

УДК 629.4.016.1(045)

Использование программного комплекса «Тяга — Прогноз» для поиска энергооптимальных режимов ведения поезда

В. П. Гриневич¹, Д. Н. Курилкин², Т. С. Авсиевич¹

¹Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»), Российская Федерация, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

²Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Гриневич В. П., Курилкин Д. Н., Авсиевич Т. С. Использование программного комплекса «Тяга — Прогноз» для поиска энергооптимальных режимов ведения поезда // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 131–149. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149

Аннотация

Цель: В статье представлено описание программного комплекса «Тяга — Прогноз» для выполнения тягово-энергетических расчетов с ручным и автоматическим формированием режимов управления. Применяемые в настоящее время программные продукты обладают рядом недостатков, не позволяющих автоматизировать процесс выполнения тягово-энергетических расчетов при исследованиях и испытаниях нового и существующего подвижного состава. Также актуальной является задача поиска энергооптимальных режимов ведения поезда при различных условиях эксплуатации. Решением данной проблемы послужила разработка и апробация программного комплекса «Тяга — Прогноз». **Методы:** Численное решение дифференциального уравнения движения поезда проводилось по интервалам пройденного пути с использованием последовательного приближения. Осуществлен предварительный расчет возможных траекторий движения с целью поиска энергоэффективных режимов ведения поезда. Учитывались переходные процессы в энергетической установке и тормозной системе поезда. Соппротивление движению поезда от профиля и продольного плана линии определялось при учете повагонного распределения единиц тягового подвижного состава, а также в случае повагонного трогания поезда с места. Расчет попутного следования поездов проводился с учетом особенностей маневровой работы. **Результаты:** Как показало сравнение результатов тягово-энергетических расчетов и опытных поездок, точность выполнения тяговых расчетов составляет около 1,5 %. Предлагаемые программой энергоэффективных режимов ведения поезда позволяют сократить расход энергоресурсов более чем на 3 %. **Практическая значимость:** Использование программного комплекса «Тяга — Прогноз» позволит повысить точность тяговых расчетов как для существующего, так и для вновь проектируемого подвижного состава. Гибкость формирования тяговых и тормозных характеристик, а также имеющиеся возможности задания сил сопротивления движению позволяют оценить эффективность принимаемых решений с точки зрения энергоэффективности на стадии проектирования подвижного состава. Применение формируемых программным комплексом энергоэффективных режимов ведения поезда способствует сокращению расхода энергоресурсов на тягу поездов.

Ключевые слова: Программный комплекс, тяговые расчеты, оптимальное управление, сила тяги, сопротивление движению, тормозные силы.

Введение

Усложнение перевозочного процесса повысило требования и к тяговому подвижному составу. Теперь эффективность новых локомотивов оказалась тесно связана с полигоном их предполагаемой эксплуатации.

Повышение качества тягово-энергетических расчетов предполагает использование современных методов и средств их выполнения. Также отдельную задачу представляет собой поиск энергоэффективных режимов ведения поезда при различной поездной обстановке.

Существует достаточное количество программных комплексов для выполнения тяговых расчетов [1–4], начиная с программ для решения конкретных задач и заканчивая многоцелевыми программными комплексами со сложной архитектурой и большим объемом решаемых задач. К сожалению, как правило, разработчики программных комплексов скрывают информацию об используемых принципах выполнения расчетов, выборе режимов ведения, задании способа представления тяговой характеристики локомотива, сопротивления движению поезда и тормозных сил. Кроме того, при создании программных комплексов авторы формируют единственный алгоритм формирования режимов ведения и не учитывают ряд особенностей поведения поезда и локомотива при трогании и смене режимов управления.

Структура и функциональные возможности программного комплекса

В качестве современного программного продукта, обладающего достаточной гибкостью формирования режимов управления, возможностью настройки большого числа параметров, характеризующих сопротивление движению поезда, его тяговые и тормозные возможности, специалистами АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ») и ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО «ПГУПС») предложен программный комплекс «Тяга — Прогноз».

Структура программного комплекса представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура программного комплекса «Тяга — Прогноз»

В соответствии с представленной структурой программного комплекса предполагаются следующие режимы работы программы:

- создание или редактирование баз данных вагонного и локомотивного парка, сформированных поездов и участков;
- выполнение тяговых расчетов и просмотр ранее произведенных расчетов.

В базах данных применяется информация, полученная из таблиц Excel, поэтому базы данных можно редактировать (удалять существующие объекты, создать новых и т. д.) без использования исполняемого файла.

В базе данных вагонного парка хранится информация о типе вагона, числе его осей, грузоподъемности, таре, длине по осям автосцепок. Для пассажирских вагонов дополнительно хранится информация о мощности установленных подвагонных генераторов.

В базе данных локомотивов содержится информация о силе тяги, токе тяговых двигателей, тепловых параметрах и расходе топлива (электрической энергии) локомотивом при номинальной и всех промежуточных позициях контроллера машиниста. В зависимости от имеющейся информации характеристики формируются в ручном режиме пошагово или в автоматическом режиме путем расчета тяговых характеристик по нескольким точкам. Кроме того, хранится информация о позициях электрического торможения, длине и массе локомотива, коэффициенте инерции его вращающихся масс.

В базе данных сформированных поездов содержится информация о схеме сформированного поезда, фактической загрузке вагонов, тормозных средствах каждой единицы подвижного состава. Информация о грузоподъемности, таре и длине подвижного состава переносится из баз данных локомотивов и вагонов.

К информации о тормозных средствах подвижного состава относятся:

- тип и параметры тормозного цилиндра;
- тип тормозных колодок;
- передаточное число и КПД тормозной рычажной передачи;
- наличие авторежима;
- наличие режима включения воздухораспределителя;
- наличие авторегулятора тормозной рычажной передачи и его основные параметры.

База данных сформированных участков пути содержит информацию о параметрах продольного профиля пути (уклоны), о параметрах плана железнодорожной линии (радиусы и длины кривых, а также возвышение наружного рельса), расположение станций с указанием входных и выходных стрелок, о допустимых скоростях движения поезда с учетом постоянно действующих ограничений.

В базе данных ранее выполненных расчетов хранится информация о выполненном тяговом расчете с шагом 10 м, а также подробная статистическая информация о режимах ведения поезда, расходе энергоресурсов и т. п.

Тяговый расчет выполняется программным комплексом путем численного решения основного уравнения движения поезда с шагом интегрирования $\Delta s = 10$ м:

$$v_i = \sqrt{v_{i-1}^2 + \Delta s \cdot \frac{500}{\xi} \cdot (f_k(v, u) - b_T(v, u) - w_o(v, u) \pm w_{\text{доп}}(s, v))}, \quad (1)$$

где v_i, v_{i-1} — значения скорости в конце предыдущего и текущего шага расчета;
 ξ — коэффициент единичного ускорения поезда, учитывающий наличие вращающихся частей, перевод ускорения из м/с² в км/ч² и приведение удельных сил к размерности Н/т;

v — средняя на данном шаге скорость движения поезда, км/ч;

u — режим управления (тяговая, тормозная позиция или выбег);

s — пройденный путь, м;

$f_k(v, u), b_T(v, u)$ — удельная сила тяги локомотива и удельная тормозная сила поезда, кгс/т;

$w_o(v, u), w_{\text{доп}}(s, v)$ — основное и дополнительное удельные сопротивления движению поезда, кгс/т.

Поскольку удельные силы, входящие в выражение (1), в свою очередь, зависят от средней для рассматриваемого шага интегрирования скорости, то данное выражение решалось методом последовательного приближения. Алгоритм решения приведен на рис. 2.

После решения основного уравнения движения определяются такие параметры ведения поезда, как время хода по участку, расход топлива и нагрев тяговых электродвигателей, выполняемый по следующим выражениям:

– время хода по участку на данном шаге расчета, мин:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta s}{v} \cdot 0,06, \quad (2)$$

– общее время t_i , прошедшее с момента начала движения с поездом, мин:

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i; \quad (3)$$

– накопленный расход топлива с начала поездки E_i , кг:

$$E_i = E_{i-1} + G_i \cdot \Delta t_i, \quad (4)$$

где G_i — текущее значение минутного расхода топлива, кг/мин;

– текущее значение температуры перегрева якорных обмоток тяговых электродвигателей τ_i , °С:

$$\tau_i = \tau_{\infty i} \cdot \frac{\Delta t_i}{T_i} + \tau_{i-1} \cdot \left(1 - \frac{\Delta t_i}{T_i}\right), \quad (5)$$

где $\tau_{\infty i}$ — максимальная температура нагрева тяговых двигателей при текущем значении тока тяговых двигателей, °С;

T_i — постоянная времени, характеризующая скорость нагревания обмоток тяговых двигателей, мин.

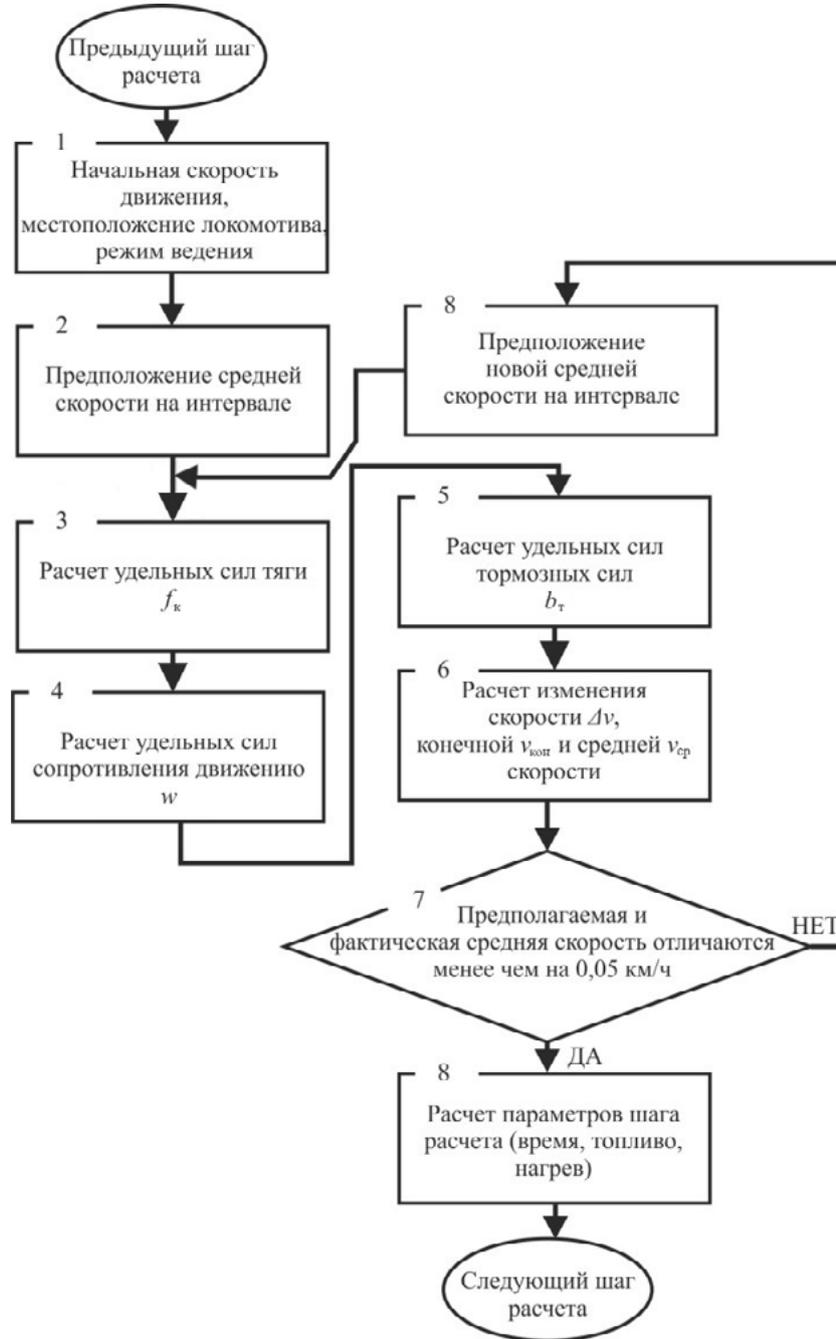


Рис. 2. Алгоритм выполнения шага расчета

Одной из особенностей данного программного комплекса является наличие различных способов задания режимов ведения поезда:

1. Ручной режим ведения поезда полностью формируется оператором в процессе выполнения расчета, имеется возможность корректировки выбранных режимов и повторения расчета.

2. Задание режима ведения поезда происходит с помощью ранее сформированной режимной карты.

3. Имеется автоматический выбор режима ведения поезда с прохождением участка за минимальное время хода.

4. Присутствует автоматический выбор режимов ведения поезда с прохождением участка за заданное время хода.

5. Возможен выбор энергооптимальных режимов работы.

Особенности задания сил тяги, торможения и сопротивления движению

В связи с тем, что программный комплекс создавался прежде всего в исследовательских целях, то в его функциональные возможности заложен большой уровень вариативности расчета сил тяги, торможения и сопротивления движению.

При выполнении тяговых расчетов, как правило, принимают, что мощность силовой установки и сила тяги локомотива изменяются мгновенно в момент переключения позиции контроллера. Наряду с подобным подходом программный комплекс предоставляет возможность учесть плавный характер изменения силы тяги в момент трогания поезда с места и в процессе переключения позиций контроллера.

В этом случае плавный характер возрастания силы тяги при трогании с места учитывается путем деления силы тяги, определенной по тяговой характеристике, на коэффициент трогания, определяемый по следующей эмпирической зависимости:

$$K_{\text{тр}} = 2,2 \cdot 10^{-9} \cdot t^5 - 5,85 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0,0008 \cdot t^2 - 0,095 \cdot t + 4,992 \geq 1, \quad (6)$$

где t — время, прошедшее с момента трогания поезда с места, с.

Для учета плавного характера изменения мощности силовой установки локомотива при изменении позиции контроллера в программном комплексе имеется возможность задать время увеличения $t_{\text{наб}}$ и уменьшения $t_{\text{сб}}$ мощности при изменении позиции контроллера. Если время, прошедшее с момента увеличения позиции контроллера машиниста, меньше, чем $t_{\text{наб}}$, то сила тяги локомотива $F_{\text{к наб}}$ определяется по формуле:

$$F_{\text{к наб}} = F_{\text{к}} \cdot \left(\frac{t}{t_{\text{наб}}} + \frac{1}{K_{\text{наб}}} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_{\text{наб}}} \right) \right), \quad (7)$$

где t — время, прошедшее с момента увеличения позиции контроллера, с;
 F_k — сила тяги по тяговой характеристике локомотива при увеличенной позиции контроллера, Н;

$K_{наб}$ — отношение свободной эффективной мощности дизель-генераторной установки на увеличенной позиции к мощности предыдущей.

При уменьшении позиции контроллера расчет силы тяги осуществляется аналогичным образом.

Программный комплекс позволяет рассматривать процесс трогания состава с места как процесс движения состава с переменной массой. При трогании рабочий ход при неполном сжатии двух автосцепок каждого вагона принимается равным 150 мм. При составе из n вагонов весь состав окажется сжат на величину $0,15n$ м. При трогании состава эта величина будет постепенно выбираться, масса состава, пришедшего в движение, расти, и после прохождения пути $0,15n$ м в движение придет вся масса состава.

В программном комплексе «Тяга — Прогноз» имеется возможность реализовать регулировочные и остановочные режимы торможения пневматического тормоза. Кроме того, в программном комплексе заложены характеристики реостатного и рекуперативного торможения в той же форме, что и тяговые позиции.

После этого определялась соответствующая данному давлению сила прижатия тормозных колодок.

Сила действительного нажатия тормозной колодки на колесо K_d определяется по следующей зависимости [5]:

$$K_d = \frac{1}{1000 \cdot m_k} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{тц}^2}{4} \cdot p_{тц} \cdot z_{тц} - F_{оп} - F_{пр}^{ар} \right) \cdot n \cdot \eta_{трп}, \quad (8)$$

где m_k — число тормозных колодок;

$d_{тц}$ — диаметр тормозного цилиндра, см;

$p_{тц}$ — установившееся давление в тормозном цилиндре, кгс/см²;

$F_{оп}$ — усилие отпускной пружины тормозного цилиндра, кгс;

$\eta_{тц}$ — КПД тормозного цилиндра;

$F_{пр}^{ар}$ — усилие пружины регулятора тормозной рычажной передачи, приведенное к штоку тормозного цилиндра, кгс;

n — передаточное число рычажной передачи;

$\eta_{трп}$ — КПД тормозной рычажной передачи.

Установившиеся давления в тормозных цилиндрах $p_{тц}^y$ определялись для каждой единицы подвижного состава с учетом типа воздухораспределителя, режима его включения, наличия авторежима и загрузки вагона, степени торможения и ее местоположения в составе:

$$p_{\text{тц}}^y = p_{\text{тц}}^0 \cdot \left(\frac{0,406 - 0,006 \cdot n}{0,406} \right), \quad (9)$$

где $p_{\text{тц}}^0$ — давление в тормозном цилиндре при нахождении вагона в голове поезда, МПа;

n — номер вагона в поезде.

Скорость наполнения тормозных цилиндров определялась по [6, 7]. На рис. 3 показан характер повышения давления в тормозных цилиндрах вагонов грузового поезда.

В программном комплексе определение давления в тормозном цилиндре каждой единицы подвижного состава определялось путем решения следующих уравнений:

$$\begin{cases} t_{\text{нп}} = 0,333088 \cdot n, \\ a_1 = 2,77 \cdot 10^{-10} \cdot n^4 - 1,19 \cdot 10^{-7} \cdot n^3 + 1,84 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 - 1,36 \cdot 10^{-3} \cdot n + 0,0572, \\ a_0 = 4,27 \cdot 10^{-10} \cdot n^4 - 2,91 \cdot 10^{-7} \cdot n^3 + 7,87 \cdot 10^{-5} \cdot n^2 - 0,0103 \cdot n + 0,0264, \end{cases} \quad (10)$$

если $t \geq t_{\text{нп}}$, то $p_{\text{тц}} = p_{\text{тц}}^y$;

$$\text{если } t < t_{\text{нп}}, \text{ то } p_{\text{тц}} = \frac{p_{\text{тц}}^y \cdot (a_1 \cdot t - a_0)}{0,406};$$

где $t_{\text{нп}}$ — время наполнения тормозного цилиндра, с;

n — номер единицы подвижного состава в поезде;

t — время, прошедшее с начала торможения, с;

a_0, a_1 — постоянные коэффициенты;

$p_{\text{т}}$ — давление в тормозном цилиндре, МПа.

В случае использования подталкивающего локомотива принимается наименьший номер единицы подвижного состава по отношению к любому из локомотивов.

Удельная тормозная сила поезда определялась как сумма тормозных сил всех единиц подвижного состава, отнесенная к его массе:

$$B_{\text{т}} = \frac{1000 \cdot \sum (K_{\text{д}} \cdot \varphi_{\text{кд}})}{m_{\text{п}}}, \quad (11)$$

где $\varphi_{\text{кд}}$ — действительный коэффициент трения тормозных колодок;

$m_{\text{п}}$ — масса поезда, кг.

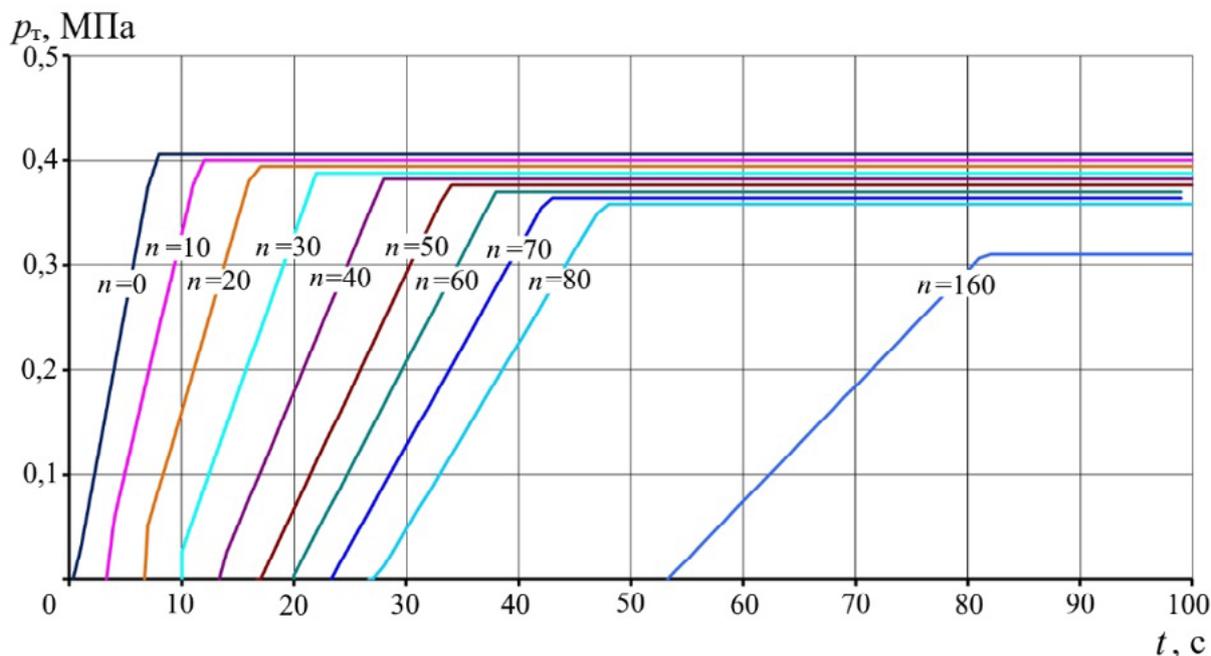


Рис. 3. Повышение давления в тормозных цилиндрах вагонов грузового поезда

Кроме того, программный комплекс считает плавное снижение тормозной силы при отпуске тормозов. Характер и время отпуска может варьироваться в настройках программного комплекса.

Основное удельное сопротивление движению поезда определялось по следующей зависимости:

$$w_o = \frac{\sum (w'_{oi} \cdot m_{li}) + \sum (w''_{oj} \cdot m_{vj})}{m_{\Pi}}, \quad (12)$$

где w'_{oi} — основное удельное сопротивление движению i -го локомотива, кгс/т;
 m_{li} — масса i -го локомотива, т;
 w''_{oj} — основное удельное сопротивление движению j -го вагона, кгс/т;
 m_{vj} — масса j -го вагона, т.

Для локомотивов основное сопротивление движению в режиме тяги определяется выражением:

$$w'_{oi} = a_{li} + b_{li} \cdot v + c_{li} \cdot v^2, \quad (13)$$

где a_{li} , b_{li} , c_{li} — постоянные коэффициенты, используемые при определении основного сопротивления движению i -го локомотива.

Для основного сопротивления движению j -го вагона используются эмпирические зависимости вида:

$$w_{oi}'' = a_i + \frac{b_i + c_i \cdot v + d_i \cdot v^2}{m_{oi}}, \quad (14)$$

где a_i, b_i, c_i, d_i — постоянные коэффициенты для определения основного сопротивления движению i -го вагона;

m_{oi} — масса, приходящаяся на одну ось i -го вагона, т.

Программный комплекс позволяет не только использовать стандартные значения постоянных коэффициентов, входящих в выражения (13) и (14), в зависимости от типа подвижного состава, но и вводить собственные значения данных коэффициентов. При этом для каждой единицы подвижного состава коэффициенты могут задаваться отдельно.

При определении сопротивления движению от уклона программный комплекс позволяет реализовать на выбор один из двух подходов:

- представление поезда в качестве материальной точки с сосредоточением его массы в середине поезда;
- представление поезда в качестве неравномерно распределенной по его длине массы.

При рассмотрении поезда в качестве неравномерно распределенной по его длине массы использовался следующий подход (рис. 4):

- весь рассматриваемый участок разбивается на N_s элементов с шагом, равным шагу выполнения тягового расчета Δs , и постоянным значением уклона на элементе i_j ;
- для каждой k -й единицы подвижного состава, входящей в рассматриваемый поезд, определяется, на сколько элементов n_k положение его центра масс отличается от положения головы поезда, с округлением величины n_k до целого числа в меньшую сторону:

$$n_k = \frac{\sum_{r=1}^{k-1} l_r + \frac{l_k}{2}}{\Delta s}, \quad (15)$$

где l — длина единицы подвижного состава по осям автосцепок, м;

- для каждого положения поезда j удельное сопротивление движению поезда от уклона w_i^j может быть определено по следующей зависимости:

$$w_i^j = \frac{g}{m_i} \cdot \sum_{k=1}^{N_v} (m_k \cdot i_{j-nk}), \quad (16)$$

где m_{Π} — масса поезда, т;

N_v — число единиц подвижного состава;

m_k — масса k -й единицы подвижного состава, т.

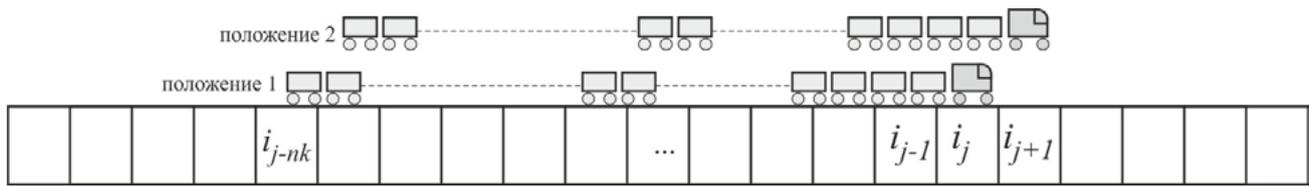


Рис. 4. Представление поезда в качестве неравномерно распределенной массы

При перемещении на один шаг $j + 1$ удельное сопротивление движению поезда от уклона будет равно:

$$w_i^{j+1} = \frac{g}{m_i} \cdot \sum_{k=1}^{N_v} (m_k \cdot i_{j+1-nk}). \quad (17)$$

При перемещении поезда на один шаг удельное сопротивление движению от уклона равно:

$$w_{i\ p}^j = \frac{w_i^j + w_i^{j+1}}{2} = \frac{g}{m_i} \cdot \sum_{k=1}^{N_v} \left[m_k \cdot \frac{(i_{j-nk} + i_{j+1-nk})}{2} \right]. \quad (18)$$

Аналогичный подход использовался при расчете сопротивления движению в кривых участках пути.

Принципы формирования энергооптимальной траектории движения

При формировании энергооптимальной траектории движения поезда использовались известные практические выводы из теории энергооптимальных систем, применимые к траектории движения поезда [8–11]. Решение задачи оптимизации режимов ведения поезда сводится к поиску управления $u(t)$ (позиция контроллера или тормозная позиция), доставляющего минимум функционалу:

$$B = \int_0^T G(u(t), v) dt \rightarrow \min, \quad (19)$$

где B — расход топлива (электроэнергии), кг (кВт · ч);

T — заданное время хода по участку, ч;

G — расход топлива (электроэнергии) за единицу времени, кг (кВт · ч);

v — скорость движения, км/ч.

Поиск энергооптимальной траектории движения поезда осуществлялся на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина, где использованы подходы, изложенные в [8, 11, 12], с некоторой их модификацией. Программный комплекс в

полной мере учитывает ограничения, накладываемые на фазовые координаты и управляющие воздействия. В соответствии с [8] для формирования энергоэффективной траектории движения выделяются следующие режимы ведения поезда.

В зависимости от величины функции $v(s)$ сформулирована последовательность оптимальных режимов управления, в которой выделяются пять диапазонов с различными оптимальными управляющими функциями:

- разгон с максимально возможной силой тяги;
- торможение с максимально возможной эффективностью;
- режим выбега;
- движение с постоянной скоростью стабилизации в режиме тяги;
- режим регулировочного торможения для недопущения превышения максимально допустимой скорости движения.

Режим разгона поезда осуществляется до достижения поездом средней технической скорости движения на заданном участке. Режим торможения с максимальной эффективностью применяется при подходе к местам снижения допустимой скорости движения поезда и остановок.

Наибольшие сложности при дискретном управлении локомотивом представляет реализация режима стабилизации скорости движения. В программном комплексе применен принцип опережающего воздействия на систему (рис. 5). При этом на каждом шаге расчета определялась скорость задания $v_{\text{зад}}$ по следующей зависимости:

$$v_{\text{зад}} = 0,06 \cdot \frac{s_{\text{уч}} - s_x}{T - t_x}, \quad (20)$$

где $s_{\text{уч}}$ и s_x — длина участка и пройденный путь, км;

T и t_x — заданное время хода по участку и время, затраченное на пройденный путь, мин.

После этого по зависимости (1) выполнялся расчет траектории движения поезда при текущей позиции контроллера машиниста на некоторое число шагов расчета, соответствующее длине участка прогнозирования $s_{\text{пр}}$.

Затем проверялось нахождение прогнозируемой скорости движения в диапазоне $v_{\text{зад}} \pm \Delta v$. Как видно из рис. 5, возможны три варианта развития событий:

- при заданной позиции контроллера прогнозируемая скорость движения остается в диапазоне $v_{\text{зад}} \pm \Delta v$ (траектория 0 — 2), в этом случае позиция не меняется;
- при заданной позиции контроллера прогнозируемая скорость движения становится выше заданного диапазона (траектория 0 — 1), в этом случае позиция контроллера на текущем шаге расчета уменьшается;

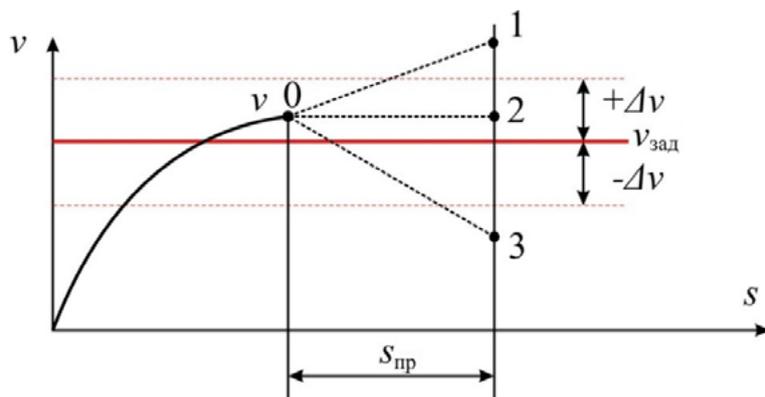


Рис. 5. Варианты изменения траектории движения поезда

– при заданной позиции контроллера прогнозируемая скорость движения становится ниже заданного диапазона (траектория 0 — 1), в этом случае позиция контроллера на текущем шаге расчета увеличивается.

При этом программа выдерживает время между набором и сбросом позиций, а также исключает возможность включения режима тяги до момента полного отпуска тормозов. Вариативность режимов управления достигается регулированием допустимого диапазона изменения скорости и длины участка прогнозирования. Оператор может сам назначить допустимый диапазон изменения скорости (нечувствительности) и длину участка прогнозирования и выполнить единственный вариант расчета. Диапазон нечувствительности при этом задается оператором в процентах от заданной скорости движения, а шаг прогнозирования в метрах.

Программный комплекс предлагает рассчитать 6, 15 или 30 вариантов ведения поезда путем задания различных значений диапазона нечувствительности Δv и шага прогнозирования $s_{пр}$. При реализации 30 вариантов ведения поезда диапазон нечувствительности может принимать значения 10, 20, 30, 40 и 50 % от $v_{зад}$, а шаг прогнозирования $s_{пр}$ составляет 100, 200, 300, 400, 500 и 1000 м. В результате вычислений оператор на основании информации о расходе топлива (энергоресурсов) и числе переключений позиций контроллера выбирает один из вариантов.

Включение режимов регулировочного торможения осуществляется только при достижении скорости движения поездом максимального значения. В этом случае осуществляется подбор режимов торможения поезда с отступом от места достижения максимальной скорости движения на заранее заданное расстояние.

На рис. 6 показаны варианты построения траектории движения при наличии местного ограничения допустимой скорости движения. Различные варианты траектории получаются путем варьирования фазовой траектории за счет изменения диапазона нечувствительности Δv и шага прогнозирования $s_{пр}$. При этом для различных управляющих воздействий на локомотив в виде смены позиций и регулировочного торможения во всех случаях обеспечено аккуратное соблюдение допускаемой скорости движения.

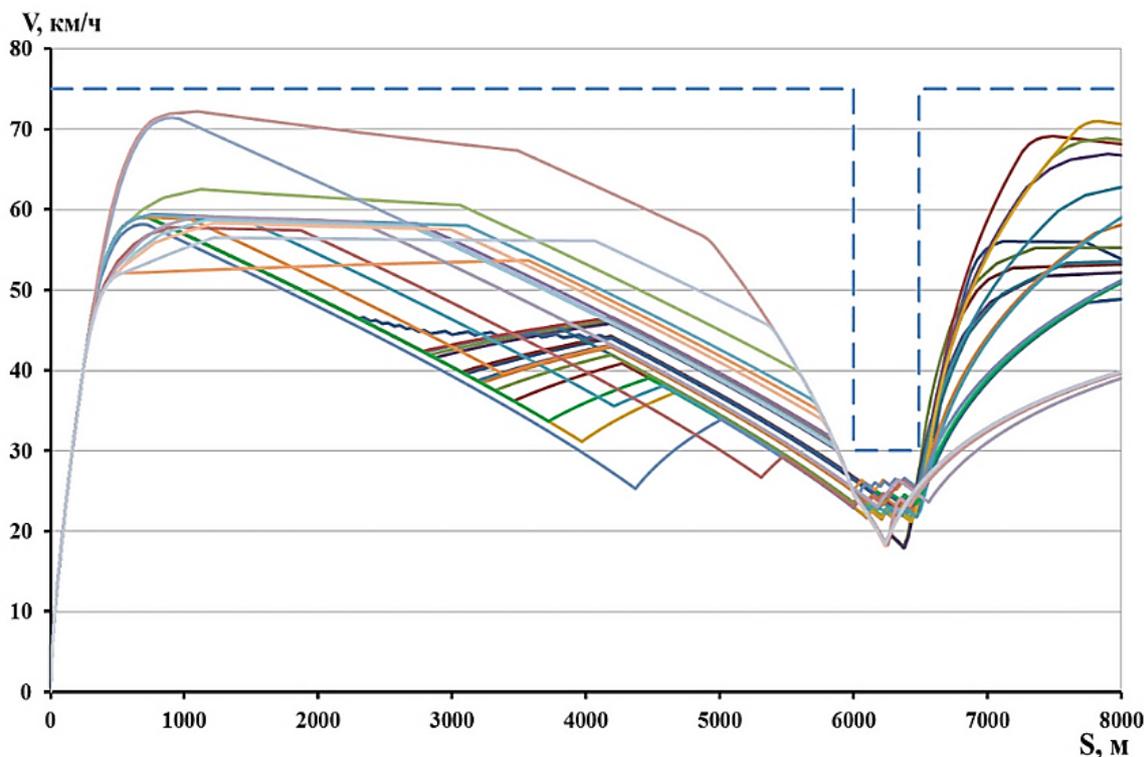


Рис. 6. Возможные траектории регулировочного торможения при наличии ограничения по допустимой скорости движения

При интенсивном движении с заданным числом пар поездов за сутки возможна дорожная ситуация, когда исследуемый поезд будет вступать на очередной блок-участок раньше нужного времени, из-за чего будет вынужден некоторое время двигаться на желтый сигнал светофора, т. е. при ограничении максимально допустимой скорости.

Задача выбора энергооптимального режима решается путем закладывания режима движения первого поезда по свободному участку в базу данных ограничения максимально допустимой скорости с последующим подбором с целью оптимизации расхода энергии времени отправления следующего поезда.

Такие же действия должны проводиться в случае интервального регулирования по технологии виртуальной сцепки.

При расчете энергооптимального режима ведения поездов по однопутному участку учитываются режимы ведения поездов в обоих направлениях [13, 14].

Тяговые расчеты для маневровой работы отличаются от тяговых расчетов для поездной работы наличием нескольких постоянных циклов выполняемой работы, частой сменой режима работы. Во время горочной работы при роспуске состава приходится решать тяговую задачу с переменной массой состава. Программа выполнения тягово-энергетических расчетов «Тяга — Прогноз» по энергооптимальным режимам была адаптирована для тягово-энергетических расчетов при выполнении маневровой работы «Тяга — Прогноз».

Сравнение результатов расчета с опытными данными

Верификация программы была выполнена при испытаниях газотурбовоза ГТ1h-002 в 2016 г. во время демонстрационной поездки при ведении поезда массой 9000 т на участке Сургут — Войновка Свердловской ж. д. протяженностью 1298 км с записью режима работы газотурбовоза.

Выполненный перед началом поездки расчет энергооптимального режима движения показал расход топлива 14 974,32 кг. В поездке, прошедшей с отклонениями от энергооптимального режима, фактический расход сжиженного природного газа составил 15 743 кг.

Проведенный затем тяговый расчет по режиму ведения поезда дал расход топлива за поездку 15 495,39 кг. Расхождение в определении расхода сжиженного природного газа составило 1,6 %, что говорит о высокой степени достоверности работы программного комплекса.

В случае ведения поезда по расчетному энергооптимальному режиму экономия топлива могла быть более 750 кг (более 3 %). Результат свидетельствует в пользу организации движения по энергооптимальным режимным картам.

Заключение

На программный комплекс для выполнения тягово-энергетических расчетов «Тяга — Прогноз» ведения локомотивами поездов различной составности по энергооптимальным режимам получено свидетельство о государственной регистрации программы [13]. Программа может работать на ПК на базе процессоров Intel Pentium и выше при операционных системах Microsoft Windows XP и выше. Объем программы — 2 Мб (без базы данных).

Правообладателем является АО «ВНИКТИ». База данных программного комплекса представляет самостоятельную ценность, так как содержит результаты многочисленных испытаний тягового подвижного состава, проведенных специалистами АО «ВНИКТИ». База данных постоянно пополняется результатами новых исследований.

Программа «Тяга — Прогноз» применялась и имеет перспективы дальнейшего применения для решения следующих задач:

- выбор типа локомотива существующих серий и перспективных моделей для обслуживания грузовых поездов на перспективных полигонах в соответствии с прогнозными объемами грузопотоков и схемами формирования грузовых поездов [14, 15];

- выбор силовой схемы промышленного тепловоза 2Т10Л при проведении его модернизации с учетом полигона эксплуатации и технологии производства работ;

- оценка критических масс поездов для новых локомотивов или новых полигонов эксплуатации;
- подготовка исходных данных для выполнения технико-экономического обоснования разработки новых локомотивов;
- обучение студентов по специальности «Подвижной состав железных дорог» в рамках дисциплины «Теория тяги поездов».

Библиографический список

1. Анисимов В. А. Система ЭРА: Назначение, состав и возможности / В. А. Анисимов, В. В. Анисимов; под ред. В. С. Шварцфельда // Проектирование развития региональной сети железных дорог: сб. науч. тр. — Хабаровск: ДВГУПС, 2016. — Вып. 4. — С. 127–141.
2. Анисимов В. А. Многоцелевые расчетно-аналитические комплексы ИСКРА и ЭРА — комплексное решение проектных и производственных задач / В. А. Анисимов, В. В. Анисимов // Транспортная инфраструктура сибирского региона: материалы четвертой всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Иркутск, 13–17 мая 2013 г.). — Иркутск: ИрГУПС, 2013. — Т. 1. — С. 540–547.
3. Программно-технологические комплексы Искра и ЭРА. — URL: <http://sites.google.com/site/isystemgdt> (дата обращения: 23.09.2022).
4. Интеллектуальные рельсовые системы. — URL: https://brailsys.com/MoveRW_0.htm (дата обращения: 23.09.2022).
5. Иноземцев В. Г. Тормоза железнодорожного подвижного состава / В. Г. Иноземцев. — М.: Транспорт, 1979. — 424 с.
6. Иноземцев В. Г. Развитие теории торможения поездов с учетом перспективных скоростей и весовых норм: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / В. Г. Иноземцев; Всесоюз. науч.-исслед. ин-т ж.-д. транспорта. — М., 1970. — 39 с.
7. Закерничная Н. В. Совершенствование методики расчета тормозных сил в грузовом поезде: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Н. В. Закерничная; Ом. гос. ун-т путей сообщ. — Омск, 2003. — 18 с.
8. Баранов Л. А. Повышение энергоэффективности управления движением метropоездов / Л. А. Баранов, В. М. Максимов // Мир транспорта. — 2016. — № 4. — С. 6–18.
9. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальный тяговый расчет движения поезда / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко // Вестник ВНИИЖТ. — 2013. — № 6. — С. 3–13.
10. Моисеев Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука, 1971. — 424 с.
11. Максимов В. М. Оптимальное управление при автоматическом ведении поезда метрополитена / В. М. Максимов // Сб. науч. трудов МИИТ. — М., 1971. — Вып. 388. — С. 82–92.
12. Головичер Я. М. Аналитический метод расчета оптимального управления движением поезда / Головичер Я. М. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика 3. — Издание Новочеркасского политехнического института. — 1986. — С. 58–66.

13. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022616927 Российская Федерация. Программа выполнения тягово-энергетических расчетов «Тяга — Прогноз» ведения локомотивами поездов различной составности по энергооптимальным режимам / В. П. Гриневич, Д. Н. Курилкин, Т. С. Авсиевич и др. — № 2022616055; заявл. 06.04.2022; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 4.

14. Гриневич В. П. Об особенностях эксплуатационной модели работы тепловоза на Восточном полигоне / В. П. Гриневич, Г. Ф. Кашников, В. Н. Петров и др. // Вестник ВНИКТИ. — Коломна, 2018. — Вып. 101. — С. 6–14.

15. Гриневич В. П. Оценка эксплуатационных качеств выпускаемых и перспективных автономных локомотивов для тягового обеспечения восточного полигона / В. П. Гриневич, Ю. И. Клименко, Г. Ф. Кашников и др. // Вестник ВНИКТИ. — Коломна, 2018. — Вып. 101. — С. 15–21.

Дата поступления: 05.10.2022

Решение о публикации: 06.11.2022

Контактная информация:

ГРИНЕВИЧ Владимир Петрович — эксперт I категории; grinevich-vp@vnikti.com

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; kurilkin@pgups.ru

АВСИЕВИЧ Татьяна Сергеевна — инженер I категории; avsievich-ts@vnikti.com

Using “Traction — Forecast” Software Package to Search for Power-Optimal Modes for to Drive a Train

V. P. Grinevich¹, D. N. Kurilkin², T. S. Avsiyevich¹

¹Scientific-Research and Constructive-Technology Institute of Rolling Stock (JSC “VNIKTI”), Russian Federation, 140402, Kolomna, Oktyabrskoy Revolyutsii str., 410

²Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 190031, St. Petersburg, Moskovsky pr., 9

For citation: Grinevich V. P., Kurilkin D. N., Avsiyevich T. S. Using “Traction — Forecast” Software Package to Search for Power-Optimal Modes for to Drive a Train. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 4, pp. 131–149. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149

Summary

Purpose: The article provides the description of “Traction — Forecast” Software Package to perform traction-power calculations with manual and automatic forming of driving modes. Applied at present software packages possess a number of drawbacks not allowing automating the process of traction-power calculation performance at researches and testing a new and existing rolling stock. The task of search for power-optimal train driving modes under various operation conditions is also relevant. This problem solution is in the development and testing “Traction — Forecast” Software Package. **Methods:** Numerical solving train motion differential equation was held by travelled distances with successive approximation usage. Preliminary calculation of motion possible trajectories with the purpose to search for power-efficient train driving modes was pursued. Transient processes in power device and brake system of a train were taken into account. The resistance to train motion from

longitudinal outline and profile of a track was being defined given per car distribution of the units of traction rolling stock as well as in the case of per car starting of a train. Calculation for pass-through for trains was made taking into account shunting work peculiarities. **Results:** As the comparison of the results of traction-power calculations and trial travels has shown, the accuracy of traction calculation accomplishment is of about 1,5 %. Proposed by the program power-efficient modes for driving a train makes it possible to reduce power-resource expenditure on more than 3 %. **Practical importance:** The use of “Traction — Forecast” programming complex would allow to improve traction calculation accuracy for both, current and newly designed rolling stock. The flexibility of forming traction and braking characteristics as well as available options for to set resistance forces to motion allows estimating made decisions’ efficiency in terms of power-efficiency on the stage of rolling stock design. Application of power-efficient modes of train driving, formed by the software complex, provides for the cut of power-resource expenditures for train traction.

Keywords: Software package, traction calculations, optimal driving, traction force, resistance to motion, braking forces.

References

1. Anisimov V. A., Anisimov V. V. Sistema ERA: naznacheniyе, sostav i vozmozhnosti [ERA system: purpose, composition and capabilities]. *Proyektirovaniye razvitiya regional'noy seti zheleznnykh dorog* [Development design of a regional railway network]. 2016, I. 4, pp. 127–141. (In Russian)
2. Anisimov V. A., Anisimov V. V. Mnogotselovyye raschetno-analiticheskiye komplekсы ISKRA i ERA — kompleksnoye resheniye proyektnykh i proizvodstvennykh zadach. Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona [Multipurpose calculation and analytical packages ISKRA and ERA — a comprehensive solution of design and production problems. Transport infrastructure of Siberian region]. *Transportnaya infrastruktura sibirskogo regiona: materialy chetvertoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of IVAll-Russian scientific-practical conference with international participation]. Irkutsk, IrGUPS, 2013, V. 1, pp. 540–547. (In Russian)
3. *Programmno-tekhnologicheskie komplekсы Iskra i ERA* [Software-technological packages Iskra and Era]. Available at: <http://sites.google.com/site/isystemgdt/> (accessed: September 23, 2022). (In Russian)
4. *Intellektual'nye rel'sovye sistemy* [Intelligent rail systems]. Available at: https://brailsys.com/MoveRW_0.htm (accessed: September 23, 2022). (In Russian)
5. Inozemtsev V. G. *Tormoza zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava* [Brakes of railway rolling stock]. Moscow: Transport Publ., 1979, 424 p. (In Russian)
6. Inozemtsev V. G. *Razvitiye teorii tormozheniya poyezdov s uchetom perspektivnykh skorostey i vesovykh norm* [Development of train braking theory considering perspective speeds and tonnage rating]. Moscow: Vsesoyuz. nauch.-issled. in-t zh.-d. transporta Publ., 1970, 39 p. (In Russian)
7. Zakernichnaya N. V. *Sovershenstvovaniye metodiki rascheta tormoznykh sil v gruzovom poyezde* [Improving the method to calculate braking forces for a freight train]. Omsk: Om. gos. un-t putey soobshch Publ., 2003, 18 p.

8. Baranov L. A., Maksimov V. M. Povysheniye energoeffektivnosti upravleniya dvizheniyem metropoyezdov [Improving the energy efficiency of underground train traffic control]. *Mir transporta* [World of Transport]. 2016, I. 4, pp. 6–18. (In Russian)
9. Muginshtein L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. Energooptimal'nyy tyagovyy raschet dvizheniya poyezda [Energy-optimal traction calculation of train movement]. *Vestnik VNIIZHT* [Bulletin of VNIIZhT]. 2013, I. 6, pp. 3–13. (In Russian)
10. Moiseyev N. N. *Chislennyye metody v teorii optimal'nykh sistem* [Numerical methods in the theory of optimal systems]. Moscow: Nauka Publ., 1971, 424 p. (In Russian)
11. Maksimov V. M. Optimal'noye upravleniye pri avtomaticheskoy vedenii poyezda metropolitena [Optimal control of automatic underground train operation]. *Sb. nauch. trud. MIIT* [Collection of research papers of RTU (MIIT)]. 1971, I. 388, pp. 82–92. (In Russian)
12. Golovicher Ya. M. Analiticheskiy metod rascheta optimal'nogo upravleniya dvizheniyem poyezda [Analytical method to calculate an optimal train operation control]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [News of higher educational institutions. Electromechanics]. 1986, I. 3, pp. 58–66. (In Russian)
13. Grinevich V. P., Kurilkin D. N., Avsievich T. S. *Programma vypolneniya tyagovo-energeticheskikh raschetov "Tyaga — Prognoz" vedeniya lokomotivami poezdov razlichnoy sostavnosti po energooptimal'nykh rezhimam* [The program for performing traction and energy calculations "Traction — Forecast" for the maintenance of trains of various composition by locomotives according to energy-optimal modes]. *Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM*, no. 2022616927, 2022. (In Russian)
14. Grinevich V. P., Kashnikov G. F., Petrov V. N. Ob osobennostyakh ekspluatatsionnoy modeli raboty teplovoza na Vostochnom poligone [On the peculiarities of the operating model of the diesel locomotive operation at the Eastern operating domain]. *Vestnik VNIKTI* [Bulletin of VNIKTI]. 2018, I. 101, pp. 6–14. (In Russian)
15. Grinevich V. P., Klimenko Yu. I., Kashnikov G. F. Otsenka ekspluatatsionnykh kachestv vypuskayemykh i perspektivnykh avtonomnykh lokomotivov dlya tyagovogo obespecheniya vostochnogo poligona [Estimation of the performance of manufactured and prospective autonomous locomotives for traction support of the Eastern operating domain]. *Vestnik VNIKTI* [Bulletin of VNIKTI]. 2018, I. 101, pp. 15–21. (In Russian)

Received: October 05, 2022

Accepted: November 06, 2022

Author's information:

Vladimir P. GRINEVICH — 1st Category Expert; grinevich-vp@vnikti.com

Dmitry N. KURILKIN — PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Locomotives and Locomotive Facilities; kurilkin@pgups.ru

Tatyana S. AVSIYEVICH — 1st Category Engineer; avsievich-ts@vnikti.com