

УДК 656.22

ВЛИЯНИЕ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

КОРНЕВ Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, ведущий инженер; e-mail: da.kornev@gmail.com

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва

С целью выбора алгоритма управления локомотивом, при прогнозировании рационального режима движения поезда в эксплуатации методами математического моделирования, выполнен расчет основных технико-экономических характеристик работы тепловоза 2ТЭ116У с составом, при использовании полной мощности и при управлении по параметрам режимной карты. Основой метода является динамическая модель движения поезда на участке железной дороги с заданным профилем. Для верификации разработанного метода численные исследования выполнялись в широком диапазоне изменения весов составов, не превышающих расчетный вес. Выполнено сравнение полученных результатов со статистическими данными о значениях эксплуатационных характеристик движения поездов на сети железных дорог России. Показано, что моделирование режимов движения поезда при использовании полной мощности локомотива дает значительную ошибку при расчете технической скорости, весовой норме поезда и расхода топлива и не позволяет рассчитать рациональный алгоритм управления локомотивом по используемым критериям оптимизации с учетом условий эксплуатации. Обоснована необходимость при выборе рационального алгоритма управления локомотивом учитывать реальные условия эксплуатации движения поездов по пакетному или частично пакетному графику, которые отражены в параметрах режимной карты.

Ключевые слова: динамическая модель движения поезда; верификация модели; алгоритм управления локомотивом; статистические данные эксплуатационных характеристик поездов; график движения поезда; режимная карта движения поезда; расчетные технико-экономические характеристики движения поезда.

DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-7-18

▼ Введение

Задачи рационального управления движением поезда рассматриваются во многих работах [1–4]. Эти задачи решаются в различных трактовках: при использовании полной мощности локомотива, при управлении по условиям безопасности движения и т. д. Однако в эксплуатации управление движением по любому участку сети железных дорог осуществляется в соответствии с рекомендациями режимной карты, которая предусматривает движение в пакетном или частично пакетном графике, возможности локомотива с точки зрения реализации тяги и безопасность движения по допустимому интервалу времени попутного следования поездов [5]. Исходя из этого, актуальной задачей является исследование процесса управления локомотивом, с определением степени влияния выбранного алгоритма управления на эффективность процесса грузоперевозок и параметры движения поезда.

1. Анализ эксплуатационных характеристик движения поездов

Для повышения эффективности работы железных дорог и использования подвижного состава участковая скорость движения и веса составов поездов должны возрасти. Это обуславливает целесообразность использования локомотивов все большей и большей мощности, несмотря на значительные расходы по их созданию. Особенно остро эта задача встает во время повышения объема перевозок при росте промышленного производства.

Однако зависимости, приведенные на рис. 1, 2, позволяют выявить тенденции в развитии перевозок [6]. В частности, получено, что в течение 22 лет среднестатистическая техническая скорость движения поездов колебалась в очень узком диапазоне 45,6–49,3 км/ч (рис. 1). За этот временной интервал на сети железных дорог появилось новое поколение локомотивов большей мощности, оборудованных



Рис. 1. Среднестатистические значения скоростей поездов на сети железных дорог России за 2001–2021 гг.

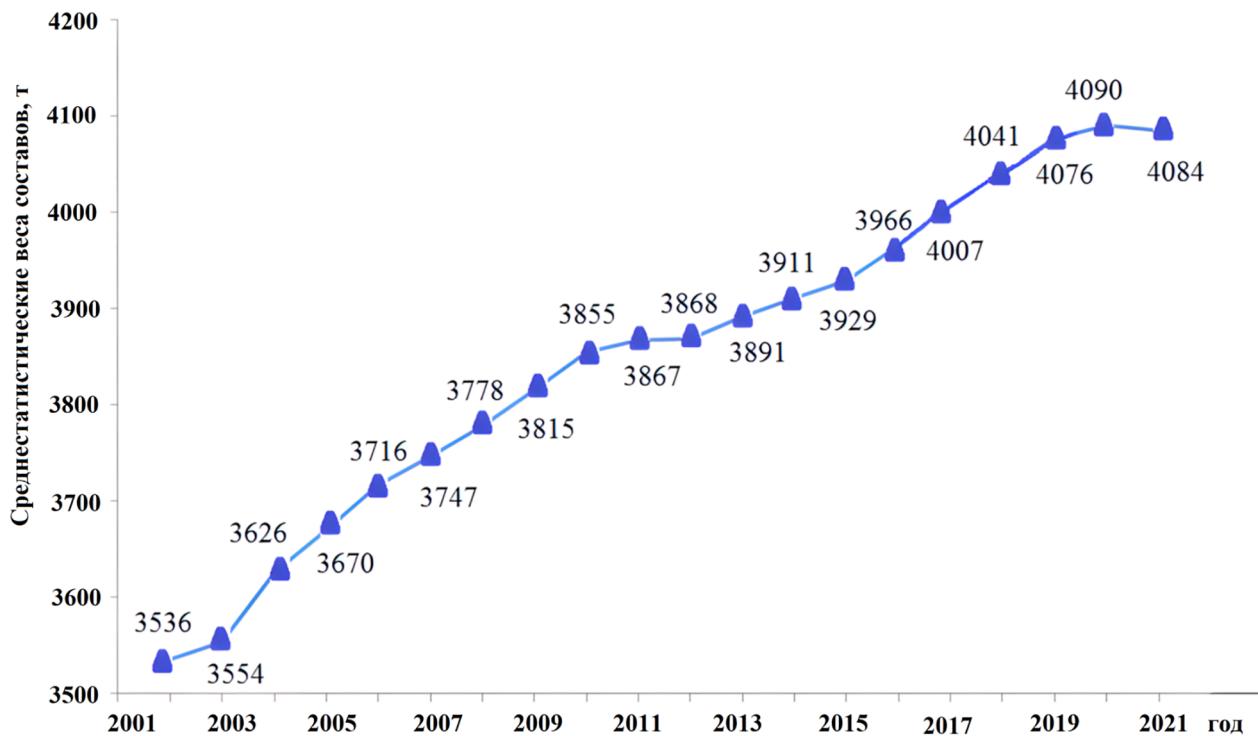


Рис. 2. Среднестатистические значения весов поездов на сети железных дорог России за 2001–2021 гг.

микропроцессорными системами управления с функциями автоведения [7–10]. Получается, технические характеристики локомотивов практически не оказывают влияния на кинематические характеристики движения, т. е. при существующей структуре пути и наличии системы диспетчерской централизации железные дороги работают на пределе пропускной способности.

При этом среднестатистические веса поездов за последние 20 лет неуклонно увеличиваются (рис. 2), что дает возможность от года к году повышать пассажиропоток и грузооборот. Реализуется это за счет возрастания тяговых свойств локомотивов и нагрузок основного энергетического оборудования.

Из сказанного следует, что при выборе рационального алгоритма управления локомотивом

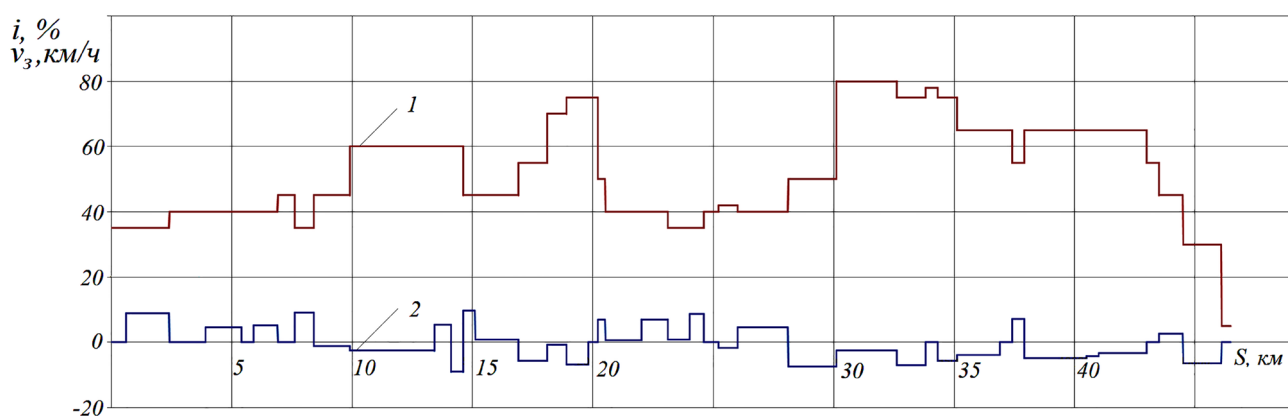


Рис. 3. Параметры режимной карты участка железной дороги:
1 — заданная скорость, v_3 ; 2 — уклон, i

необходимо ввести ограничения, которые учитывают реальные условия эксплуатации поездов на сети железных дорог.

2. Математическая модель движения поезда

С целью выявления ограничений при решении задачи выбора рационального алгоритма управления локомотивом были рассмотрены два крайних варианта управления: управление при полном использовании тяги (именно этот алгоритм положен в основу решения большинства задач по оптимизации управления) и алгоритм управления по параметрам режимной карты. Поскольку график движения поездов является вариативным, т. е. допускающий частичные изменения при сохранении инвариантной основы, в границах управления по

режимной карте могут допускаться отклонения режимов движения, которые будут влиять на эксплуатационные характеристики движения.

Для анализа технических характеристик локомотива при указанных алгоритмах управления был принят участок железной дороги с заданными уклонами и скоростями проследования (рис. 3).

Для принятого к расчету участка расчетный уклон составляет 8,8‰; скоростной уклон — 9‰¹.

Задача управления в настоящее время преимущественно решается для электрической тяги как наиболее распространенной на участках интенсивного движения поездов [11]. Поэтому ниже приведено решение поставленной

¹ Правила тяговых расчетов для поездной работы. М.: Транспорт. 1985. 287 с.

Таблица 1. Сравнительные характеристики тепловозов 2ТЭ116 и 2ТЭ116У

№ п/п	Наименование показателей	Значения показателей	
		2ТЭ116	2ТЭ116У
1	Мощность, кВт (л. с.)	2 · 2250 (2 · 3060)	2 · 2650 (2 · 3604)
2	Номинальная касательная мощность тепловоза длительного режима, кВт (л. с.)	2 · 1700 (2 · 2311)	2 · 2040 (2 · 2755)
3	Служебная масса, т	2 · 138 ±	2 · 139 ±
4	Осевая формула	2(3 ₀ – 3 ₀)	2(3 ₀ – 3 ₀)
5	Конструктивная скорость, км/ч (м/с)	100 (27,8)	100 (27,8)
6	Расчетная сила тяги длительного режима, кН (тс)	2 · 255 (2 · 26)	2 · 323,6 (2 · 33)
7	Скорость длительного режима, км/ч	24 ±	22,9 ±
8	Расчетная сила тяги при трогании с места (с учетом коэффициента использования сцепного веса), кН, не менее кН (тс)	2 · 350 (2 · 35,7)	2 · 403,5 (2 · 41,14)
9	Тип дизель-генератора	1А-9ДГ	18-9ДГ
10	Удельный расход топлива на единицу производительности, кг/10 ⁴ ткм брутто, не более	48,4	28,656

задачи применительно к локомотиву автономной тяги — тепловозу 2ТЭ116У. Тепловоз 2ТЭ116У был создан на базе серийного тепловоза 2ТЭ116, показавшего хорошие характеристики в эксплуатации.

Сравнительные характеристики тепловозов 2ТЭ116 и 2ТЭ116У приведены в табл. 1.

Численное решение поставленной задачи выполнялось с использованием динамической модели движения поезда с составами различного веса. В основу модели положено уравнение динамического состояния поезда:

$$(P + Q) \frac{dv}{dt} = F_{\Sigma}, \quad (1)$$

где P и Q — соответственно масса локомотива и состава;

v, t — текущие значения скорости и времени;

F_{Σ} — результирующая сила, действующая на поезд.

При управлении движением поезда локомотив может реализовать три режима:

- тяга;
- выбег;
- торможение.

Выбор режима движения осуществляется машинистом по условиям реальной поездной ситуации и учетом параметров режимной карты.

В соответствии с режимами управления результирующая сила, приведенная в (1), выражается как:

$$F_{\Sigma} = \begin{cases} F_k(v) - W(v, i, R) & \text{на режиме тяги;} \\ W_{xx}(v, i, R) & \text{на режиме выбега;} \\ -B_T(v) - W_{xx}(v, i, R) & \text{на режиме торможения,} \end{cases}$$

где $F_k(v)$ — касательная сила тяги локомотива;

$B_T(v)$ — тормозная сила поезда;

$W(v, i, R)$ — результирующее сопротивление движению поезда на режиме тяги;

$W_{xx}(v, i, R)$ — результирующее сопротивление движению поезда на режиме выбега;

i — уклон на текущем участке профиля;

R — радиус кривой на текущем участке профиля.

Результирующее сопротивление движения поезда в общем случае учитывает сопротивления движения локомотива и состава и

рассчитывается по значениям их удельных сопротивлений. В зависимости от управления меняется сопротивление движения локомотива, так как он может переходить из режима тяги в режимы выбега, в том числе и на режимах торможения (при торможении поездом).

В тяговом режиме результирующее сопротивление движения поезда рассчитывается по зависимости:

$$W(v, i, R) = W'(v, i, R) + W''(v, i, R);$$

в режиме выбега и торможения:

$$W_{xx}(v, i, R) = W'_{xx}(v, i, R) + W''(v, i, R),$$

где $W'(v, i, R)$ и $W'_{xx}(v, i, R)$ — сопротивления движения локомотива на режиме тяги и выбега/торможения;

$W''(v, i, R)$ — сопротивление движения состава.

В соответствии с [11] полные сопротивления движения определяются как:

$$W'(v, i, R) = P \cdot w'(v, i, R);$$

$$W''(v, i, R) = Q \cdot w''(v, i, R);$$

$$W'_{xx}(v, i, R) = P \cdot w'_{xx}(v, i, R),$$

где $w'(v, i, R)$ и $w'_{xx}(v, i, R)$ — удельные сопротивления движения локомотива на режиме тяги и выбега/торможения, т. е. сопротивления, приходящиеся на единицу массы локомотива и состава;

$w'(v, i, R)$ — удельное сопротивление движения состава.

В модели удельные сопротивления движения принимались на основании рекомендаций [11] как результат сложения основного сопротивления движения и дополнительного сопротивления движения:

$$w'(v, i, R) = w'_o(v) + w_{i,r}(i, R);$$

$$w''(v, i, R) = w''_o(v) + w_{i,r}(i, R);$$

$$w'_{xx}(v, i, R) = w'_{o,xx}(v) + w_{i,r}(i, R).$$

Основные сопротивления движения локомотива и состава задавались по экспериментальным зависимостям, приведенным в [11],

в функции от текущей скорости v , измеренной в км/ч:

— для тепловоза 2ТЭ116:

$$w'_0(v) = 1,9 + 0,01v + 0,0003v^2;$$

$$w'_{0,xx}(v) = 2,4 + 0,011v + 0,00035v^2;$$

— для состава, сформированного из четырехосных вагонов на роликовых подшипниках с допустимой нагрузкой на ось $q_0 = 19$ т/ось:

$$w''_0(v) = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_0},$$

где q_0 — нагрузка на ось груженого вагона.

Дополнительное сопротивление учитывает уклон профиля текущего участка движения i [%о] и радиус кривой R [м]:

$$w_{i,r}(i, R) = i + \frac{700}{R}.$$

Тормозная сила, создаваемая поездом, по [4]:

$$B_T(v) = n \cdot 2K \cdot \varphi_K(v),$$

где n — число осей поезда;

$K = 3,8$ т — сила нажатия пневматического тормоза на одну чугунную тормозную колодку в груженом режиме [4];

$\varphi_K(v)$ — коэффициент трения тормозных колодок.

Число осей поезда в модели определялось как:

$$n = \frac{Q}{4q_0}.$$

Для стандартных чугунных колодок действительный коэффициент трения представлен в [11] в функции от скорости v [км/ч] и рассчитывается по зависимости:

$$\varphi_K(v) = \frac{16K + 100}{80K + 100} \cdot \frac{v + 100}{5v + 100}.$$

Представленные зависимости были использованы в программе моделирования процесса

движения поезда при указанных алгоритмах управления. Для написания программы был использован язык C++, позволяющий работать с большими массивами данных.

3. Условия моделирования процесса управления тепловозом при движении поезда

При моделировании процесса движения поезда для получения адекватных результатов касательная сила тяги тепловоза 2ТЭ116У по позициям контроллера дизеля задавалась в соответствии с руководством по эксплуатации и правилами тяговых расчетов² с учетом возможности перехода на режим ослабленного возбуждения тяговых электродвигателей в зависимости от текущей скорости движения (рис. 4).

Условием управления предполагалось, что при движении поезда возможно при текущей скорости v реализовать изменение силы тяги путем последовательного перехода на другие позиции контроллера для выполнения условия:

$$v \rightarrow v_3,$$

где v_3 — значение заданной скорости на текущем участке движения в соответствии с параметрами режимной карты [12]. Фактически в модели был реализован реальный алгоритм управления локомотивом — машинист управляет скоростью движения изменением позиции контроллера (пк), а объединенный регулятор дизеля устанавливает частоту вращения коленчатого вала и цикловую подачу топлива, соответствующие данной позиции контроллера.

При моделировании была учтена инерция дизеля. Распоряжение ОАО «РЖД» 31 марта 2010 г. № 671р³ запрещает быстрый набор позиций контроллером дизеля при управлении

² ТЕПЛОВОЗ 2ТЭ116У. Руководство по эксплуатации. Ч. 1. Описание и работа 2ТЭ116.00.00.008-01 РЭ. 2009. 13 с.; Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12 мая 2016 г. № 867р.

³ Распоряжение ОАО «РЖД» от 31 марта 2010 г. № 671р «Об утверждении рекомендаций локомотивной бригаде по обнаружению и устранению неисправностей на локомотивах в пути следования». Данное распоряжение — для всех серий локомотивов.

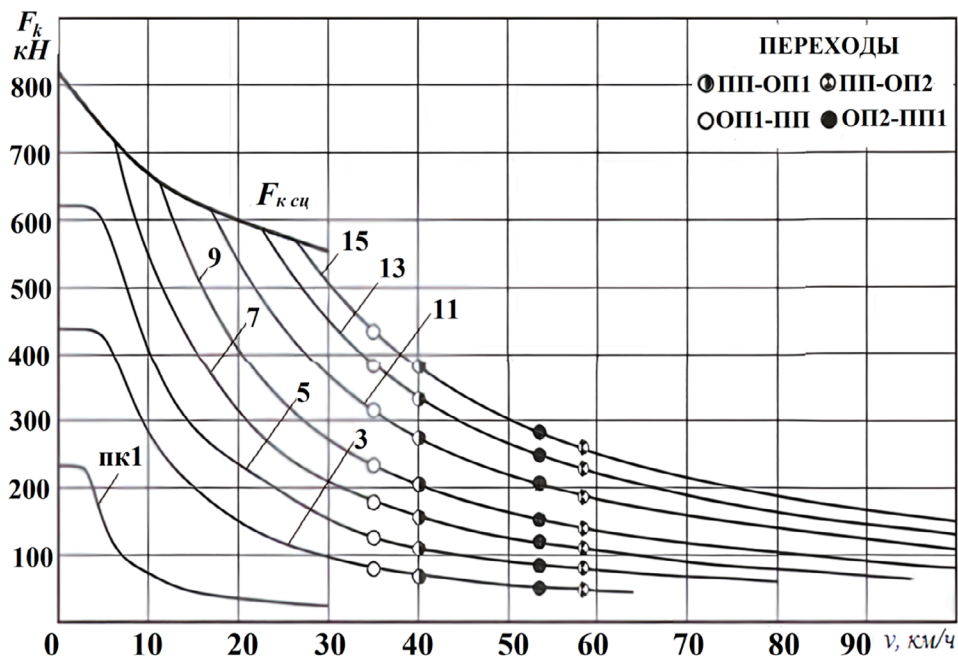


Рис. 4. Изменение силы тяги тепловоза 2ТЭ116У по позициям контроллера дизеля в зависимости от скорости: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 — позиции контроллера; ПП — полное возбуждение тяговых электродвигателей; ОП1, ОП2 — ослабленное возбуждение тяговых электродвигателей первой и второй ступеней

тепловозом. Для высокой эффективности процесса сгорания топлива в цилиндрах дизеля необходимо соответствие воздушного заряда и цикловой подачи топлива. Турбокомпрессор дизеля имеет высокую инерцию и обеспечивает необходимый воздушный заряд в цилиндрах только при установившейся частоте вращения коленчатого вала. Серводвигатель объединенного регулятора частоты вращения дизеля также имеет инерцию. Поэтому высокая скорость набора позиций приводит к несогласованности работы топливной системы и системы газораспределения, химическому и механическому недожогу топлива, закоксуыванию форсунок и повышенному износу цилиндропоршневых групп [13]. На нарушение допустимых эксплуатационных режимов работы дизелей приходится 84 % неисправностей цилиндропоршневой группы и 31 % неисправностей механизма газораспределения. Для того чтобы снизить вероятность возникновения эксплуатационных неисправностей дизеля, набор позиций должен осуществляться с интервалом 3–5 с.

Кроме того, быстрый набор позиций вызывает амплитудные нагрузки в силовом электрооборудовании, тяговом редукторе и, как

следствие, рывкам силы тяги на колесе. Все эти процессы снижают устойчивость сцепления колеса с рельсом, могут вызывать боксование колесных пар, а на высоких скоростях приводят к появлению критического искрения на щетках тяговых электродвигателей и круговому огню по коллектору.

На рис. 5 приведена осциллограмма набора позиций дизелем Д49⁴, которая снималась при его реостатных испытаниях на программный комплекс «БОРТ»⁵. Полученные переходные характеристики позволяют определить инерцию дизеля при переходе с позиции на позицию: среднестатистическая скорость изменения частоты вращения коленчатого вала составляет 0,65 об/с.

Дизель тепловоза работает на его электропривод, инерция которого значительно ниже. В соответствии с алгоритмом управления тяговым электроприводом тепловоза должно непрерывно выполняться условие:

⁴ Дизель Д49 — четырехтактный форсированный дизель с турбокомпрессором.

⁵ Аппаратно-программный комплекс «Борт» предназначен для диагностирования и управления теплотехническим состоянием дизель-генераторных установок.

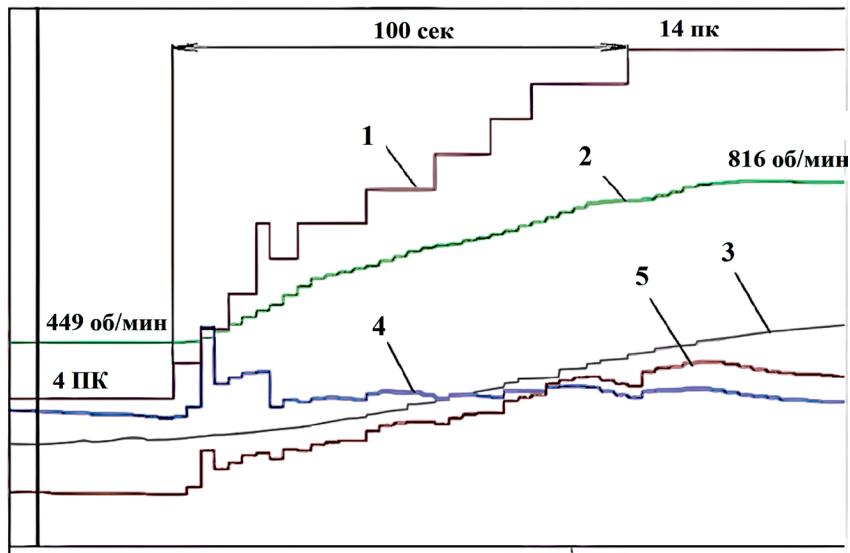


Рис. 5. Осциллограмма процесса изменения параметров режима работы тепловоза при его разгоне, полученная при реостатных испытаниях и зарегистрированная программным комплексом «БОРТ»: 1 — пк; 2 — частота вращения коленчатого вала дизеля; 3 — скорость тепловоза; 4 — ток тягового генератора; 5 — мощность тягового генератора

$$N_{\text{диз}}^{\text{СВ}} = P_{\text{г}},$$

где $N_{\text{диз}}^{\text{СВ}}$ — свободная мощность дизеля, передаваемая на тягу;

$P_{\text{г}}$ — мощность тягового генератора.

Поэтому электропривод должен в каждый текущий момент «подстраиваться» под режимы работы дизеля, в противном случае экономичность работы дизеля будет снижаться. Соответственно, и тяга, развиваемая на колесе тепловоза, в каждый момент времени соответствует свободной мощности дизеля.

Принципом работы объединенного регулятора частоты вращения коленчатого вала дизеля предусмотрено синхронное изменение частоты вращения и цикловой подачи топлива, которые определяют значение индикаторной мощности. Поэтому мощность на валу дизеля изменяется при изменении позиции контроллера машиниста с такой же скоростью, как и частота вращения коленчатого вала, т. е. 0,65 об/с. Эту инерцию работы силовой передачи необходимо было учесть при моделировании динамического процесса формирования силы тяги на колесе тепловоза при его движении с составом по заданному участку железной дороги.

Кроме того, при моделировании движения учитывалось, что на тепловозе происходит

отбор 50 % мощности на привод вспомогательных систем, т. е. $N_{\text{всп}} = 0,5 N_{\text{всп}}^{\text{НОМ}}$, где $N_{\text{всп}}$ — номинальный отбор мощности на привод вспомогательных систем тепловоза.

4. Результаты расчетов технико-экономических показателей движения поездов

При моделировании процесса движения поезда выполнялось главное ограничение условия тяги — скорость локомотива не может на длительный интервал времени снижаться ниже расчетной $v_p = 22,9$ км/ч; в противном случае будут наблюдаться перегрев обмоток тяговых электродвигателей, резкое снижение ресурса их изоляции и преждевременный отказ. Статистические данные по отказу тяговых электродвигателей показывают, что их выход из строя наблюдается уже при выработанном ресурсе менее пятидесяти процентов от рекомендуемого. Причиной тому являются неправильные условия эксплуатации, в частности неверно принятый расчетный вес состава и снижение скорости движения меньше расчетной.

Поскольку моделирование выполнялось для грузового движения, также было учтено, что допустимая скорость для грузовых поездов по сети железных дорог России не должна превышать 80 км/ч, поэтому при достижении поездом

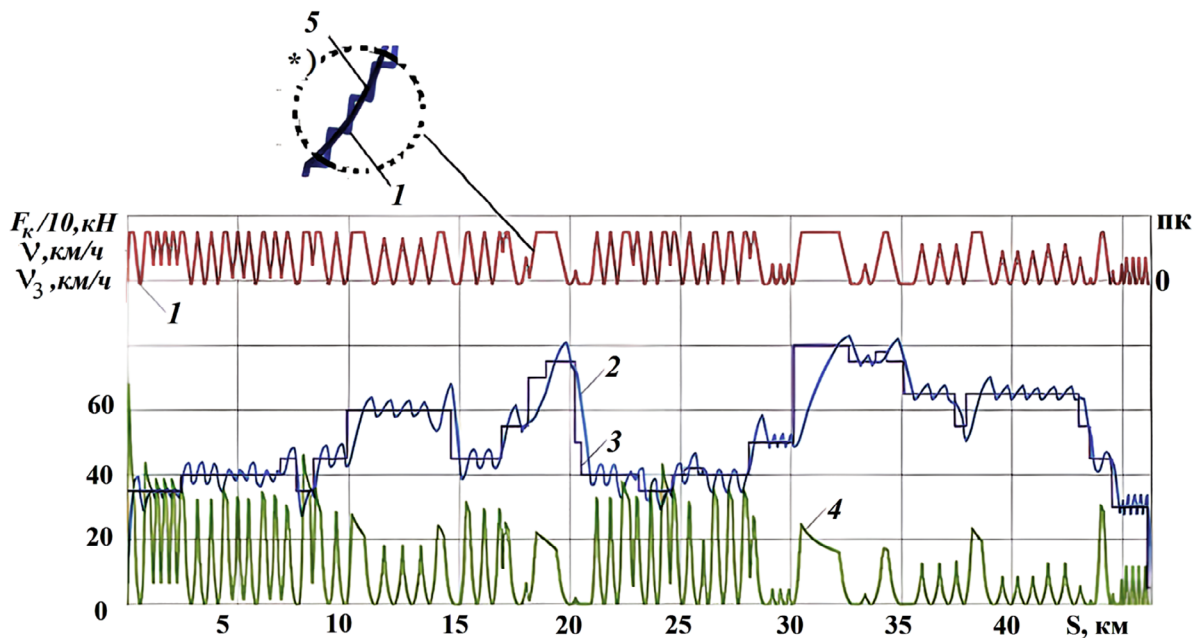


Рис. 6. Моделирование процесса движения поезда с составом расчетного веса $Q_p = 2250$ т в соответствии параметрами режимной карты; *) диаграмма набора позиций контроллером дизеля:
 1 — позиция контроллера дизеля ПК; 2 — текущая скорость движения поезда; v_3 — заданная скорость по параметрам режимной карты v_3 ; 4 — касательная сила тяги тепловоза F_k ; 5 — мощность дизеля

скорости 75 км/ч тепловоз переходил на режим выбега, когда $F_k(v) = 0$, а при скорости 80 км/ч включался пневматический тормоз.

На первом этапе работы с использованием модели были определены значения расчетного веса поезда при двух алгоритмах управления локомотивом:

- движение по параметрам режимной карты, когда возможна реализация режимов управления: тяга во всем диапазоне изменений позиций контроллера (1–15 ПК) выбега; торможения;
- движение с полным использованием мощности, когда возможна реализация режимов: тяга при максимальной мощности (мощности 15-й ПК); выбега; торможения.

Получено, что при движении по участку по параметрам режимной карты вес состава Q составил 2250 т; при движении с полным использованием мощности — $Q_p = 5550$ т. Таким образом, уже на первом этапе была выявлена большая погрешность определения оптимального алгоритма управления локомотивом при моделировании режима движения поезда с полным использованием мощности — более чем двукратное превышение допустимой весовой нормы состава. Это объясняется тем, что

при управлении по режимной карте локомотив должен выполнять пакетный график движения и на расчетном подъеме иметь скорость не 22,9 км/ч (см. табл. 1), а 36 км/ч (рис. 6). Особенно это касается участков железной дороги с интенсивным движением поездов и участков с пассажирским движением, для которых предусмотрен совсем другой скоростной диапазон.

Тем не менее при определении оптимального алгоритма управления чаще всего анализируется режим движения локомотива с использованием полной мощности, так как именно в этом случае возможно в полной мере учесть тяговые свойства локомотива, его экономичность и эффективность использования на сети железных дорог.

Далее, в соответствии с полученными значениями расчетных весов составов выполнялось моделирование процесса движения поезда по заданному участку железной дороги с определением технических характеристик — технической скорости движения, времени хода и расхода топлива дизелем.

Управление по параметрам режимной карты показало, что реализация заданного значения v_3 требует от машиниста практически постоянного изменения позиции контроллера (рис. 6),

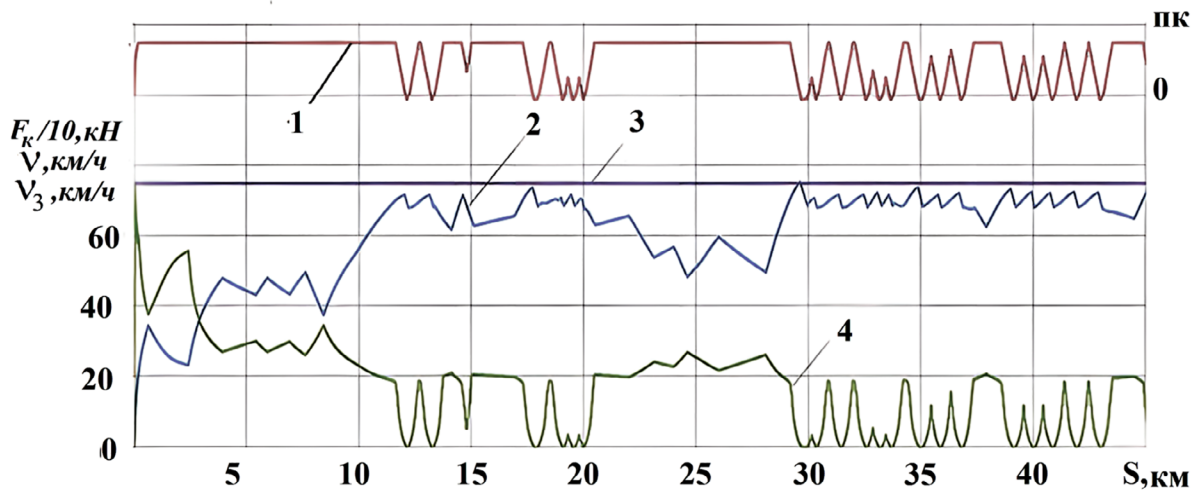


Рис. 7. Моделирование процесса движения поезда с составом расчетного веса $Q_p = 5550$ т при полном использовании мощности:

1 — позиция контроллера дизеля ПК; 2 — текущая скорость движения поезда, v ;
3 — заданная скорость по параметрам режимной карты v_3 ; 4 — касательная сила тяги тепловоза, F_k

т. е. непрерывного контроля за поездной ситуацией. Кроме того, работа дизеля на переходных режимах приводит к ухудшению качества рабочих процессов, снижению его экономических и экологических показателей [14]. В соответствии с текущими позициями контроллера и скоростью касательная сила тяги изменяется в полном диапазоне, достигая максимального значения в момент трогания и на расчетном подъеме. При этом условие $v \rightarrow v_3$ выполняется с хорошей точностью. Даже с учетом того, что уклон участка меняется через каждый километр (рис. 3), ошибка регулирования скорости $(v_3 - v) \leq 5$ км/ч (рис. 6).

При моделировании процесса движения поезда по алгоритму управления локомотивом с полным использованием мощности было получено, что расчетный вес состава $Q_p = 5550$ т позволяет получить максимальную скорость 75 км/ч на отдельных участках следования (рис. 7). Поскольку в этом алгоритме управления заданная скорость имеет единственное значение $v_3 = 75$ км/ч, режимы работы энергетической установки меняются реже, а соответственно, и сила тяги имеет более монотонный характер, что лучше как с точки зрения работы энергетического оборудования, так и с точки зрения процесса управления локомотивом.

На расчетном подъеме, что соответствует алгоритму управления, скорость снижается до

расчетной — 22,9 км/ч, зато на большей части участка движения скорость приближается к заданной.

Сравнение эксплуатационных характеристик работы тепловоза показало, что на заданном участке железной дороги протяженностью 46,5 км при использовании алгоритма управления в соответствии с режимной картой и составом $Q = 2250$ т:

- время хода поезда составило 61 мин.;
- средняя скорость — 45,6 км/ч;
- расход топлива — 428 кг.

При использовании алгоритма управления движение с полной мощностью локомотива и составом $Q_p = 5550$ т:

- время хода поезда составило 50 мин.;
- средняя скорость — 55,8 км/ч;
- расход топлива — 707 кг.

Таким образом, при сравнении технико-экономических характеристик движения поезда при использовании указанных алгоритмов управления получен противоречивый результат исследования:

- 1) движение по режимной карте снижает допустимый вес состава более чем в два раза — с 5550 до 2250 т, что обусловлено разными значениями заданной скорости на расчетном подъеме;
- 2) при более чем двукратном уменьшении веса состава алгоритм управления по режимной карте дает снижение средней

скорости движения всего на 18 % — с 55,8 до 45,6 км/ч и увеличение времени хода с 50 мин. до 61 мин. (на 20,5 %);

- 3) при использовании алгоритма управления по режимной карте расход топлива дизелем снижается на 39 %.

С точки зрения увеличения пропускной способности управление локомотивом по режимной карте является экономически не оправданным — во-первых, более чем в два раза уменьшается вес поезда, т. е. более чем в два раза снижается эффективность перевозочного процесса; во-вторых, ухудшаются эксплуатационные характеристики — время хода и средняя скорость движения. Снижение расхода топлива является вторичным результатом, так как основное назначение железной дороги — организация высокоэффективного перевозочного процесса.

Моделирование процессов движения поезда при разных алгоритмах управления тепловозом 2ТЭ116У позволило рассчитать его технико-экономические характеристики при различных весах поездов.

При движении по режимной карте вес поезда незначительно влияет на среднее значение технической скорости, поскольку в соответствии с алгоритмом управления $v \rightarrow v_3$ (рис. 7). Соответственно, и время движения изменяется незначительно. Расход топлива возрастает с увеличением веса поезда, поскольку увеличиваются затраты мощности на тягу.

Важно отметить, что расчетные значения средней технической скорости движения локомотивом при управлении по параметрам режимной карты соответствуют ее статистическим значениям (рис. 1, 6). Это подтверждает первоначальную гипотезу о том, что в эксплуатации, независимо от того, что железные дороги России оборудованы системой диспетчерской централизации и на локомотивах широко внедряются системы автоведения с возможностью оптимизации управления, в абсолютном большинстве случаев движение поездов вынужденно осуществляется по режимной карте из-за невозможности движения вне графика. Полученное меньшее, чем статистическое, значение веса состава (рис. 2) имеет простое объяснение — все расчеты выполнялись для тепловоза, а на железной дороге России эксплуатируется большое

количество электровозов, которые имеют большую мощность, а соответственно, и тягу.

При использовании алгоритма управления локомотивом движение с полной мощностью с уменьшением веса поезда средняя техническая скорость увеличивается, а время хода и расход топлива дизелем уменьшаются (рис. 8). Полученные при моделировании расчетные значения средней технической скорости отличаются от статистических значений на 20–50 %, а веса составов — на 40 %, при этом графиковое время движения поезда по участку выдержать возможно во всем диапазоне изменения весов поездов.

Полученные результаты позволяют утверждать, что в качестве базового алгоритма управления локомотивом следует принимать алгоритм управления по режимной карте в общем графике движения, а в качестве критериев оптимизации выбирать весовые нормы поездов и затраты энергии на перевозочный процесс. Алгоритмы управления, ориентированные на расчет технических характеристик движения поезда при использовании его номинальной свободной мощности, не соответствуют условиям решения реальной задачи, так как не ориентированы на правила эксплуатации.

Сравнительный анализ полученных результатов показал, что при выполнении тяговых расчетов по алгоритму «движение локомотива с полной мощностью» следует ожидать следующие ошибки при определении технических характеристик движения поезда:

- время хода на 20–30 % ниже среднеэксплуатационного;
- средняя скорость движения на 25–40 % выше среднеэксплуатационной;
- расход топлива дизелем на 60–70 % ниже среднеэксплуатационного.

Заключение

Таким образом, численным исследованием показано, что при использовании алгоритма управления тепловозом движение с полной мощностью, который рекомендован для выполнения тяговых расчетов с целью определения технических характеристик движения поезда — времени хода и средней скорости движения, а также экономичности работы тепловоза — дает значительную ошибку. При этом

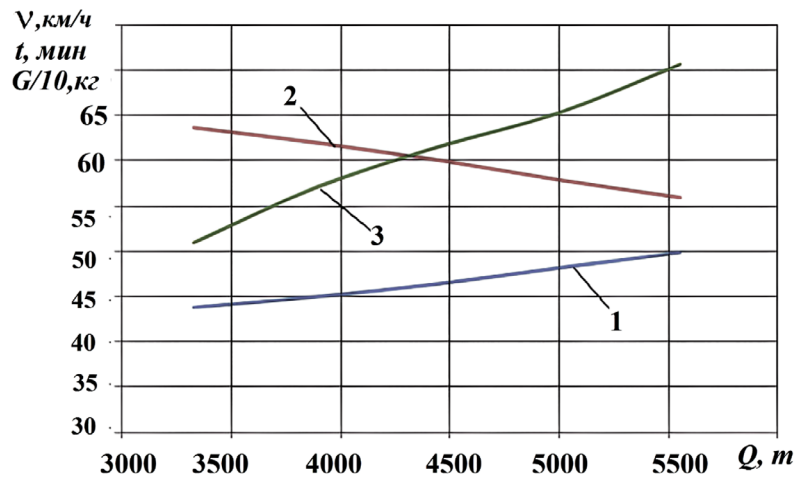


Рис. 8. Изменение технических характеристик движения поезда при алгоритме управления «движение с полной мощностью» и различных весах состава Q :
 1 — время движения по участку; 2 — средняя техническая скорость; 3 — расход топлива дизелем

возможно обеспечить заданное время хода по участку железной дороги в допустимом диапазоне весов поездов, включая расчетный вес. Однако этот алгоритм не позволяет обеспечить заданную скорость на расчетном подъеме при расчетном весе состава, что при плотном графике движения поездов приведет к его сбою или снизит показатели безопасности движения за счет сокращения интервального времени. Реальные результаты выбора рациональных параметров движения можно получить только в том случае, если алгоритм управления приближен к фактическим условиям движения, т. е. использует параметры режимных карт. Поэтому важным направлением перспективных исследований является поиск оптимальных алгоритмов управления подвижным составом в графиковом расписании с учетом поездной ситуации. Реализация такого алгоритма на базе микропроцессорной системы автоведения локомотива позволит управлять движением по любым критериям оптимизации с максимальной эффективностью работы железнодорожного транспорта. ▲

Библиографический список

1. Баранов Л. А. Микропроцессорные системы автоведения подвижного состава / Л. А. Баранов, Я. М. Головичер, Е. В. Ерофеев и др.; под ред. Л. А. Баранова. — М.: Транспорт, 1990. — 272 с.
2. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поездов / Л. А. Мугинштейн, С. А. Виноградов, И. А. Ябко // Железнодорожный транспорт. — 2010. — № 2. — С. 24–29.

3. Баранов Л. А. Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения / Л. А. Баранов, В. Г. Сидоренко, Е. П. Балакина и др. // Надежность. — 2021. — № 2. — С. 17–23. — DOI: doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23.
4. Su R. Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm / R. Su, Q. Gu, T. Wen // Journal of Applied Mathematics. — Vol. 2014. — DOI: doi.org/10.1155/2014/507308. — URL: https://www.hindawi.com/journals/jam/2014/507308/.
5. Liu P. Optimizing the train timetable with consideration of different kinds of headway time / P. Liu, B. Han // Journal of Algorithms & Computational Technology. — 2017. — Vol. 11(2). — Pp. 148–162. — DOI: doi.org/10.1177/1748301816689685.
6. Железнодорожные перевозки и инфраструктура. — URL: https://ar2001.rzd.ru/ru/performance-overview/analysis-operating-results/railway-transportation-infrastructure (дата обращения: 14.12.2022).
7. Coxon M. Alstom to deliver Train Control System for KiwiRail in New Zealand. 14 September 2022. — URL: https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/9/alstom-deliver-train-control-system-kiwirail-new-zealand (accessed: December 14, 2022).
8. Lina B. Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm / B. Lina, Y. Zhaoa, R. Linb et al. // Applied Mathematical Modelling. May 2021. — Vol. 93. — Pp. 811–830. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0307904X20307381 (accessed: December 14, 2022).
9. Новиков В. Г. Микропроцессорные системы управления движением поездов в московском метрополитене / В. Г. Новиков, А. С. Сафронов, В. В. Кузюков // Автоматика на транспорте. — 2020. — Т. 6. — № 3. — С. 268–288. — DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-268-293.

10. Satoru I. Latest Train Control and Management System Technologies for Improving Safety and Maintainability / I. Satoru, S. Takayuki, S. Keishi et al. // Hitachi Review. — 2018. — Vol. 67. — Iss. 7. — Pp. 52–58.
11. Urbaniak M. Optimization of Train Energy Cooperation Using Scheduled Service Time Reserve / M. Urbaniak, E. Kardas-Cinal // Energie. — 2022. — Vol. 15.
12. Sovicka P. Improved train simulation with speed control algorithm / P. Sovicka, M. Pacha, P. Rafajdus et al. // Trans-

- portation Research Procedia. — 2019 — Vol. 40. — Pp. 1563–1570.
13. Коньков А. Ю. Метод регулировки топливной аппаратуры тепловозного дизеля по характеристике тепловыделения в условиях эксплуатации / А. Ю. Коньков, А. И. Трунов, А. Д. Гурьянова // Вестник ВНИИЖТ. — 2021. — Т. 80. — № 1. — С. 20–29. — DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-20-29.
14. Морозов О. В. Влияние эксплуатационных факторов на режимы работы тепловозов / О. В. Морозов, А. Г. Силюта, Е. П. Филиппов. — 2022.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2023, Vol. 9, No. 1, pp. 7–18
DOI: 10.20295/2412-9186-2023-9-01-7-18

Influence of Control Algorithm on Train Traffic Technical Characteristics

Information about author

Kornev D. A., PhD in Engineering, Lead Engineer. E-mail: da.kornev@gmail.com

Research and Design Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunications on Railway Transport (JSC NIIAS), Moscow

Abstract: In order to choose locomotive control algorithm when prognosing train motion rational mode in an exploitation by the methods of mathematical modeling, the calculation was performed of main technical and economic characteristics of the operation of diesel locomotive ZTE116U with a stock at the use of full power and at control, basing on the parameters of a mode map. The method basis represents train motion dynamic model on a railway section with a given profile. To verify the developed method, numerical studies were carried out in the wide range of changes of stock weights which not exceed the calculated weight. The obtained results have been compared with statistical data on the values of operational characteristics of train motion on Russia railways. It has been shown that train motion mode modelling at the use of locomotive full power gives a significant error at calculating technical speed, at the norm of train weight rate and fuel consumption and does not allow calculating locomotive control rational algorithm on optimization used criteria inclusive of operation conditions. At the choice of locomotive control rational algorithm, the necessity is substantiated for taking into account real conditions of train motion operation by batch or partially batch schedule which are reflected in mode map parameters.

Keywords: dynamic model of train motion; model verification; locomotive control algorithm; statistical data of train operational characteristics; train schedule; train motion mode map; calculated technical and economic characteristics of train motion.

References

1. Baranov L. A., Golovicher Ya. M., Erofeev E. V. et al. Mikroprotsessornyye sistemy avtovedeniya podvizhnogo sostava [Microprocessor systems for automatic guidance of rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1990, 272 p. (In Russian)
2. Muginshtein L. A., Vinogradov S. A., Yabko I. A. et al. Energooptimal'nyy tyagovyy raschet dvizheniya poyezdov [Energy-optimal traction calculation of the movement of trains]. Zheleznodorozhnyy transport [Railway transport]. 2010, vol. 2, pp. 24–29. (In Russian)
3. Baranov L. A., Sidorenko V. G., Balakina E. P. et al. Intellektual'noye tsentralizovannoye upravleniye dvizheniyem vneulichnogo gorodskogo zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh intensivnogo dvizheniya [Intelligent centralized traffic control of off-street urban railway transport in conditions of heavy traffic]. Nadezhnost'

[Reliability]. 2021, vol. 2, pp. 17–23. DOI: doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23. (In Russian)

4. Su R., Gu Q., Wen T. et al. Optimization of High-Speed Train Control Strategy for Traction Energy Saving Using an Improved Genetic Algorithm. Journal of Applied Mathematics, vol, 2014. DOI: doi.org/10.1155/2014/507308. Available at: <https://www.hindawi.com/journals/jam/2014/507308/>.
5. Liu P., Han B. Optimizing the train timetable with consideration of different kinds of headway time. Journal of Algorithms & Computational Technology, 2017, vol. 11(2), pp. 148–162. DOI: 10.1177/1748301816689685.
6. Zheleznodorozhnye perevozki i infrastruktura [Railway transportation and infrastructure]. Available at: <https://ar2001.rzd.ru/performance-overview/analysis-operating-results/railway-transportation-infrastructure> (accessed: December 14, 2022). (In Russian)
7. Coxon M. Alstom to deliver Train Control System for KiwiRail in New Zealand. 14 September 2022. Available at: <https://www.alstom.com/press-releases-news/2022/9/alstom-deliver-train-control-system-kiwirail-new-zealand> (accessed: December 14, 2022).
8. Lina B., Zhaoa Y., Linb R. et al. Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm. Applied Mathematical Modelling. May 2021, vol. 93, pp. 811–830. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0307904X20307381> (accessed: December 14, 2022).
9. Novikov V. G., Safronov A. S., Kuzukov V. V. Mikroprotsessornyye sistemy upravleniya dvizheniyem poyezdov v moskovskom metropolitene [Microprocessor control systems for train traffic in the Moscow metro]. Avtomatika na transporte [Transport automation research]. 2020, vol. 6, iss. 3, pp. 268–288. DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-268-293. (In Russian)
10. Satoru I., Takayuki S., Keishi S. et al. Latest Train Control and Management System Technologies for Improving Safety and Maintainability. Hitachi Review. 2018, vol. 67, iss. 7, pp. 52–58.
11. Urbaniak M., Kardas-Cinal E. Optimization of Train Energy Cooperation Using Scheduled Service Time Reserve. Energie. 2022, vol. 15. DOI: doi.org/10.3390/en15010119.
12. Sovicka P., Rafajdus P., Varecha P. et al. Improved train simulation with speed control algorithm. Transportation Research Procedia. 2019, vol. 40, pp. 1563–1570.
13. Konkov A. Yu., Trunov A. I., Gurianova A. D. Metod regulirovki toplivnoy apparatury teplovoznogo dizelya po kharakteristike teplovydeleniya v usloviyakh ekspluatatsii [A method for adjusting the fuel equipment of a diesel locomotive according to the characteristics of heat release under operating conditions]. Vestnik VNIIZHT [VNIIZHT Bulletin]. 2021, vol. 80, iss. 1, pp. 20–29. DOI: 10.21780/2223-9731-2021-80-1-20-29. (In Russian)
14. Morozov O. V., Silyuta A. G., Filippov E. P. Vliyaniye ekspluatatsionnykh faktorov na rezhimy raboty teplovozov [The Influence of Operational Factors on the Operating Modes of Diesel Locomotives]. 2022. (In Russian)