

УДК 656.222.4

О. А. ТЕРЕЩЕНКО, Ю. С. СИДОРОВИЧ, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ

Приведен анализ состояния проблемы оценки энергоэффективности графика движения поездов и обзор соответствующих функциональных возможностей автоматизированных систем разработки ГДП. Установлено, что они не имеют широкого инструментария, необходимого специалисту для комплексного решения указанных задач. Представлен способ устранения данного недостатка за счет применения разработанной методики оценки энергоэффективности ГДП. Она основана на систематизации параметров, влияющих на затраты топлива и электрической энергии при организации движения поездов. Произведено нормирование расхода энергетических ресурсов методом тяговых расчетов для различных условий пропуска поездов по участкам Белорусской железной дороги. Представленную методику предлагается использовать в качестве основы алгоритмов, расширяющих возможности существующих систем разработки ГДП.

Эффективность перевозок в значительной мере определяется разработкой и внедрением энергоэффективных технических систем и технологических решений. График движения поездов, как система технологических нормативов, позволяет разрабатывать энергоэффективные решения пропуска поездов на участках железнодорожной инфраструктуры.

На Российских железных дорогах в настоящее время ведется активная работа по внедрению автоматизированного программного комплекса «Эльбрус» (АПК «Эльбрус»). Система осуществляет автоматизированное построение прогнозных энергосберегающих графиков движения поездов с учетом актуальных условий пропуска и поездной обстановки. На основании данных из системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ» и данных нормативного графика движения поездов осуществляется построение вариантного графика в системе АПК «Эльбрус». Также выполняется энергооптимизация перегонных времен хода движения грузовых поездов. При этом система не обладает широким инструментарием, необходимым специалисту при разработке и комплексной оценке нормативных графиков движения поездов.

Основным программным средством, используемым для разработки нормативных графиков движения поездов на Белорусской железной дороге, является автоматизированная система «Графист». В настоящее время она позволяет осуществлять: автоматизированную разработку и корректировку графика движения поездов (ГДП), расчет показателей и формирование выходных форм для ГДП. Однако система не имеет модуля оценки энергоэффективности разработанных ГДП.

Таким образом, имеются предпосылки для разработки методики оценки энергоэффективности графика движения поездов, обеспечивающий устранение указанных недостатков и позволяющий на ее основе разрабатывать технологические и информационные решения. Достижение обозначенной цели предлагается осуществить за счет установления источников энергоэффективности ГДП и выработки методических подходов к оценке уровня их практической реализации.

Источниками энергоэффективности для графика движения поездов являются:

- сокращение общего времени стоянок поездов под операциями скрещения и обгона, уменьшение количества технических стоянок на участке и, как следствие, снижение числа разгонов и замедлений поездов;
- изменение используемых отдельных пунктов для

технических стоянок, обгонов и скрещений поездов с целью сокращения энергозатрат, связанных с разгоном и движением поездов, за счет благоприятного профиля пути;

- оптимизация режимов ведения поездов;
- уменьшение скорости движения поездов на отдельных перегонах (между заложенными в графике стоянками поездов) без увеличения общего времени хода поезда по участку;
- максимальное использование силы тяги локомотива за счет оптимизации тягового обеспечения поезда и его массы;
- организация движения поездов с оптимальным использованием рекуперативного торможения.

Энергоэффективность графика движения поездов может быть оценена по следующим направлениям:

- энергоэффективность разработанного ГДП в сравнении с другим (эталонным или разработанным ранее) ГДП. Способ применим в случаях одинакового числа поездов всех категорий (только при изменении условий пропуска поездов);
- энергоэффективность в рамках разработанного ГДП для выделенной «нитки» или фрагмента графика. Способ применим при сравнении условий пропуска поезда по выделенной «нитке» (изменение отдельных пунктов, числа и продолжительности стоянок, скорости движения и т.п.);
- удельная энергоэффективность, приходящаяся в среднем на одну «нитку» разработанного ГДП, в сравнении с другим (эталонным или разработанным ранее) ГДП;
- удельная энергоэффективность, приходящаяся в среднем на одну «нитку» разработанного ГДП для поездов выделенной категории, в сравнении с другим (эталонным или разработанным ранее) ГДП.

Таким образом, энергоэффективность для случаев общего сравнения графиков движения поездов или отдельных категорий поездов может быть выражена (при одинаковом количестве поездов) следующим образом:

$$\Delta \Theta = \sum_{i=1}^{N_2} A_{ni} e_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} + \sum_{j=1}^{N_1} E_n e_{\text{кВт}} - \sum_{i=1}^{N_2} A_{pi} e_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} - \sum_{j=1}^{N_1} E_p e_{\text{кВт}}, \quad (1)$$

где A_{ni} , A_{pi} – расход электрической энергии по i -й «нитке», соответственно, нормативного (эталонного, предыдущего) и разработанного графика движения поездов, установленный методом тяговых расчетов, кВт·ч;

E_n, E_p – расход (условного) топлива по j -й «нитке», соответственно, нормативного (эталонного, предыдущего) и разработанного графиков движения поездов, установленный методом тяговых расчетов, кг; $e_{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$ – стоимость 1 кВт·ч электрической энергии, руб.; $e_{\text{кг}}$ – стоимость 1 кг (условного) топлива, руб.; N_3 – количество «ниток» графика, обслуживаемых электровозами; N_T – количество «ниток» графика, обслуживаемых тепловозами.

Расчетная энергоэффективность при сравнении удельных показателей (на одну «нитку» графика или на одну «нитку» выделенной категории поездов)

$$\Delta \mathcal{E}_y = \frac{\sum_{i=1}^{N_3^{1\text{вар}}} A_{\text{нр}} e_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} + \sum_{j=1}^{N_T^{1\text{вар}}} E_n e_{\text{кг}}}{N_3^{1\text{вар}} + N_T^{1\text{вар}}} - \frac{\sum_{i=1}^{N_3^{2\text{вар}}} A_{\text{нр}} e_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} + \sum_{j=1}^{N_T^{2\text{вар}}} E_n e_{\text{кг}}}{N_3^{2\text{вар}} + N_T^{2\text{вар}}}, \quad (2)$$

где $N_3^{1\text{вар}}, N_T^{1\text{вар}}, N_3^{2\text{вар}}, N_T^{2\text{вар}}$ – соответственно, количество «ниток», обслуживаемых электровозами и тепловозами по вариантам.

С целью оптимизации вычислений при автоматизированном определении энергоэффективности ГДП должны предварительно сравниваться. Для «ниток», проложенных по одинаковому расписанию, расчеты не должны проводиться.

Так как метод тяговых расчетов требует при большом числе «ниток» поездов значительных вычислительных ресурсов и, как следствие, значительных затрат времени, то для приближенной оценки энергоэффективности предлагается воспользоваться выражениями:

– для одной «нитки» графика при тепловозной тяге –

$$\mathcal{E}_m^1 = e_{\text{кг}} \left(\Delta t_{\text{ст}}^T a_{\text{ст}}^T + \Delta n_p^T a_p^T + \Delta t_x^T a_x^T \right); \quad (3)$$

– для одной «нитки» графика при электровозной тяге –

$$\mathcal{E}_3^1 = e_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \left(\Delta t_{\text{ст}}^3 a_{\text{ст}}^3 + \Delta n_p^3 a_p^3 + \Delta t_x^3 a_x^3 \right); \quad (4)$$

– в среднем на одну «нитку» графика –

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{N_3 e_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \left(\Delta t_{\text{ст}}^3 a_{\text{ст}}^3 + \Delta n_p^3 a_p^3 + \Delta t_x^3 a_x^3 \right) + N_T e_{\text{кг}} \left(\Delta t_{\text{ст}}^T a_{\text{ст}}^T + \Delta n_p^T a_p^T + \Delta t_x^T a_x^T \right)}{N_3 + N_T}, \quad (5)$$

где $\Delta t_{\text{ст}}^3, \Delta t_{\text{ст}}^T$ – изменение средней продолжительности стоянки поезда, приходящееся на одну «нитку» графика, для электровоза и тепловоза, мин; $a_{\text{ст}}^3, a_{\text{ст}}^T$ – средний расход, соответственно, электрической энергии электровозом (кВт·ч) и топлива тепловозом (кг) на холостом ходу в течение 1 мин; $\Delta n_p^3, \Delta n_p^T$ – изменение среднего числа стоянок поездов, приходящееся на одну «нитку» графика, для электровоза и тепловоза, мин; a_p^3, a_p^T – средний дополнительный расход, соответственно, элек-

трической энергии электровозом (кВт·ч) и топлива тепловозом (кг), приходящийся на один разгон, с учетом сокращения расхода электрической энергии и топлива, приходящегося на одно замедление; $\Delta t_x^3, \Delta t_x^T$ – среднее увеличение времени хода (без учета стоянок), приходящееся на одну «нитку» графика, для электровоза и тепловоза, мин; a_x^3, a_x^T – среднее сокращение расхода электрической энергии электровозом (кВт·ч) и топлива тепловозом (кг), связанное с уменьшением перегонного времени хода на 1 мин.

При использовании замены $\gamma_{3(T)} = \frac{N_{3(T)}}{N_3 + N_T}$ выражение принимает вид

$$\mathcal{E} = \gamma_3 N_3 e_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} \left(\Delta t_{\text{ст}}^3 a_{\text{ст}}^3 + \Delta n_p^3 a_p^3 + \Delta t_x^3 a_x^3 \right) + \gamma_T N_T e_{\text{кг}} \left(\Delta t_{\text{ст}}^T a_{\text{ст}}^T + \Delta n_p^T a_p^T + \Delta t_x^T a_x^T \right). \quad (6)$$

Средние значения расхода электрической энергии и топлива для показателей, входящих в формулы (3) и (4), предлагается нормировать методом тяговых расчетов для основных типов локомотивов эксплуатируемого парка Белорусской железной дороги с усреднением значений пропорционально долям этих локомотивов в эксплуатируемом парке.

В результате проведенных исследований для каждого типа локомотива рассчитаны значения технической скорости, времени хода и расхода электроэнергии (топлива) по шести различным участкам Белорусской железной дороги в зависимости от максимально разрешенного значения скорости следования по конкретному участку. В качестве исследуемого объекта был принят состав поезда массой 2859 т и длиной 50 условных вагонов для тепловозной тяги, 3524 т и 61 условный вагон при электровозной тяге. Принятые значения являются средними для полигона Белорусской железной дороги за 2016 год.

Также установлены математические зависимости удельного расхода энергетических ресурсов от технической скорости движения поезда по участку. Графики этих зависимостей приведены на рисунках 1–3.

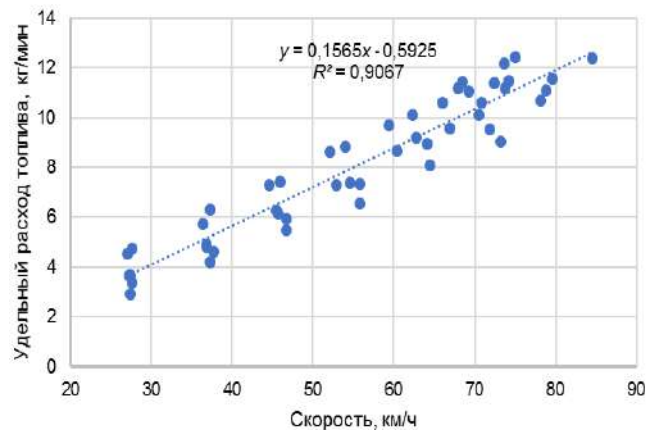


Рисунок 1 – Зависимость удельного расхода топлива тепловозом 2ТЭ10 от скорости

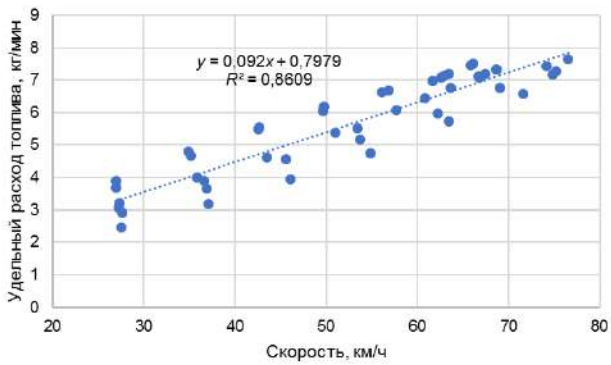


Рисунок 2 – Зависимость удельного расхода топлива тепловозом 2М62 от скорости

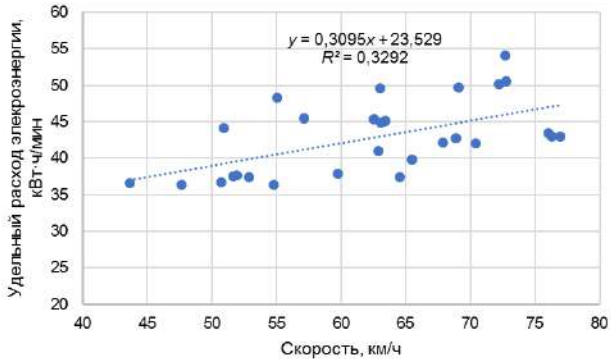


Рисунок 3 – Зависимость удельного расхода электроэнергии электровозом ВЛ80 от скорости

Как следует из представленных графиков, зависимости имеют линейный характер. Удельный расход энергетических ресурсов возрастает при росте скорости движения поезда.

На полигоне Белорусской железной дороги на сегодняшний день эксплуатируются 115 тепловозов 2ТЭ10, 39 тепловозов 2М62 и 52 электровоза ВЛ80. В долевом соотношении 75 % парка магистральных тепловозов составляют 2ТЭ10 и 25 % – 2М62. При усреднении полученных математических зависимостей различных серий тепловозов для всего парка тепловозов Белорусской железной дороги получается уравнение

$$y = 0,140375v_T - 0,2449, \quad (7)$$

где y – удельный расход топлива тепловозом, кг/мин; v_T – техническая скорость движения поезда на участке.

Полученные методом тяговых расчетов средние значения расхода энергетических ресурсов на 1 разгон-замедление каждой серии локомотивов представлены в таблице 1.

Получено 12.11.2017

O. A. Tereshchenko, Yu. S. Sidorovich. Methodology for estimation of traffic movement schedule energy efficiency.

The article provides an analysis of the state of the problem of energy efficiency assessment of the train schedule and a review of the corresponding functional capabilities of the automated systems for the development of the TMS. It is established that they do not have a wide toolkit, which is necessary for a specialist to solve these problems in a comprehensive manner. The article presents a method of eliminating this shortcoming by applying the developed methodology for assessing the energy efficiency of the TMS. It is based on the systematization of parameters that affect fuel and electricity costs in the organization of train traffic. The normalization of the consumption of energy resources by the method of traction calculations for various conditions of passing trains along sections of the Belorussian railway was made. The methodology is proposed to be used as a basis for algorithms that extend the capabilities of existing systems of TMS development.

Таблица 1 – Среднее значение расхода энергетических ресурсов на 1 разгон-замедление

Тип локомотива	Средний расход энергетических ресурсов на 1 разгон-замедление, кг (кВт·ч)
ВЛ80	144,82
2ТЭ10	27,49
2М62	25,07

Итоговые значения (выражения) для расчетных параметров методики приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения итоговых расчетных величин

Наименование величины	Размерность	Значение величины
$e_{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$	руб.	0,2001
$e_{\text{кг}}$	руб.	1,0943
$a_{\text{ст}}^T$	кг/мин	0,78
a_p^T	кг	27,49
a_x^T	кг/мин	$0,140375v_T - 0,2449$
$a_{\text{ст}}^3$	кВт·ч/мин	5,50
a_p^3	кВт·ч	144,82
a_x^3	кВт·ч/мин	$0,3095v_T + 23,529$

Представленные методические подходы, полученные аналитические зависимости и величины предлагается положить в основу автоматизированной системы оценки энергоэффективности графика движения поездов на Белорусской железной дороге.

Список литературы

- 1 Кузнецов, В. Г. Комплексный подход к информационным технологиям оперативного управления поездной работой на Белорусской железной дороге / В. Г. Кузнецов, А. А. Ерофеев, М. В. Федорцов // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ – 2013) : Вторая науч.-техн. конф., 21–22 окт. 2013, г. Москва. – М. : ОАО «НИИАС», 2013. – С. 80–82.
- 2 Миронов, А. Ю. Перевозочному процессу – инновационные технологии / А. Ю. Миронов // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 5. – С. 26–30.
- 3 Шапкин, П. Н. Твердый подекадный график движения поездов как одно из решений проблемы адаптации графика к колебаниям вагонопотоков / П. Н. Шапкин, Е. М. Кожанов // Вестник ВНИИЖТ. – 2007. – № 3. – С. 30–33.
- 4 Шаронов, Е. А. Организация грузового движения по расписанию / Е. А. Шаронов // Железнодорожный транспорт. – 2010. – № 10. – С. 74–77.
- 5 Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / П. С. Грунтов [и др.]. – М. : Транспорт, 1994. – 543 с.