора.

Таблица 1

Объекты опытно-промышленных испытаний системы RFID-контроля изоляторов ВЛ СЦБ и их схематичное изображение

№ опоры	Вид опоры	Условное расположение изолятора на траверсе	Присвоенный закодированный номер	Схематичное изображение изоляторов на траверсе с привязкой к железнодорожному пути
76	Одноцепная проходная горизонтального типа	1	40D12C	
		2	40E52C	
		3	413D2C	
77	Одноцепная проходная горизонтального типа	1	41052C	
		2	40F12C	
		3	40F52C	
79	Одноцепная проходная горизонтального типа	1	415D2C	
		2	43C52C	
		3	43B52C	
80	Одноцепная проходная горизонтального типа	1	43B92C	
		2	43992C	
		3	41492C	
81	Одноцепная проходная горизонтального типа	1	45052B	
		2	40502C	
		3	41092C	
82	Одноцепная проходная горизонтального типа	1	435D2B	
		2	43592B	
		3	43602B	
78	Одноцепная анкерная горизонтального типа	1	40E12C	
		2	43A92C	
		3	411D2C	
		4	43952C	
		5	41192C	
		6	41392C	

Определение нуля градусов для измерений диаграмм направленности по ответным сигналам RFID-индикаторов, установленных на изоляторы, осуществлялось по схеме, представленной на рис. 2. При этом оператор находился перед опорой, а железнодорожный путь проходил параллельно с левой стороны от оператора (рис. 3).

Определив отметку ноль градусов, оператор отмерял расстояние 1 м от переносного регистратора 3 до опоры 8 (см. рис. 3) с помощью лазерной линейки и направлял антенну 4 переносного регистратора в сторону изоляторов 2 с RFID-индикаторами. Двигаясь по часовой стрелке вокруг опоры, через каждые 30° оператор фиксировал срабатывание RFID-индикаторов в таблице протокола испытаний. Те же действия оператор повторял на отметках 2, 3, 4, 5 м, фиксируя ответные сигналы меток через каждые 30°.

Пример результатов исследования приведен в табл. 2, где ответные сигналы отмечены знаком V, отсутствие ответа — знаком «-».

После анализа результатов в программе EXCEL на плоскости с полярными координатами были построены графики ответных сигналов для исследуемых опор № 76–82: на одном луче с началом в полюсе, которым является опора, и образующим углом с полярной осью заданы углы через каждые 30° — от 0 до 330°.

На рис. 4а приведен пример диаграммы направленности для опоры № 81, расположение железнодорожного пути показано двумя полосами. Из этой диаграммы видно, что считывание происходит на всех углах. Ближе к железнодорожному пути на углах от 60 до 180° ответные сигналы индикаторов были наиболее устойчивыми. На рис. 4б показана круговая диаграмма, полученная в результате анализа откликов всех 24 изоляторов семи опор. Качество откликов определялось следующими пределами: до 39 %, от 40 до 65 % и свыше 66 %. На диаграмме показана соответствующая для этих пределов цветовая маркировка голубого, желтого и зеленого цвета. При этом суммарная диаграмма направленности смещена в сторону железнодорожного пути, что предполагает надежную работу системы контроля изоляторов при установке на ВИКС мощного считывающего устройства с дополнительными антеннами.

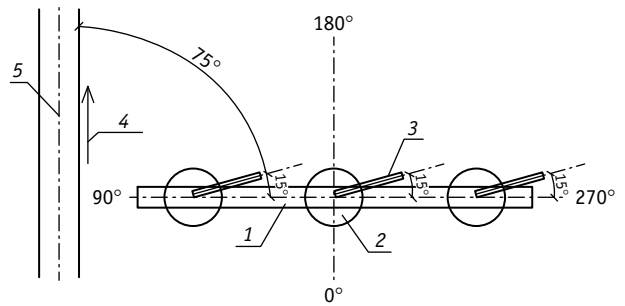


Рис. 2. Определение нуля градусов для измерений диаграмм направленности:
1 — траверса; 2 — изолятор; 3 — RFID-индикатор;
4 — направление движения ВИКС; 5 — ось железнодорожного пути

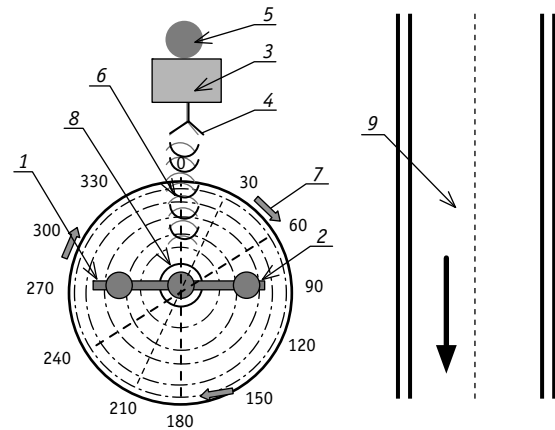


Рис. 3. Схема регистрации считывающим устройством RFID-индикаторов, закрепленных к штыревым изоляторам линий СЦБ и ПЭ:
1 — траверса; 2 — изолятор с RFID-индикатором;
3 — переносной регистратор; 4 — антенна; 5 — оператор;
6 — радиосигналы; 7 — направление движения оператора;
8 — опора; 9 — железнодорожный путь

Таблица 2

Результаты регистрации RFID-индикаторов на опоре № 81

Угол поворота считывателя при движении оператора по окружности с центром у опоры, °	1-й изолятор Индикатор 45052В					2-й изолятор Индикатор 40502С					3-й изолятор Индикатор 41092С				
	Расстояние от регистратора до опоры ЛЭП, м														
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	V	-	-	-	V	-	-	V	-	V	V	V	V	V	V
30	-	V	V	V	V	-	-	V	V	-	-	-	-	-	-
60	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	-	V	V	V	V
90	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
120	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
150	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
180	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
210	V	V	V	V	V	-	V	V	V	-	V	V	V	V	V
240	-	-	V	V	-	V	V	V	V	-	V	V	V	V	V
270	-	-	-	-	-	-	V	V	V	-	V	V	V	V	V
300	V	-	-	-	-	-	V	V	V	V	V	V	V	V	V
330	V	-	-	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V

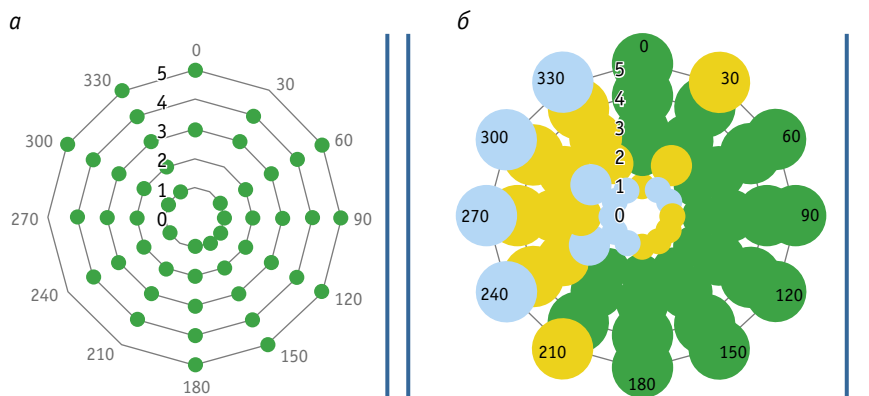


Рис. 4. Диаграммы зависимости расстояния от угла расположения считывающего устройства в полярной системе координат:
а — пример диаграммы направленности для опоры № 81;
б — суммарные качественные показатели ответных сигналов

Для определения места, где должен находиться оператор, чтобы с высокой точностью снять данные от RFID-индикаторов, воспользуемся методом построения кардиоидной кривой в полярной системе координат. Уравнение в полярных координатах задается множеством точек, которые характеризуются значением задаваемого полярного угла φ , т.е. лежат на одном луче с началом в полюсе, образуя угол φ_0 с полярной осью. В нашем случае $\varphi_{01} = 0, \varphi_{02} = 30, \varphi_{03} = 60, \varphi_{04} = 90 \dots \varphi_{012} = 330^\circ$. Множество точек определяют ответившие сигналы независимо от расстояния, на котором находился оператор. Были построены диаграммы направленности для 1, 2, 3, 4 или 5 м.

За начало отсчета от плоскости полюса взята опора воздушной линии электропередачи (см. рис. 3). При построении диаграмм направленности за 100 % приняты ответные сигналы всех 24 индикаторов на семи рассматриваемых опорах. На рис. 5а изображены пять диаграмм направленности в процентном отношении к углам φ_{0i} для всех исследуемых опор на расстоянии от оператора до опоры 1, 2, 3, 4 и 5 м. Общая диаграмма направленности для всех рассматриваемых случаях представлена на рис. 5б. Полученные результаты указывают на наличие максимумов фиксируемых ответных сигналов в диапазоне от 30 до 210° со стороны железнодорожного пути, что является

положительным, определяющим фактором правильно выбранного направления антенны RFID-индикатора по отношению к оси железнодорожного пути.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первый опыт позволил определить особенности работы монтажа, которые необходимо учесть при установке RFID-индикаторов на действующие линии СЦБ и ПЭ. В частности, наклеивать RFID-метки на крепежный элемент можно заблаговременно в теплом помещении, что сократит время и повысит надежность работы системы RFID-контроля изоляторов. Кроме того, бумажные паспорта индикаторов, которые находились внутри крепежного элемента с уникальным кодом метки, номером опоры, техническими данными и изображением упрощенной схемы расположения изолятора на траверсе, не надо брать в поле. Ввод данных по номерам и типам опор можно ввести в базу данных заблаговременно сразу после определения участка, где будут установлены индикаторы, а на индикаторах указать номер опоры и место расположения изолятора по отношению к железнодорожному пути. Так, под номером 1 можно обозначить изолятор, расположенный ближе к железнодорожному пути, под номером 2 — индикатор, следующий за ним, и так с увеличением нумерации ($N + 1$) по мере удаленности от железнодорожного пути. Чтобы

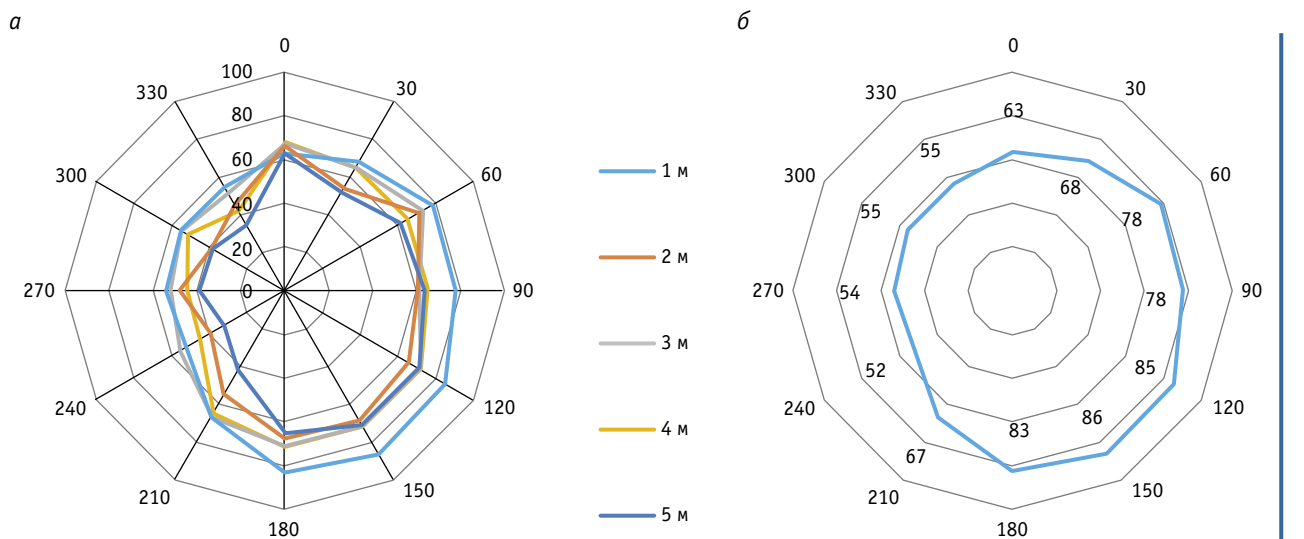


Рис. 5. Диаграммы направленности ответных сигналов, %:
а — в зависимости от расстояний от опоры до оператора; б — общая диаграмма направленности

исключить ошибки, обусловленные человеческим фактором, до начала работ необходимо провести инструктаж по охране труда, прояснить особенности технологического процесса при установке RFID-индикатора на штыревые изоляторы, допустить членов бригады к работе. Кроме того, следует проверить наличие всех приборов, инструментов, закладных, комплектующих, защитных средств.

Построение кардиоидной кривой в полярной системе координат позволило проанализировать результаты опытных испытаний и путем сравнения диаграмм направленности для выбранных опор определить некоторые ошибки монтажа. На втором этапе испытаний при описании измерений следует указывать в примечании особенности размещения дополнительного оборудования на опоре и оборудования, расположенного недалеко от опоры, определять расстояние от опор до железнодорожного пути, так как это может повлиять на прием и передачу радиочастотного сигнала при проезде ВИКС с установленным оборудованием для RFID-контроля изоляторов. Такие дополнительные данные будут способствовать повышению достоверности получаемых результатов. Математическая обработка данных о количестве и качестве откликов позволила определить области регистрации сигналов переносным считывающим устройством с максимальными и минимальными расстояниями от оператора до группы маркированных изоляторов. Установлено, что для достоверного контроля состояния изоляторов оператор должен находиться на расстоянии 3 м от опоры в диапазоне 60–210° слева от железнодорожного пути.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

В статье представлен анализ применяемых методов диагностики изоляторов воздушной линии электропередачи. Обоснована актуальность разработки системы контроля изоляторов для линий СЦБ и ПЭ. Приведены результаты исследований работы системы при обходе и осмотре воздушной линии электропередачи напряжением 6–10 кВ обслуживающим персоналом. Определены координаты места регистрации RFID-индикаторов, установленных на штыревых изоляторах, с максимальным расстоянием считывания. Дана оценка метода бесконтактного контроля диэлектрического состояния изоляторов в условиях эксплуатации на действующей линии СЦБ Трансэнерго Свердловской железной дороги — филиала ОАО «РЖД», основным результатом которой стала возможность внедрения автоматизированной системы RFID-контроля изоляторов. По результатам первого этапа испытаний выполнена математическая обработка полученных данных, построены сводные диаграммы, поясняющие особенности предлагаемого устройства, сделаны выводы о работе системы в условиях эксплуатации, предложена оптимизация технологического процесса при монтаже штыревых изоляторов с RFID-индикатором, даны рекомендации по организационно-техническим мероприятиям.

Благодарим за поддержку в реализации проекта системы автоматизированного контроля коллектив Свердловской дирекции по энергообеспечению филиала ОАО «РЖД» во главе с начальником О. В. Халуевым, начальника электротехнической лаборатории И. А. Пятецкого, начальника ЭЧК-3 Ю. В. Иванникова, бригаду электромонтеров контактной сети.

Литература

1. Influence of electrolytic and crevice corrosion on mechanical resistance of porcelain insulators / R. Matheus, S. Sanyal, T. Kim [et al.] // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 124. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105317.
2. On-line monitoring, data analysis for electrolytic corrosion of ± 800 kV high voltage direct current insulators / Y. Daiming, C. Bin, L. Zong [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 131. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107097.
3. Muhsin T., Mehmet C. The pollution flashover on high voltage insulators // Electric Power Systems Research. 2008. Vol. 78. Issue 11. DOI: 10.1016/j.epr.2008.03.019.
4. Assessing the type and quality of high voltage composite outdoor insulators by remote LIBS analysis: A feasibility study / O. Kokkinaki, A. Klini, M. Polychronaki [et al.] // Spectrochimica Acta: Atomic Spectroscopy. 2020. Vol. 165. DOI: 10.1016/j.sab.2020.1057.
5. Data analysis visual power line inspection: An in-depth review of deep learning for component detection and fault diagnosis / L. Xinyu, M. Xiren, J. Hao, C. Jing // Annual Reviews in Control. 2020. Vol. 50. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.09.002.
6. Design of thermal imaging-based health condition monitoring and early fault detection technique for porcelain insulators using Machine learning / L. Singh, A. Alam, K. Vijay Kumar [et al.] // Environmental Technology & Innovation. 2021. Vol. 24. DOI: 10.1016/j.eti.2021.102000.

References

1. Influence of electrolytic and crevice corrosion on mechanical resistance of porcelain insulators / R. Matheus, S. Sanyal, T. Kim [et al.] // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 124. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105317.
2. On-line monitoring, data analysis for electrolytic corrosion of ± 800 kV high voltage direct current insulators / Y. Daiming, C. Bin, L. Zong [et al.] // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2021. Vol. 131. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107097.
3. Muhsin T., Mehmet C. The pollution flashover on high voltage insulators // Electric Power Systems Research. 2008. Vol. 78. Issue 11. DOI: 10.1016/j.epr.2008.03.019.
4. Assessing the type and quality of high voltage composite outdoor insulators by remote LIBS analysis: A feasibility study / O. Kokkinaki, A. Klini, M. Polychronaki [et al.] // Spectrochimica Acta: Atomic Spectroscopy. 2020. Vol. 165. DOI: 10.1016/j.sab.2020.1057.
5. Data analysis visual power line inspection: An in-depth review of deep learning for component detection and fault diagnosis / L. Xinyu, M. Xiren, J. Hao, C. Jing // Annual Reviews in Control. 2020. Vol. 50. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2020.09.002.
6. Design of thermal imaging-based health condition monitoring and early fault detection technique for porcelain insulators using Machine learning / L. Singh, A. Alam, K. Vijay Kumar [et al.] // Environmental Technology & Innovation. 2021. Vol. 24. DOI: 10.1016/j.eti.2021.102000.

7. Research on Insulator Fault Diagnosis and Remote Monitoring System Based on Infrared Images / S. Zhou, X. Lei, B. Qiao, H. Hou // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 109. DOI: 10.1016/j.procs.2017.05.398.
8. Inspection in overhead insulators through the analysis of the irradiated RF spectrum / P. Rocha, E. Costa, A. Serres, G. Xavier // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 113. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.05.060.
9. Zaripova A., Zaripov D., Usachev A. Automatic condition monitoring method to find defects in highvoltage insulators using infrared images // E 3S Web Conf. 2019. Vol. 124. DOI: 10.1051/e3sconf/201912403003.
10. Reich E. N., Sychenko V. G., Kim E. D. Analysis of diagnostic methods and tools for assessing the condition of contact network insulators // Electrification of transport. 2012. No. 4. Pp. 54–59.
11. Automatic classification of insulator by combining k-nearest neighbor algorithm with multi-type feature for the Internet of Things / H. Guoxiong, Y. Zhong, Z. Maohu [et al.] // EURASIS Journal on Wireless Communications and Networking. 2018. DOI: 10.1186/s13638-018-1195-1.
12. Zaripov D., Nasibullin R. Distributed monitoring system for overhead lines insulations and substations based on wireless capacitive sensors // E 3S Web of Conferences. 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801011.
13. Design of an artificial neural network for the estimation of the flashover voltage on insulators / V. Kontargyri, A. A. Gialketsi, G. Tsekouras [et al.] // Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77. Issue 12. DOI: 10.1016/j.epsr.2006.10.017.
14. Govindaraju P., Muniraj C. Monitoring and optimizing the state of pollution of high voltage insulators using wireless sensor network based convolutional neural network // Microprocessors and Microsystems. 2020. Vol. 79. DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103299.
15. Zaripov D., Nasibullin R. Experimental system for continuous monitoring of overhead power lines and substations insulation // E 3S Web Conf. 2020. Vol. 216. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601053.
16. Phuong N., Dudkin S., Chenzai K. Automatic diagnostic of transmission lines based on ultraviolet inspection // E 3S Web Conf. 2019. Vol. 140. DOI: 10.1051/e3sconf/201914007008.
17. Индикатор перекрытия полимерного изолятора / А. А. Иванисенко: патент на полезную модель 190784 Российская Федерация. № 2019101074; заявл. 10.01.2019; опубл. 12.07.2019, Бюл. № 2.
18. Индикатор пробоя и/или перекрытия изолятора с патроном / А. С. Дзюбин: патент на полезную модель 200741 Российская Федерация. № 2019145338; заявл. 30.12.2019; опубл. 10.11.2020, Бюл. № 31.
19. Несенюк Т. А., Галкин А. Г. Эксплуатационный аэромобильный контроль воздушной линии электропередачи беспилотным летательным аппаратом // Транспорт Урала. 2017. № 2 (53). С. 64–72. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-64-72. ISSN 1815–9400.
20. Несенюк Т. А. Радиочастотная идентификация для автоматизированного контроля состояния изоляторов // Энергобезопасность и энергосбережение. 2018. № 5. С. 45–51. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-5-45-51. ISSN 2071–2219.
7. Research on Insulator Fault Diagnosis and Remote Monitoring System Based on Infrared Images / S. Zhou, X. Lei, B. Qiao, H. Hou // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 109. DOI: 10.1016/j.procs.2017.05.398.
8. Inspection in overhead insulators through the analysis of the irradiated RF spectrum / P. Rocha, E. Costa, A. Serres, G. Xavier // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 113. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.05.060.
9. Zaripova A., Zaripov D., Usachev A. Automatic condition monitoring method to find defects in highvoltage insulators using infrared images // E 3S Web Conf. 2019. Vol. 124. DOI: 10.1051/e3sconf/201912403003.
10. Reich E. N., Sychenko V. G., Kim E. D. Analysis of diagnostic methods and tools for assessing the condition of contact network insulators // Electrification of transport. 2012. No. 4. Pp. 54–59.
11. Automatic classification of insulator by combining k-nearest neighbor algorithm with multi-type feature for the Internet of Things / H. Guoxiong, Y. Zhong, Z. Maohu [et al.] // EURASIS Journal on Wireless Communications and Networking. 2018. DOI: 10.1186/s13638-018-1195-1.
12. Zaripov D., Nasibullin R. Distributed monitoring system for overhead lines insulations and substations based on wireless capacitive sensors // E 3S Web of Conferences. 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202128801011.
13. Design of an artificial neural network for the estimation of the flashover voltage on insulators / V. Kontargyri, A. A. Gialketsi, G. Tsekouras [et al.] // Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77. Issue 12. DOI: 10.1016/j.epsr.2006.10.017.
14. Govindaraju P., Muniraj C. Monitoring and optimizing the state of pollution of high voltage insulators using wireless sensor network based convolutional neural network // Microprocessors and Microsystems. 2020. Vol. 79. DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103299.
15. Zaripov D., Nasibullin R. Experimental system for continuous monitoring of overhead power lines and substations insulation // E 3S Web Conf. 2020. Vol. 216. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601053.
16. Phuong N., Dudkin S., Chenzai K. Automatic diagnostic of transmission lines based on ultraviolet inspection // E 3S Web Conf. 2019. Vol. 140. DOI: 10.1051/e3sconf/201914007008.
17. Indikator of polymer insulator flashing over [Indikator perekrytiya polimernogo izolyatora] / A. A. Ivanisenko: patent for utility model 190784 Russian Federation. No. 2019101074; filed 10.01.2019; publ. 12.07.2019, Bulletin No. 2.
18. Indikator of puncture and/or flashing over of collet insulator [Indikator proboya i/ili perekrytiya izolyatora s patronom] / A. S. Dzyubin: patent for utility model 200741 Russian Federation. No. 2019145338; filed 30.12.2019; publ. 10.11.2020, Bulletin No. 31.
19. Nesenyuk T. A., Galkin A. G. Operational aeromobile control of the overhead transmission line with the unmanned aerial vehicle [Eksploatatsionnyy aeromobil'nyy kontrol' vozduшной linii elektroperedachi bespilotnym letatel'nyy apparatom] // Transport of the Urals. 2017. No. 2 (53). Pp. 64–72. DOI: 10.20291/1815-9400-2017-2-64-72. ISSN 1815–9400.
20. Nesenyuk T. A. Radio frequency identification for automated control of insulators [Radiochastotnaya identifikatsiya dlya avtomatizirovannogo kontrolya sostoyaniya izolyatorov] // Energy Safety and Energy Economy. 2018. No. 5. Pp. 45–51. DOI: 10.18635/2071-2219-2018-5-45-51. ISSN 2071–2219.

Объем статьи 1 авторский лист

УДК 621.331:621.311.4:621.314

Юрий Павлович Неугодников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия,

Иван Павлович Неугодников, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС), Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ДИАГНОСТИКИ И ЗАЩИТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Yuriy Pavlovich Neugodnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia,

Ivan Pavlovich Neugodnikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Transport Power Supply Department, Ural State University of Railway Transport (USURT), Ekaterinburg, Russia

Analysis of methods and equipment for diagnostics and protection of semi-conductor converters of railway traction substations

Аннотация

В статье представлен анализ методов и устройств диагностики и защиты полупроводниковых преобразователей тяговых подстанций железных дорог. Определены основные направления дальнейшего развития диагностики и разработки новых вариантов исполнения защит.

Ключевые слова: тяговая подстанция, диагностика, полупроводниковый преобразователь, выпрямитель, инвертор, мониторинг, защита, испытания, контроль, моделирование, диод, тиристор, микропроцессор.

Abstract

The paper presents an analysis of methods and equipment for diagnostics and protection of semi-conductor converters of railway traction substations. The authors have determined main directions for further development of diagnostics and development of new variants of protection design.

Keywords: traction substation, diagnostics, semi-conductor converter, rectifier, inverter, monitoring, protection, tests, control, modeling, diode, thyristor, microprocessor.

DOI: 10.20291/1815-9400-2022-2-111-117

Стратегия развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 г. предусматривает существенное увеличение полигона высокоскоростного и тяжеловесного движения со значительным повышением весовых норм тяжеловесных поездов. При этом предлагается обеспечить повышение надежности работы основного оборудования систем тягового электроснабжения и сокращение эксплуатационных затрат на его техническое обслуживание и содержание [1].

Большая роль в повышении надежности работы устройств тягового электроснабжения железных дорог, а также в сокращении времени технического обслуживания и восстановления работоспособности оборудования отводится автоматизированным средствам диагностирования и текущего мониторинга, созданию новых приборов и методик измерений, позволяющих перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонту устройств электроснабжения по состоянию [2].

В свою очередь, рост токовой нагрузки преобразователей, а также ее резкопеременный и циклический характер приводят к увеличению температуры полупроводниковых приборов, что может вызвать превышение допустимых значений $p-n$ -структуры и при определенных условиях — пробой приборов в нормальных, перегрузочных и аварийных режимах работы [2, 3].

Преобразовательные агрегаты тяговых подстанций постоянного тока — одни из основных элементов системы тягового электроснабжения железных дорог. Так, на 2018 г. на тяговых подстанциях постоянного тока железных дорог Российской Федерации находилось в эксплуатации не менее 2055 выпрямительных, а также 70 инверторных и выпрямительно-инверторных агрегатов различных конструкций и схем преобразования [3–7].

При этом для защиты преобразователей от токовых перегрузок и токов короткого замыкания, как правило, используется в качестве первой ступени токовая отсечка без выдержки времени, а в качестве второй — максимальная токовая защита с выдержкой времени 0,3–0,5 с. Для защиты от пробоя силовых диодов или тиристоров в преобразовательных секциях выпрямительных агрегатов в большинстве случаев применяются встроенные защиты, которые определяют номер плеча преобразовательной секции, где произошел отказ полупроводникового прибора. Для защиты инверторных агрегатов дополнительно применяются встроенные быстродействующие защиты от опрокидываний или непроводимости силовых тиристорных плеч, которые позволяют уменьшить воздействие аварийных токов на полупроводниковые приборы [3–5, 8, 9].

В связи с этим актуальными являются изучение и дальнейшее совершенствование существующих методов диагностики и защиты полупроводниковых преобразователей тяговых подстанций, разработка новых методов расчета и моделирования, экспериментальных исследований тепловых процессов нагрева полупроводниковых приборов в преобразовательных секциях в указанных выше режимах работы [3, 10–21]. Не менее актуально решение проблемы по совершенствованию применяемых и разработке новых высокоэффективных вариантов исполнения устройств диагностики и защиты преобразователей тяговых подстанций [22–26].

Анализ методов расчета, моделирования и экспериментальных исследований электрических и тепловых процессов в силовых полупроводниковых секциях в нормальных, перегрузочных и аварийных режимах работы преобразователей тяговых подстанций выполняется для выявления тех направлений научно-практических исследований, где их использование наиболее оптимально и эффективно, а также для определения возможности их применения при разработке и практической реализации микропроцессорных устройств диагностики и защиты преобразователей тяговых подстанций постоянного тока.

В период освоения силовых полупроводниковых вентиляторов на электрифицированном транспорте, когда велись поиски наиболее рациональных решений и конструкций для тяговых подстанций, были разработаны преобразователи с принудительным воздушным и естественным охлаждением типа УВКЭ-1, ПВЭ-3, ПВЭ-3М, ПВЭ-5АУ1 и ВИПЭ-2У3 на штыревых силовых диодах или тиристорах [2, 3].

В настоящее время капитальный ремонт выпрямительных преобразователей тяговых подстанций УВКЭ-1, ПВЭ-3, ПВЭ-3М, ПВЭ-5АУ1 выполняется путем установки силовых диодных или тиристорных блоков типа БСЕ-1, состоящих из таблеточных диодов или тиристоров на токи 2000 А и охладителей на тепловых трубах [3–5]. Более надежны и экономичны выпрямители с естественным и принудительным воздушным охлаждением В-ТПЕД, ТПДЕ-Ж, В-МПЕ-Д, В-МПП-Д и др. Виды защит определяются типом преобразователя, схемой преобразования, системой охлаждения и конструктивными особенностями [3–7].

Все указанные выше конструктивные особенности, метеорологические факторы, а также достаточное тяжелые условия работы в различных режимах эксплуатации значительно усложняют разработку методов расчета, моделирования и экс-

периментальных исследований электрических и тепловых процессов в силовых полупроводниковых секциях преобразователей [3–5].

Виды и методики периодических профилактических испытаний при техническом обслуживании полупроводниковых преобразователей тяговых подстанций регламентируются отраслевыми правилами и государственными стандартами [10, 11, 27]. Так, в соответствии с правилами [27], силовые полупроводниковые приборы силовых секций преобразователей должны подвергаться таким диагностическим испытаниям, как проверка распределения обратного напряжения между последовательно соединенными диодами или тиристорами; проверка распределения тока между параллельными ветвями диодов или тиристоров; измерение импульсного обратного тока IRRM, а для штыревых полупроводниковых приборов — и их теплового сопротивления.

Следует отметить, что перечисленные выше виды и методики диагностических испытаний, которые используются в настоящее время, проводятся с выводом в ремонт преобразователя и требуют применения переносных испытательных приборов высокой точности в заводском исполнении. Однако предназначенные для этих целей приборы, например, типа ИТСВ для измерения теплового сопротивления, а также приборы типа ПДВ для измерения обратных напряжения и тока в ветвях диодов или тиристоров производства Московского электромеханического завода в настоящее время серийно не выпускаются [19, 20].

В соответствии с ГОСТ 24461–80 одним из наиболее точных методов, позволяющих не только определить исправность силовых полупроводниковых приборов, но и прогнозировать их срок службы, является метод диагностирования по повторяющемуся импульсному обратному току IRRM.

Так, в настоящее время для диагностики силовых диодов и тиристоров научно-производственным комплексом «Крона» (г. Пенза) выпускаются стационарные стенды, которые позволяют определять класс полупроводникового прибора, осуществлять контроль повторяющегося импульсного тока в закрытом состоянии, обратного тока и постоянного напряжения управления.

В соответствии с требованиями инструкции ЦЭ-936 и ГОСТ 24461–80 Дорожной электротехнической лабораторией Западно-Сибирской железной дороги совместно с Омским государственным университетом путей сообщения (ОмГУПС) разработаны и изготовлены на основе использования современных микроселектронных элементов опытные приборы измерения импульсных обратных токов (ПОИТ). Эти приборы выполнены на современной микроселектронной элементной базе, просты в применении, имеют низкую себестоимость и высокую точность измерения [19, 20].

Для комплексной оценки работоспособности преобразователей тяговых подстанций при их профилактических испытаниях необходимо применение приборов ПОИТ и «Крона», в основу которых заложен метод диагностирования по импульсному повторяющемуся обратному току, а также приборов типа ПДВ и ИТСВ, которые должны быть переработаны с применением современной элементной базы для повышения эффективности диагностирования.

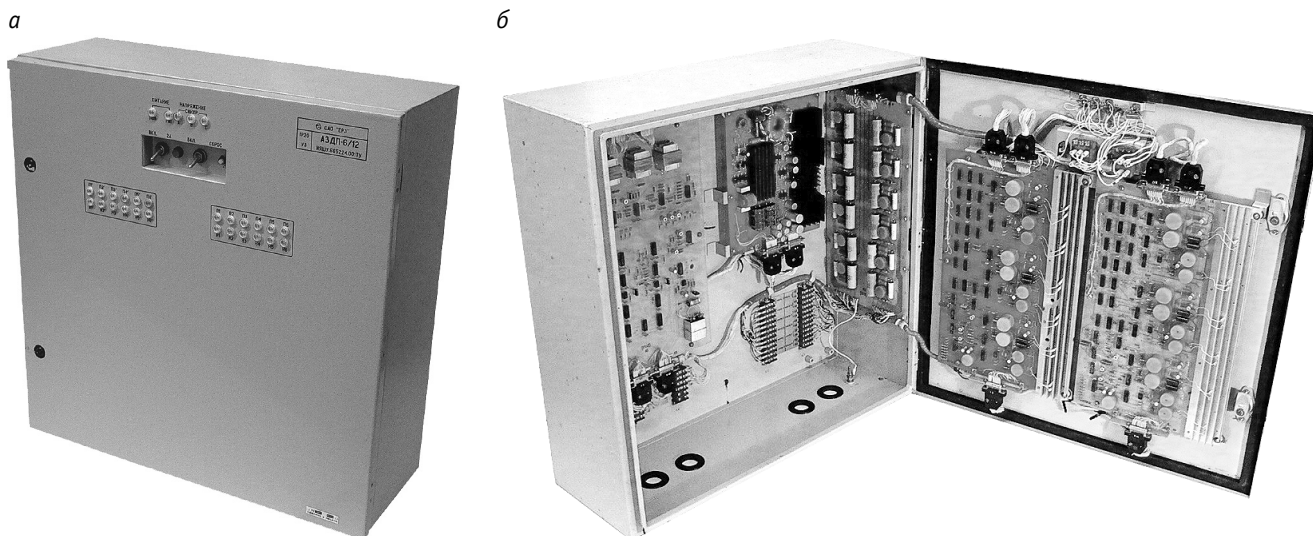


Рис. 1. Комплект аппаратуры защиты и диагностики преобразователей (комплект АЗДП):

а — электронный блок аппаратуры защиты и диагностики преобразователей (ЭБ АЗДП);

б — размещение основных функциональных блоков аппаратуры АЗДП

Необходимо также отметить, что использование современных преобразователей, таких как В-МПЕ, В-МПП, в состав которых входят таблеточные силовые диоды или тиристоры и охладители на тепловых трубах, позволяет значительно повысить надежность их работы и уменьшить затраты на профилактические испытания и ремонт. Это обусловлено тем, что таблеточные полупроводниковые приборы имеют ряд преимуществ по сравнению со штыревыми: высокую циклоустойкость к токам нагрузки и стабильность теплового сопротивления, механическую устойчивость конструкции при термических и электродинамических воздействиях токов короткого замыкания [6, 7].

Применение современных конструкций преобразователей тяговых подстанций при росте токовых нагрузок требует разработки новых методов расчета и моделирования тепловых процессов нагрева полупроводниковых приборов с охладителями на тепловых трубах для разработки и совершенствования устройств функциональной диагностики на основе микропроцессорных систем.

В [11–18, 22] рассмотрены различные способы и устройства диагностики и защит преобразователей тяговых подстанций. Предложенные способы и устройства имеют определенные конструктивные и функциональные преимущества и недостатки, и вследствие различных причин в настоящее время они не получили большого распространения на сети электрических железных дорог ОАО «РЖД».

Наиболее широко на тяговых подстанциях постоянного тока электрических железных дорог используется аппаратура защиты и диагностики преобразователей (АЗДП), разработанная в Уральском государственном университете путей сообщения (УрГУПС) сотрудниками отраслевой научно-исследовательской лаборатории ОНИЛ-1 при участии специалистов Свердловской железной дороги [22].

Аппаратура АЗДП предназначена для защиты и диагностики 6- и 12-пульсовых преобразователей (по мостовым или нуле-

вым схемам преобразования) тяговых подстанций постоянного тока магистрального железнодорожного (3,3 кВ), промышленного железнодорожного (3,3 кВ), карьерного (1,5 кВ) и городского электрифицированного транспорта, а также метрополитена.

Комплект аппаратуры АЗДП включает в себя электронный блок ЭБ АЗДП (рис. 1) и трансформаторы контроля типа Т-627 (12 шт.), установленные в силовых секциях преобразователя. Аппаратура АЗДП в основном применяется для защиты и диагностики 6- и 12-пульсовых преобразователей тяговых подстанций постоянного тока магистрального электрифицированного железнодорожного транспорта.

Комплект аппаратуры АЗДП обеспечивает:

- защиту от пробоя силовых диодов или тиристоров;
- защиту от нарушения проводимости силовых плеч (защита от неполнофазных режимов работы преобразователей);
- диагностику исправности защитных шунтирующих цепей;
- сигнализацию номера отказавшего силового плеча преобразователя;
- диагностику преобразователей во время работы и до подключения их под нагрузку.

По заданию департамента электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» сотрудниками ОНИЛ-1 УрГУПС разработано новое поколение микропроцессорной системы диагностики и защиты преобразователей (МСДП), которая является составной частью автоматизированной системы мониторинга и диагностики оборудования тяговых подстанций постоянного тока (АСДТП) и обеспечивает передачу диагностической информации от МСДП через интерфейс RS-485 по оптоволоконной линии связи в АСДТП [23–26].

В настоящее время аппаратура системы диагностики МСДП применяется на тяговых подстанциях Свердловской, Южно-Уральской, Московской, Октябрьской и других железных дорог.

Комплект аппаратуры МСДП включает в себя электронный блок (ЭБ) (рис. 2а), два щитка ЩР1 и ЩР2 для подключения

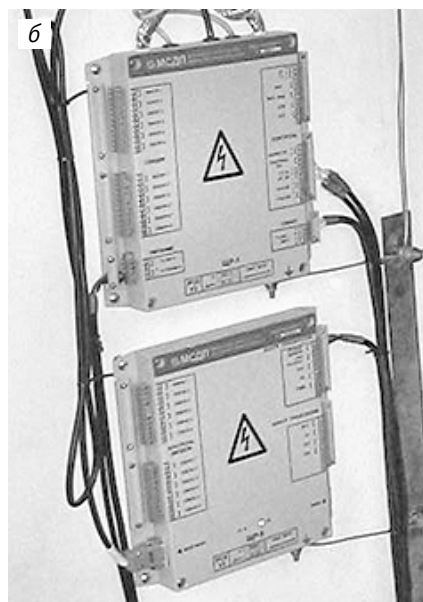
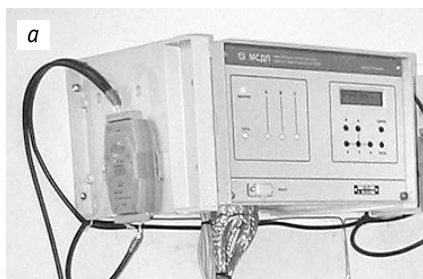


Рис. 2. Микропроцессорная система диагностики и защиты преобразователей: общий вид электронного блока (а) и щитков (б) аппаратуры МСДП

электронного блока (рис. 2б) и трансформаторы контроля типа Т-627 (12 шт.), установленные в силовых секциях преобразователя. Трансформаторы типа Т-627 обеспечивают контроль состояния полупроводниковых приборов на пробой и проводимость силовых плеч преобразователей, выполненных по 6- и 12-пульсовым схемам преобразования.

Дополнительно аппаратура МСДП комплектуется датчиком тока ДТ-10к-4к для измерения постоянного тока нагрузки преобразователя, а также датчиком напряжения ДН-4к для измерения постоянного напряжения на выходе преобразователя. Варианты исполнения датчиков тока ДТ-10к-4к показаны на рис. 3, датчиков напряжения ДН-4к — на рис. 4.

Преимущества нового поколения аппаратуры МСДП:

расширенные функциональные возможности: ручное, дистанционное и те-



Рис. 3. Датчики для измерения постоянного или переменного тока (ДТ-10к-4к): а, б — первый и второй варианты исполнения датчика тока соответственно



Рис. 4. Датчики для измерения постоянного или переменного напряжения (ДН-4к): а, б — первый и второй варианты исполнения датчика напряжения соответственно

леуправление режимами работы; выполнение самодиагностики (контроль наличия напряжений синхронизации, контроль исправности цепей первичных обмоток трансформаторов контроля Т-627; контроль наличия выходных напряжений блока питания системы диагностики);

измерение и сохранение в памяти системы диагностики: зависимостей $U_d = f(t)$ и $I_d = f(t)$, где U_d — напряжение на выходе преобразователя; I_d — ток нагрузки преобразователя; t — время (рис. 5); внешней характеристики преобразователя $U_d = f(I_d)$ (рис. 6);

контроль и сохранение в памяти системы диагностики информации о срабатывании защиты от пробоя и нарушения проводимости диодов или тиристорных преобразователя, земляной защиты, газовой защиты преобразовательного трансформатора;

визуальная сигнализация о наличии напряжения питания, наличии напряжений синхронизации, о состоянии аварии (неисправность системы диагностики, пробой или нарушение проводимости диодов, перегрузки по току и короткие замыкания).

Система диагностики:

имеет оперативную индикацию — номер преобразователя (В1–В5), тип управления (МУ, ДУ и ТУ), ток нагрузки преобразователя (I_d , кА), напряжение на выходе преобразователя (U_d , кВ), а также аварийную и наладочную индикацию;

имеет встроенный интерфейс «человек — машина» (ИЧМ), что позволяет оперативно изменять любые параметры; выполнена на современной элементной базе с применением микропроцессорных контроллеров, что дает возможность для дальнейшей модернизации алгоритмов работы;

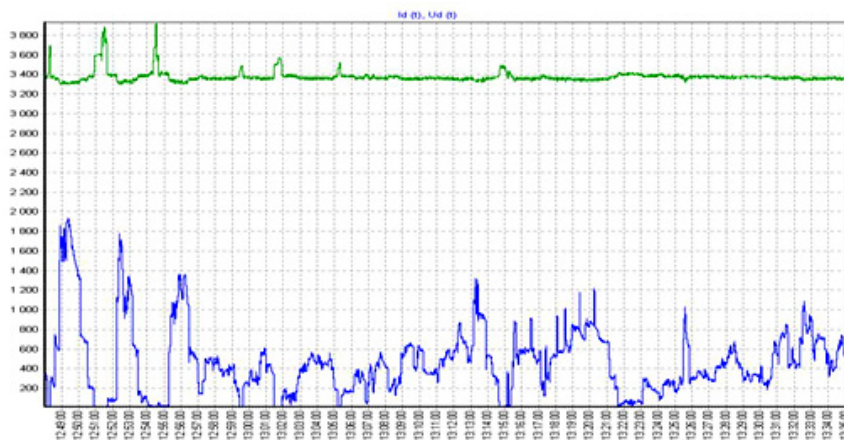


Рис. 5. Зависимости $U_d = f(t)$ и $I_d = f(t)$ выпрямителя тяговой подстанции

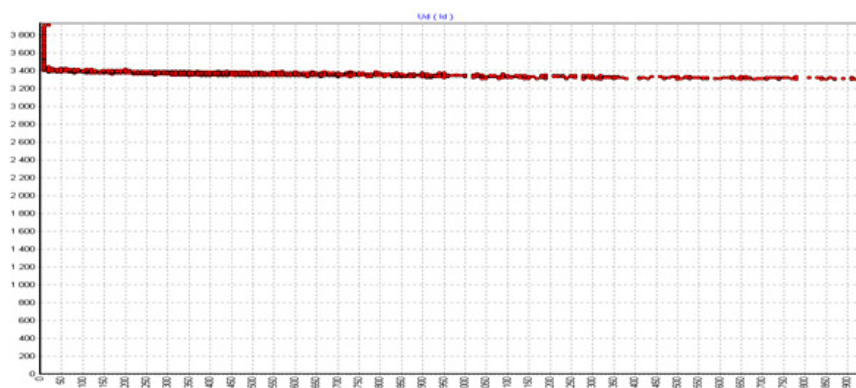


Рис. 6. Внешняя характеристика $U_d = f(I_d)$ выпрямителя тяговой подстанции

имеет высокие показатели надежности и электромагнитной совместимости с высоковольтным электрооборудованием тяговых подстанций;

обладает меньшими массогабаритными показателями.

К руководству по эксплуатации на аппаратуру МСДП прилагается дискета с технологической программой MSDP.exe, которая предназначена для настройки системы диагностики, считывания из памяти и передачи информации на персональный компьютер через интерфейс RS-232.

Аппаратура нового поколения МСДП предназначена для применения в систе-

мах тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока, в первую очередь на необслуживаемых тяговых подстанциях, где используются безлюдные технологии эксплуатации электрооборудования.

По результатам анализа методов расчета, моделирования и экспериментальных исследований тепловых процессов нагрева полупроводниковых приборов в нормальных, перегрузочных и аварийных режимах работы преобразователей тяговых подстанций [10–18] в качестве одного из основных направлений дальнейшего развития можно рекомендовать

совершенствование и разработку новых конечно-элементных моделей «полупроводниковый прибор — охладитель испарительного типа — воздушная среда».

Основные направления дальнейшего совершенствования и разработки новых вариантов исполнения устройств диагностики и защит преобразователей в первую очередь связаны с использованием современных полупроводниковых приборов повышенной мощности, созданием новых методик измерений и их приборного обеспечения, а также промышленных программируемых логических контроллеров и волоконно-оптических устройств [4, 7, 19, 20, 28–30].

ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ методов расчета и экспериментальных исследований электрических и тепловых процессов в силовых полупроводниковых секциях, определены возможности их применения при разработке и практической реализации микропроцессорных устройств диагностики и защиты для преобразователей тяговых подстанций.

2. Рассмотрены варианты исполнения устройств диагностики и защиты преобразователей тяговых подстанций. Выполнен анализ конструктивных и функциональных особенностей комплекта аппаратуры АЗДП и аппаратуры нового поколения МСДП, которые обеспечивают диагностику и защиту 6- и 12-пульсовых преобразователей в нормальных, перегрузочных и аварийных режимах работы.

3. Определены основные направления дальнейшего развития методов расчета и моделирования процессов нагрева полупроводниковых приборов с охладителями испарительного типа, а также совершенствования и разработки новых вариантов исполнения микропроцессорных устройств диагностики и защиты преобразователей тяговых подстанций.

Литература

1. Стратегия развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года («Белая книга») / ОАО «РЖД». Москва, 2011. 340 с.
2. Сердинов С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог. Москва : Транспорт, 1985. 301 с.
3. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций / С. Д. Соколов, Ю. М. Бей, Я. Д. Гуральник, О. Г. Чаусов. Москва : Транспорт, 1979. 264 с.
4. Неугодников Ю. П., Низов А. С., Штин А. Н. Инвертирование электрической энергии на электрифицированных железных дорогах. Ч. 2. Выпрямительно-инверторные преобразователи тяговых подстанций. Екатеринбург : УрГУПС, 2002. 84 с.
5. Двенадцатипульсовый выпрямительно-инверторный преобразователь для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / В. П. Неугодников, Ю. П. Неугодников, Д. Ю. Бей, И. П. Неугодников // Актуальные проблемы безопасности на железнодорожном транспорте : сборник научных трудов. Екатеринбург : УрГАПС, 1994. Вып. 1 (83). С. 142–150.
6. Блок тягового выпрямителя ТПЕЖ-3,15к-3,3к. Техническое описание. Санкт-Петербург : НИИЭФА-ЭНЕРГО, 2009.
7. Выпрямители для системы тягового электроснабжения. Каталог 89-2013-01. Санкт-Петербург : НИИЭФА-ЭНЕРГО, 2013.
8. Бей Ю. М., Неугодников Ю. П., Неугодников В. П. Защита выпрямительно-инверторных агрегатов тяговых подстанций от срыва коммутации при совместной работе преобразователей // Исследование систем и устройств автоматического регулирования напряжения в контактной сети : межвузовский сборник научных трудов. Свердловск : УЭМИИТ, 1982. Вып. 68. С. 27–37.
9. Бей Ю. М., Неугодников В. П., Неугодников Ю. П. Устройство защиты инвертора при совместной работе с выпрямителем для тяговых подстанций электрических железных дорог // Совершенствование систем и устройств электроснабжения электрических железных дорог : межвузовский сборник научных трудов. Свердловск : УЭМИИТ, 1982. Вып. 76. С. 12–23.
10. Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошивин Р. П. Силовые полупроводниковые приборы. Москва : Энергоиздат, 1985. 400 с.
11. ГОСТ 24461–80. Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытаний. Москва : Изд-во стандартов, 1990. 64 с.
12. Тепловая защита преобразовательных агрегатов / Т. П. Добровольский, С. Д. Соколов, Л. С. Айзенштейн, В. В. Руденский // Повышение эффективности полупроводниковых преобразовательных агрегатов : труды ВНИИЖТ. Москва : Транспорт, 1976. Вып. 551. С. 39–48.
13. Соболев Ю. В., Бобров Е. Г. Совершенствовать техническую диагностику выпрямителей тяговых подстанций // Электрическая и тепловозная тяга. 1976. № 12. С. 20–22. ISSN 0422–9274.
14. Соболев Ю. В. Прибор для измерения тепловых сопротивлений диодов // Совершенствование эксплуатации и ремонта тяговых подстанций и контактной сети : труды ВНИИЖТ. Москва : Транспорт, 1980. Вып. 624. С. 11–17.
15. Руденский В. В., Айзенштейн Л. С. Прибор для проверки преобразователей // Электрическая и тепловозная тяга. 1983. № 10. С. 42–44. ISSN 0422–9274.
16. Добровольский Т. П. Выбор контролируемых параметров и средств диагностики преобразователей тяговых подстанций // Новое в повышении эффективности и совершенствовании системы тягового электроснабжения : сборник научных трудов ВНИИЖТ. Москва : Транспорт, 1985. С. 119–126.

References

1. The strategy of the holding «RZD» for the period until 2030 (White Book [Strategiya razvitiya kholdinga «RZD» na period do 2030 goda («Belaya kniga») / JSC «RZD». Moscow, 2011. 340 p.
2. Serdinov S. M. Increase of reliability of electric power supply devices for electrified railways [Povyshenie nadezhnosti ustroystv elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog]. Moscow : Transport, 1985. 301 p.
3. Semiconductor converting devices of traction substations [Poluprovodnikovye preobrazovatel'nye agregaty tyagovykh podstantsiy] / S. D. Sokolov, Yu. M. Bey, Ya. D. Gural'nik, O. G. Chuasov. Moscow : Transport, 1979. 264 p.
4. Neugodnikov Yu. P., Nizov A. S., Shtin A. N. Inversion of electric energy on electrified railways. Part 2. Rectifying and inverter transformers of traction substations [Invertirovanie elektricheskoy energii na elektrifitsirovannykh zheleznykh dorogakh. Ch. 2. Vypryamitel'no-invertornyye preobrazovately tyagovykh podstantsiy]. Ekaterinburg : USURT, 2002. 84 p.
5. Twelve-pulse rectifying and inverter transformer for traction substations of electrified railways [Dvenadtsatipul'sovyy vypryamitel'no-invertornyy preobrazovatel' dlya tyagovykh podstantsiy elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog] / V. P. Neugodnikov, Yu. P. Neugodnikov, D. Yu. Bey, I. P. Neugodnikov // Actual problems of security on railway transport: collection of scientific papers. Ekaterinburg : UrGAPS, 1994. Issue 1 (83). Pp. 142–150.
6. TPEZh-3,15k-3,3k unit of traction rectifier. Technical description [Blok tyagovogo vypryamitelya TPEZh-3,15k-3,3k. Tekhnicheskoe opisanie]. St. Petersburg : NIIIEFA-ENERGO, 2009.
7. Rectifiers for traction power supply system. Catalogue 89-2013-01 [Vypryamiteli dlya sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya. Katalog 89-2013-01]. St. Petersburg : NIIIEFA-ENERGO, 2013.
8. Bey Yu. M., Neugodnikov Yu. P., Neugodnikov V. P. Protection of rectifying and inverter units of traction substations from commutation failure at joint operation of converters [Zashhita vypryamitel'no-invertornykh agregatov tyagovykh podstantsiy ot sryva kommutatsii pri sovmestnoy rabote preobrazovateley] // Study of systems and devices for automatic voltage regulation in catenary : interuniversity collection of scientific papers. Sverdlovsk : UEMIIIT, 1982. Issue 68. Pp. 27–37.
9. Bey Yu. M., Neugodnikov V. P., Neugodnikov Yu. P. Inverter protection device when working together with a rectifier for traction substations of electric railways [Ustroystvo zashhity invertora pri sovmestnoy rabote s vypryamitelem dlya tyagovykh podstantsiy elektricheskikh zheleznykh dorog] // Improvement of systems and devices for power supply of electrified railways : interuniversity collection of scientific papers. Sverdlovsk : UEMIIIT, 1982. Issue 76. Pp. 12–23.
10. Chebovskiy O. G., Moiseev L. G., Nedoshivin R. P. Power semiconductor devices [Silovyye poluprovodnikovyye pribory]. Moscow : Energoizdat, 1985. 400 p.
11. GOST 24461–80. Power semiconductor devices. Test and measurement methods [Pribory poluprovodnikovyye silovyye. Metody izmereniya i ispytaniya]. Moscow : Publishing House of Standards, 1990. 64 p.
12. Thermal protection of converter units [Teplovaya zashhita preobrazovatel'nykh agregatov] / T. P. Dobrovolskiy, S. D. Sokolov, L. S. Ayzenshteyn, V. V. Rudenskiy // Increase of efficiency of semi-conductor converter units : scientific papers of VNIIZhT. Moscow : Transport, 1976. Issue 551. Pp. 39–48.
13. Sobolev Yu. V., Bobrov E. G. Improvement of technical diagnostics of traction substation rectifiers [Sovershenstvovat' tekhnicheskuyu diagnostiku vypryamiteley tyagovykh podstantsiy] // Electric and diesel traction. 1976. No. 12. Pp. 20–22. ISSN 0422–9274.
14. Sobolev Yu. V. Device for measurement thermal resistance of diodes [Pribor dlya izmereniya teplovykh soprotivleniy diodov] // Improvement of operation and repair of traction substations and catenary : scientific papers of VNIIZhT. Moscow : Transport, 1980. Issue 624. Pp. 11–17.
15. Rudenskiy V. V., Ayzenshteyn L. S. Device for checking converters [Pribor dlya proverki preobrazovateley] // Electric and diesel traction. 1983. No. 10. Pp. 42–44. ISSN 0422–9274.
16. Dobrovolskiy T. P. Selection of controlled parameters and means of diagnostics of traction substation converters [Vybor kontroliruemykh parametrov i sredstv diagnostiki preobrazovateley tyagovykh podstantsiy] // New in increase of efficiency and improvement of traction power supply system : scientific papers of VNIIZhT. Moscow : Transport, 1985. Pp. 119–126.

17. Хазен М. М., Красова Н. П. Исследование теплового сопротивления охладителей на базе тепловых труб для силовых полупроводниковых приборов // Развитие систем тягового электроснабжения : сборник научных трудов. Москва : ВНИИЖТ; Транспорт, 1991. С. 91–98.
18. Выбор параметров преобразователей по нагрузкам в рабочих и аварийных режимах / М. М. Хазен, В. В. Руденский, Б. Б. Новик [и др.] // Развитие систем тягового электроснабжения : сборник научных трудов. Москва : ВНИИЖТ; Транспорт, 1991. С. 99–112.
19. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Никонов А. В. Результаты диагностики силовых вентиля преобразователей на тяговых подстанциях // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 97–100. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-97-100. ISSN 1815–9400.
20. Салита Е. Ю., Ковалева Т. В., Никонов А. В. Диагностирование силовых вентиля преобразователей тяговых подстанций // Известия Транссиба. 2015. № 3 (23). С. 79–85. ISSN 2220–4245.
21. Неугодников И. П. Экспериментальные исследования распределения тока по параллельным ветвям плеч выпрямителей тяговых подстанций // Разработка и совершенствование электрооборудования для систем тягового электроснабжения железных дорог / Под ред. А. В. Ефимова, Ю. П. Неугодникова. Екатеринбург : УрГУПС, 2009. Вып. 70 (153). С. 55–66.
22. Неугодников И. П., Неугодников В. П., Вербицкий В. А. Аппаратура защиты и диагностики преобразователей (АЗДП) тяговых подстанций // Фундаментальные и прикладные исследования — транспорту 2000: труды Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург : УрГУПС, 2000. Ч. 1. С. 293–294.
23. Неугодников И. П. Защита и диагностика преобразователей тяговых подстанций : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2018. 88 с.
24. Неугодников И. П. Диагностика и контроль состояния выпрямителей тяговых подстанций постоянного тока // Транспорт Урала. 2011. № 2 (29). С. 92–95. ISSN 1815–9400.
25. Неугодников И. П. Устройство для контроля состояния полупроводниковых приборов высоковольтных преобразователей // Транспорт Урала. 2010. № 2 (25). С. 80–82. ISSN 1815–9400.
26. Неугодников И. П., Магел' Я. А., Ребак Д. А. Результаты разработки и применения микропроцессорной системы диагностики преобразователей тяговых подстанций // Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте: материалы Третьего Международного симпозиума «Элтранс-2005». Санкт-Петербург : ПГУПС, 2005. С. 405–413.
27. Об утверждении и вводе в действие Правил содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения: распоряжение ОАО «РЖД» от 05.08.2016 г. № 1587р. Москва, 2016. 357 с.
28. Флоренцев С. Н. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий // Электротехника. 1999. № 4. С. 2–9. ISSN 0013–5860.
29. Флоренцев С. Н. Силовые IGBT-модули — основа современного преобразовательного оборудования // Электронные компоненты. 2002. № 6. С. 11–17.
30. Новые высоковольтные мощные тиристоры со встроенными в полупроводниковую структуру элементами защиты в аварийных режимах / П. Г. Дерменжи, Ю. М. Локтаев, А. М. Сурма, А. А. Черников // Силовая электроника. 2012. № 1. С. 14–15.
17. Khazen M. M., Krasova N. P. Study of thermal resistance of coolers on the basis of heat pipes for power semi-conductor devices [Issledovanie teplovogo soprotivleniya okhladiteley na baze teplovykh trub dlya silovykh poluprovodnikovyykh priborov] // Development of traction power supply systems : collection of scientific papers. Moscow : VNIIZhT; Transport, 1991. Pp. 91–98.
18. Selection of parameters for converters according to loads in operating and emergency states [Vybore parametrov preobrazovately po nagruzkam v raboichikh i aviariynnykh rezhimakh] / M. M. Khazen, V. V. Rudenskiy, B. B. Novik [et al.] // Development of traction power supply systems: collection of scientific papers. Moscow : VNIIZhT; Transport, 1991. Pp. 99–112.
19. Salita E. Yu., Kovaleva T. V., Nikonov A. V. Diagnostics results of converter power rectifiers at traction substations [Rezultaty diagnostiki silovykh ventily preobrazovately na tyagovykh podstantsiyakh] // Transport of the Urals. 2019. No. 1 (60). Pp. 97–100. DOI: 10.20291/1815-9400-2019-1-97-100. ISSN 1815–9400.
20. Salita E. Yu., Kovaleva T. V., Nikonov A. V. The diagnostics of traction substations power rectifiers converters [Diagnostirovanie silovykh ventily preobrazovately tyagovykh podstantsiy] // Journal of Transsib Railway Studies. 2015. No. 3 (23). Pp. 79–85. ISSN 2220–4245.
21. Neugodnikov I. P. Experimental study of current distribution on parallel branches of traction substation rectifiers [Eksperimental'nye issledovaniya raspredeleniya toka po parallel'nym vetyvam plech vypryamiteley tyagovykh podstantsiy] // Development and improvement of electric equipment for railway traction power supply systems / Ed. by A. V. Efimov, Yu. P. Neugodnikov. Ekaterinburg : USURT, 2009. Issue 70 (153). Pp. 55–66.
22. Neugodnikov I. P., Neugodnikov V. P., Verbitskiy V. A. Equipment for protection and diagnostics of converters of traction substations [Apparatura zashhity i diagnostiki preobrazovately (AZDP) tyagovykh podstantsiy] // Fundamental and applied studies to transport of 2000th: proceedings of the All-Russian scientific and technical conference. Ekaterinburg : USURT, 2000. Part 1. Pp. 293–294.
23. Neugodnikov I. P. Protection and diagnostics of converters of traction substations [Zashhita i diagnostika preobrazovately tyagovykh podstantsiy] : monograph. Ekaterinburg : Publishing House of USURT, 2018. 88 p.
24. Neugodnikov I. P. Diagnostics and control of condition of rectifiers for direct current traction substations [Diagnostika i kontrol' sostoyaniya vypryamiteley tyagovykh podstantsiy postoyannogo toka] // Transport of the Urals. 2011. No. 2 (29). Pp. 92–95. ISSN 1815–9400.
25. Neugodnikov I. P. Device for control of condition of semi-conductor devices for high-voltage converters [Ustroystvo dlya kontrolya sostoyaniya poluprovodnikovyykh priborov vysokovol'tnykh preobrazovately] // Transport of the Urals. 2010. No. 2 (25). Pp. 80–82. ISSN 1815–9400.
26. Neugodnikov I. P., Magel' Ya. A., Rebak D. A. Results of development and application of microprocessor system for diagnostics of converters of traction substations [Rezultaty razabotki i primeneniya mikroprotssornoy sistemy diagnostiki preobrazovately tyagovykh podstantsiy] // Electrification and development of energy-saving infrastructure and electric motive power on railway transport: proceedings of the 3rd International Symposium «Eltrans-2005». St. Petersburg : PSTU, 2005. Pp. 405–413.
27. On approval and activation of Rules on maintenance of traction substations, transformer substations and linear equipment of traction power supply system [Ob utverzhdenii i vvode v deystvie Pravil soderzhaniya tyagovykh podstantsiy, transformatornykh podstantsiy i lineynykh ustroystv sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya]: Order of the JSC «RZD» dated 05.08.2016 No. 1587r. Moscow, 2016. 357 p.
28. Florentsev S. N. Condition and perspectives of development of power electronic devices at the turn of the century [Sostoyaniye i perspektivy razvitiya priborov silovoy elektroniki na rubezhe stoletiy] // Russian Electrical Engineering. 1999. No. 4. Pp. 2–9. ISSN 0013–5860.
29. Florentsev S. N. Power IGBT-modules is the basis of modern converting equipment [Silovye IGBT-moduli — osnova sovremennogo preobrazovatel'nogo oborudovaniya] // Electronic components. 2002. No. 6. Pp. 11–17.
30. New high-voltage powerful thyristors with built into semi-conductor structure elements for protection in emergency states [Novye vysokovol'tnye moshhnye tiristory so vstroennymi v poluprovodnikovuyu strukturu elementami zashhity v aviariynnykh rezhimakh] / P. G. Dermenzhi, Yu. M. Loktaev, A. M. Surma, A. A. Chernikov // Power electronics. 2012. No. 1. Pp. 14–15.

Уважаемые читатели и авторы журнала «Транспорт Урала»!

Если вам нравится наш журнал, вы можете оказать содействие в его развитии, перечислив денежные средства по реквизитам:

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС

ИНН-КПП 6670317893/667001001

ОГРН 1156600001470

620075, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Шевченко, д. 20, помещение 1

Р/с 40703810863010000192

в ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ

к/с 30101810900000000795

БИК 046577795

Назначение платежа: «Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС».

Ваша финансовая поддержка позволит нам увеличить число публикаций, повысить индексы цитирования журнала и наших авторов.

Уважаемые руководители инновационных компаний и предприятий!

Предлагаем вам услуги по продвижению вашей продукции через сеть Ассоциации выпускников УЭМИИТ-УрГУПС.

Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС — это кооперация большого числа неравнодушных людей различных сфер деятельности, окончивших наш университет.

Кроме того, предлагаем услуги по подбору молодых специалистов, по организации поиска решений прикладных и научных задач в рамках диссертационных работ, выполняемых в УрГУПС.

Всю необходимую информацию вы можете получить по тел. (343) 221-24-67 или на сайте <http://www.usurt.ru/vypusknikam/assotsiatsiya-vypusnikov-urgups>

Извещение	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2022 г.</p>
Квитанция	<p>Получатель: Ассоциация выпускников УЭМИИТ-УрГУПС КПП: 667001001 ИНН: 6670317893 ОКТМО: 65701000 Р/сч.: 40703810863010000192 в: ПАО КБ «УБРИР» филиал ССБ БИК: 046577795 К/сч.: 30101810900000000795 Код бюджетной классификации (КБК): _____ Платеж: Пожертвование для поддержки научных журналов УрГУПС Плательщик: _____ Адрес плательщика: _____ ИНН плательщика: _____ № л/сч. плательщика: _____ Сумма: _____ руб. ____ коп. Подпись: _____ Дата: «___» _____ 2022 г.</p>

Научно-технический журнал «Транспорт Урала» DOI:10.20291/1815-9400

№ 2 (73), 2022 год

Издается с июня 2004 г. Выходит 1 раз в квартал

Подписной индекс в общероссийском каталоге «Пресса России» — 46463

Издание зарегистрировано в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций 27 мая 2004 г. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18098

Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 577040.

Зарегистрировано в Государственном реестре товарных знаков и знаков обслуживания Российской Федерации 6 июня 2016 г.

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС)

Адрес учредителя и издателя:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Адрес редакции:

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66.

Тел. (343) 221-24-90

<http://www.usurt.ru/transporturala>

e-mail: EPupova@usurt.ru

Главный редактор:

Александр Геннадьевич Галкин

Научный редактор:

Александр Эрнстович Александров

Выпускающий редактор и корректор:

Елена Семеновна Пупова,

тел. (343) 221-24-90, 8-912-61-07-229,

e-mail: EPupova@usurt.ru

Верстка и дизайн:

Андрей Викторович Трубин

Автор фотографии на обложке:

Дмитрий Васильевич Поморцев

Журнал включен ВАК в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук

Подписано в печать 06.06.2022 Выход в свет 10.06.2022

Тираж 250 экз. (1-й з-д 1–60) Формат 60×90/8

Цена 473,56 руб.

Изготовлено в ИБК УрГУПС,

620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Заказ № 19

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», 2022