

Оптимизация кривой движения поезда для минимизации энергопотребления на базе ж. д. Узбекистана

А. Т. Лесов, В. О. Иващенко

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

Для цитирования: Лесов А. Т., Иващенко В. О. Оптимизация кривой движения поезда для минимизации энергопотребления на базе ж. д. Узбекистана // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 1. — С. 68–79. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-68-79

Аннотация

Цель: Анализ существующих методов для поиска оптимальных режимов ведения электровозов на участке Пап — Коканд — Андижан, входящем в полигон Узбекских железных дорог, чтобы свести к минимуму электрическую энергию, используемую для тяги с учетом таких ограничений, как время хода по перегону, максимально допустимые скорости движения, доступная тяговая мощность и т. д. **Методы:** Методика выбора кривой движения поезда предусматривает три подхода к решению задачи и учитывает две задачи решения уравнения движения поезда. **Результаты:** По сравнению с данными, полученными из службы «Управления по эксплуатации локомотивов» (УЭЛ) Узбекских железных дорог «Ўзбекистон темир йўллари» («ЎТЙ»), результаты данной статьи показывают, что энергоэффективность составляет от 4 до 30 %. Полученный в результате режим ведения качественно отличается от применяемых сейчас на участке Пап — Коканд — Андижан режимных карт для энергооптимального ведения поездами. **Практическая значимость:** Описанная методика расчетов с применением трех подходов к решению задачи позволяет значительно упростить и ускорить проведение тяговых расчетов, обеспечить высокую точность результатов и представить их в удобной и наглядной форме.

Ключевые слова: Оптимизация, график движения поезда, сопротивления движению поезда, торможение, энергоэффективность.

Оптимальное управление поездами уже много лет является активной темой исследований. Общая цель — управлять поездом таким образом, чтобы свести к минимуму общее энергопотребление, с учетом ограничений по времени и физических ограничений, налагаемых поездом и условиями эксплуатации. В условиях растущей конкуренции на рынке перевозок интерес к энергоэффективности среди железнодорожных операторов в последние годы стал предметом повышенного интереса как для модернизации существующих транспортных средств, так и для приобретения новых [1]. И в этом плане Узбекистан тоже не исключение. В стране последние годы уделяется больше внимания проблеме поиска энергооптимальных режимов ведения [2, 3], и одним из направлений стратегии является развитие инфраструктуры и обновление подвижного состава железнодорожного транспорта, повышение эффективности использования материальных и нематериальных ресурсов.

Описание модели

Как и в других работах, например [4], мы принимаем поезд как материальную точку. Пусть $f(t) \geq 0$ — удельная сила тяги, приложенная в момент t для ускорения поезда, а $b(t) \geq 0$ — удельная тормозная сила в момент t для его замедления. Динамика поезда описывается следующими уравнениями состояния:

$$\frac{ds(t)}{dt} = v(t), \quad s(0) = 0,$$

$$m(1 + \gamma) \frac{dv(t)}{dt} = f(t) - b(t) - w(s(t), v(t)), \quad v(0) = 0,$$

где $s(t)$ — обозначает координату поезда;

$v(t)$ — скорость;

$w(s(t), v(t))$ — удельное сопротивление движению поезда, определяемое как:

$$w(s, v) = w_0 + w_d,$$

здесь w_0 — удельное основное сопротивление движению;

w_d — удельное дополнительное сопротивление движению.

Задача состоит в том, чтобы найти функцию $v(s)$, т. е. кривую движения, которая минимизирует энергию, потребляемую поездом на тягу, обеспечивая при этом выполнение заданного времени хода T_x . Это дает следующую оптимальную формулировку управления:

$$\min_{f(t), b(t), v(t) \forall t \in [0, T_x]} \int_0^{T_x} f(t) dt$$

$$s(T_x) = S, \quad f(t) \cdot b(t) = 0, \quad v(t) \leq v_{\text{доп}},$$

$$f(t), b(t), v(t) \geq 0,$$

$$f(t) \leq F_{\text{max}}, \quad b(t) \leq B_{\text{max}}$$

$$f = \frac{F}{P + Q}; \quad b = \frac{B}{P + Q},$$

где P — вес локомотива или вагонов электропоезда;

Q — вес состава или вес пассажиров электропоезда.

Для точного решения уравнения движения необходимо адаптировать и связывать между собой формулами ускоряющие и замедляющие силы, пройденный путь, время хода и скорость движения. С помощью функций аппроксимации и интерполяции можно находить зависимость между удельными силами и скоростью движения. Для аппроксимации кривой удельной силы тяги разбиваем ее на несколько участков и для каждого из них определяем необходимые коэффициенты аппроксимации [5].

Уравнение движения поезда можно записать в виде системы [6]:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= v, \\ \frac{dv}{dt} &= \xi \cdot [f - b - w_o - w_d]. \end{aligned} \quad (1)$$

Используя метод Эйлера для уравнения (1), получим:

$$\frac{dv}{ds} = \frac{\xi(f - w - b)}{v},$$

с учетом начальных и граничных условий:

$$v_H = 0, v_K = 0, t_H = 0, t_K = T_x,$$

в которой $\xi = \frac{\varepsilon}{1 + \gamma}$, $(1 + \gamma)$ — коэффициент инерции вращающихся частей поезда, ε — коэффициент, учитывающий размерность переменных, заданных в несоответствующих СИ единицах.

На произвольном шаге расчета время, пройденный путь и скорость:

$$\begin{bmatrix} t_j \\ S_j \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{j-1} + \frac{\Delta V}{\xi(f - w - b)} \\ S_{j-1} + 0,5(V_j + V_{j-1}) \frac{\Delta V}{\xi(f - w - b)} \\ V_{j-1} + \Delta V \end{bmatrix}$$

и при этом:

$$f_j \cdot b_j = 0,$$

$$v_j \leq v_{\text{доп}},$$

$$f_j, b_j, v_j \geq 0,$$

в которых V_j, V_{j-1} — скорости поезда соответственно в конце j -го и $j - 1$ -го шагов интегрирования; t_j, t_{j-1} — время хода поезда соответственно к концу j -го и $j - 1$ -го шагов интегрирования; S_j, S_{j-1} — путь, пройденный поездом соответственно к концу j -го и $j - 1$ -го шагов интегрирования; ΔV — шаг интегрирования по скорости.

Основываясь на анализе разных подходов, приведенных в литературе [7–10], можно выделить четыре оптимальные последовательности сценария управления на оптимальной кривой движения: разгон с максимальным ускорением, движение с установившейся скоростью, выбег и торможение с максимальным замедлением перед остановкой. Оптимизация распределения времени хода по перегону между этими сценариями управления лежит на основе всех наших подходов.

1 подход

Для прихода поезда в фиксированное время на заданную станцию заранее определяем среднюю скорость по перегону:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{пер}}}{T_x}. \quad (2)$$

Зная длину $S_{\text{пер}} = 45$ км и графиковое время хода $T_x = 54$ мин перегона Пап — Коканд, определяем среднюю скорость по перегону:

$$v_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{пер}}}{T_x} = \frac{45}{54} \cdot 60 = 50 \text{ км/ч.}$$

Чтобы знать опережение или опоздание от планового графика движения, определяем зависимость для графикового времени согласно (2):

$$t_{\text{гр}}(s) = \frac{1}{v_{\text{ср}}} \cdot s.$$

Движения начинаем с максимальным ускорением, используя максимальную тягу с соблюдением всех эксплуатационных ограничений. На каждом шаге расчета проверяется условие соответствия плановому графику движения.

$$\begin{cases} t_{\text{гр}i} > t_i \Rightarrow \text{тяга;} \\ t_{\text{гр}i} \leq t_i \Rightarrow \text{выбег,} \end{cases}$$

где $t_{\text{гр}i}$ — графиковое время для i -го шага;

t_i — действительное время хода для i -го шага.

2 подход

Подход заключается в том, что при решении задачи энергооптимального управления используем пограничные условия для скорости движения, чтобы двигаться большую часть поездки на скорости, близкой к среднему значению $v_{\text{ср}}$ (диапазон варьирования скоростей $\Delta v = \pm 3$ км/ч). По вышеупомянутому сценарию поезд разгоняется максимальным ускорениям, пока скорость не достигнет верхней границы скорости $v_{\text{верх}}$. После этого переходим в режим выбега. Когда скорость снижается в режиме выбега до нижней границы скорости $v_{\text{ниж}}$, включается режим тяги с реализацией максимального значения силы тяги. На элементах профиля с отрицательными уклонами, на которых установившаяся скорость выше допустимой, переходим в режим рекуперативного торможения с реализацией величины тормозной силы, необходимой для поддержания допустимой скорости движения. При этом все условия и ограничения скорости соблюдается.

$$\begin{cases} v_n \geq v_{\text{верх}} \Rightarrow \text{выбег;} \\ v_n \leq v_{\text{нижн}} \Rightarrow \text{тяги.} \end{cases}$$

При этом:

$$v_n \leq v_{\text{доп}i},$$

где v_n — скорость движения на начало шага расчета;

$v_{\text{доп}i}$ — допустимая скорость для i -го элемента профиля.

3 подход

На этом подходе зададим величину установившейся скорости $v_{\text{уст.з}}$, близкую к значению средней скорости $v_{\text{ср}}$ на элементах, где в режиме выбега установившиеся скорости меньше заданного значения. Когда на выбеге скорость снижается до скорости $v_{\text{уст.з}}$, то переходим на режим тяги с поддержанием заданной скорости до конца элемента путем реализации величины силы тяги, необходимой для поддержания скорости. На элементах профиля с отрицательными уклонами, на которых установившаяся скорость выше допустимой, переходим в режим рекуперативного торможения с реализацией величины тормозной силы, необходимой для поддержания допустимой скорости движения. Для реализации постоянства скорости движения подбирается такая величина сила тяги, которая компенсирует сопротивления движению поезда на каждом шаге расчета. Приращение времени в этом случае рассчитывается по формуле:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v_{\text{уст.з}}},$$

где Δs — расстояние, оставшееся до конца рассчитываемого элемента профиля.

При этом ток электровоза, где реализуем величины силы тяги, необходимой для поддержания скорости:

$$I_{\text{э}} = I_{\text{э}}(v) \cdot \frac{f_{\text{к}}}{f_{\text{к}}(v)},$$

где $I_{\text{э}}(v)$ — ток электровоза по токовой характеристике электровоза, соответствующий скорости v , А;

$f_{\text{к}}$ — удельная сила тяги электровоза, реализуемая в расчете;

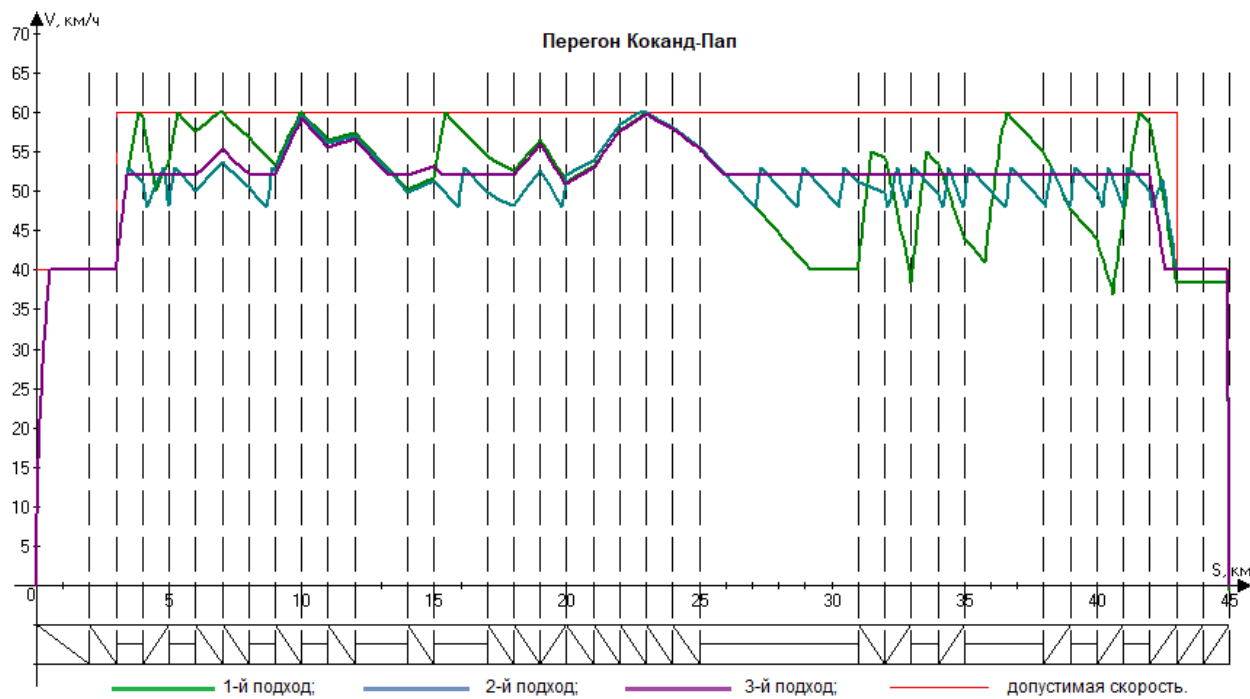
$f_{\text{к}}(v)$ — удельная сила тяги по тяговой характеристике электровоза, соответствующая скорости v , Н/кН.

Сравнение результатов

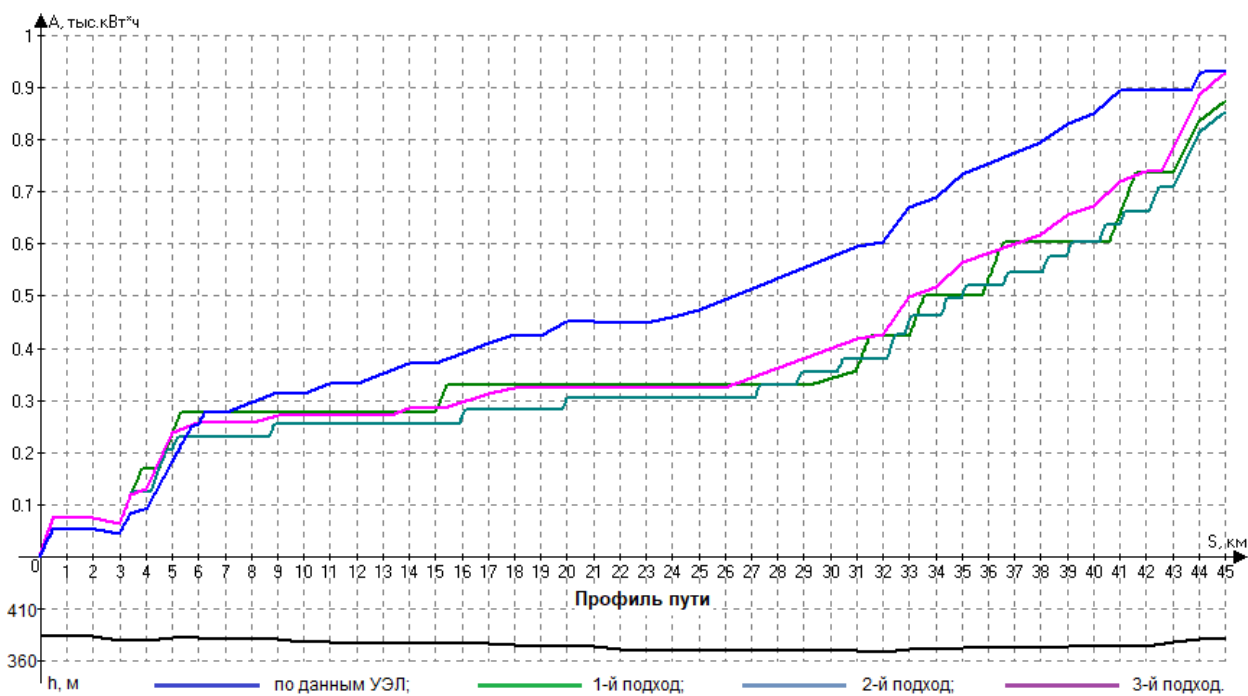
Расчеты были проведены для электровоза О'зЕ1 на перегоне станций Пап — Коканд с грузовым поездом. Тяговая характеристика электровоза показана на рис. 1. Проверка на адекватность программного комплекса подтвердили правильность и целесообразность алгоритма расчета. Расхождение результатов расчета и полученные данные из службы УЭЛ «ЎТЙ» по энергооптимальным поездкам на перегоне Пап — Коканд в четном и нечетном направлениях составляло 3 %.



Рис. 1. Тяговая характеристика электровоза О'зЕ1



a



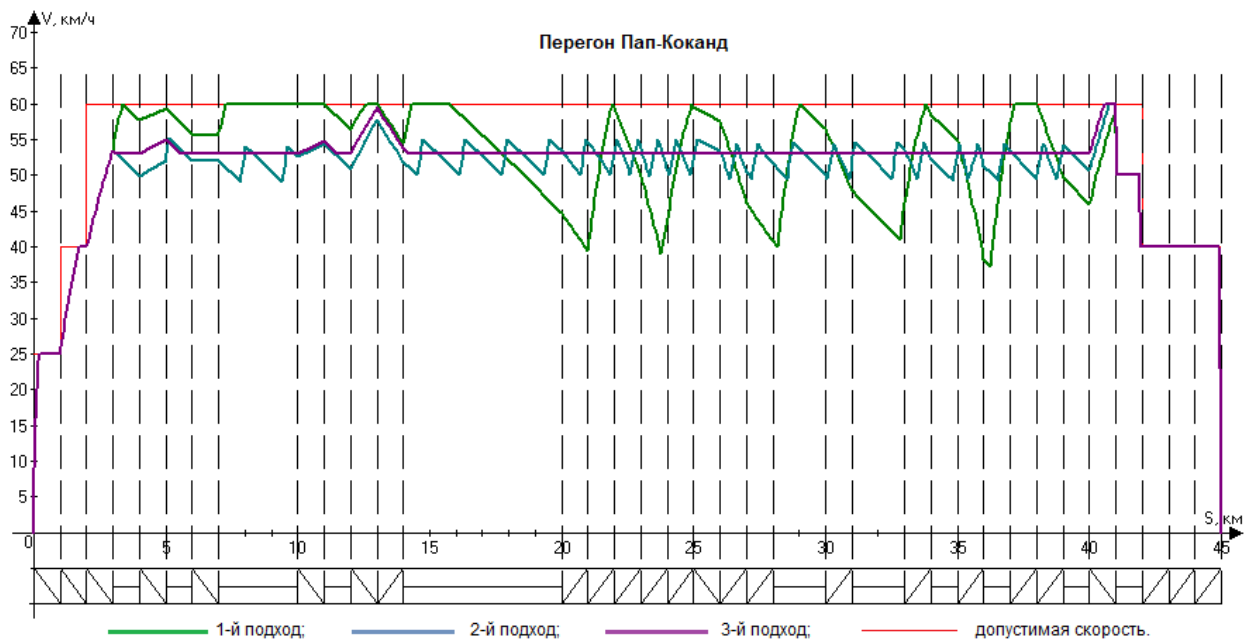
б

Рис. 2. Результаты тягово-энергетических расчетов:

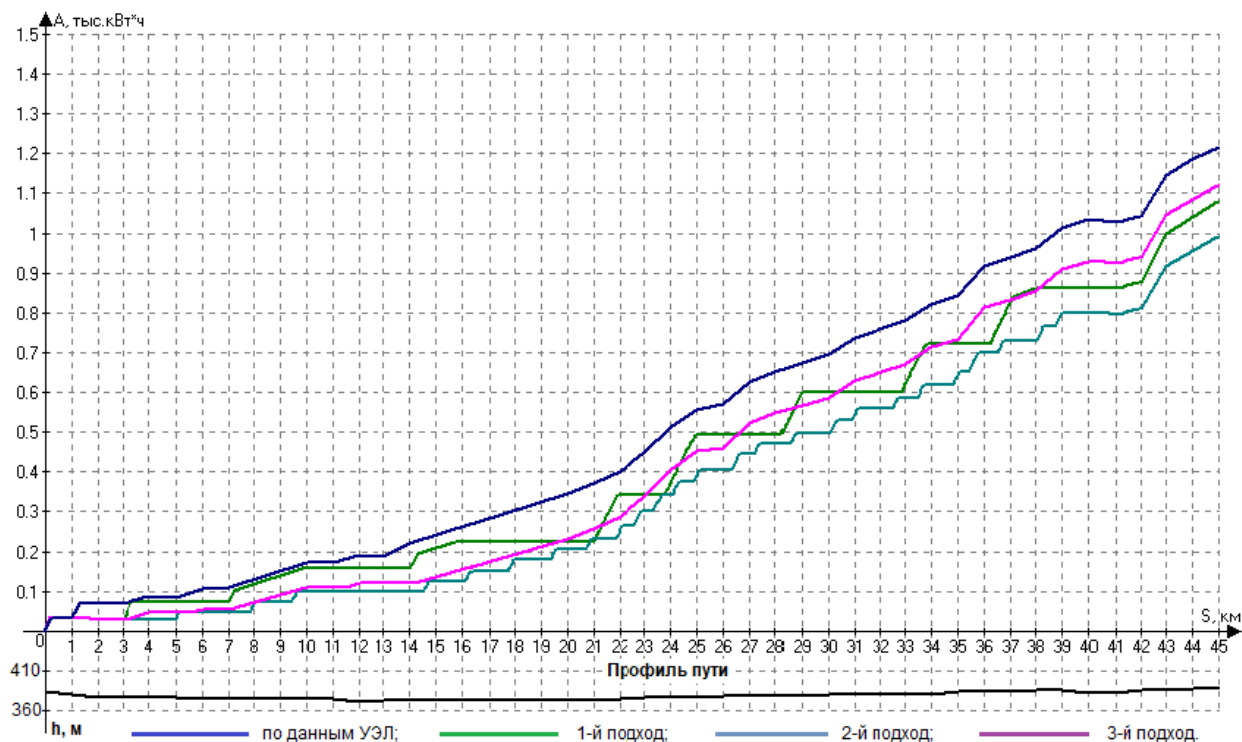
a — кривые движения поезда;

б — зависимости энергопотребления от пройденного пути

На рис. 2 и 3 показаны кривые движения и графики для зависимости энергопотребления от пройденного пути при применении наших подходов оптимизации в четном и нечетном направлениях для состава массой 3600 т. В результате рассмотрения эффективности применяемых подходов 2-й подход показал самую лучшую



a



b

Рис. 3. Результаты тягово-энергетических расчетов:
a — кривые движения поезда;
b — зависимости энергопотребления от пройденного пути

энергоэффективность. Это значительно выше, чем при использовании стратегии энергооптимального вождения поездом, которую предлагает служба УЭЛ. Также было отмечено, что энергопотребление для направления, имеющего преимущественно отрицательные уклоны, дает хорошую возможность использования

рекуперации. Для удобства отсчет километража при расчете участка Коканд — Пап и Пап — Коканд ведется от станции отправления.

Сравнение результатов, полученных по данным службы УЭЛ и нашими расчетами, представлены в табл. 1 и 2.

ТАБЛИЦА 1. Результаты сравнения по перегону Пап — Коканд

Подходы		Энергопотребление		Время хода	
		A , кВт · ч	снижение расхода, %	T_x , мин	ΔT , мин
$Q = 3600$ т	по данным УЭЛ	1215,74	—	54	—
	1-й подход	1079,0	11,2	54,76	0,76
	2-й подход	992,07	18,4	55,1	1,1
	3-й подход	1120,6	7,8	54,3	0,3
$Q = 3200$ т	по данным УЭЛ	1208,88	—	54	—
	1-й подход	981,37	18,8	54,9	0,9
	2-й подход	924,28	23,5	54,8	0,8
	3-й подход	1013,05	16,2	54,85	0,85
$Q = 2711$ т	по данным УЭЛ	1127,06	—	54	—
	1-й подход	853,27	24,3	54,7	0,7
	2-й подход	778,5	30,9	54,67	0,67
	3-й подход	870,76	22,7	54,23	0,23

ТАБЛИЦА 2. Результаты сравнения по перегону Коканд — Пап

Подходы		Энергопотребление		Время хода	
		A , кВт · ч	снижение расхода, %	T_x , мин	ΔT , мин
$Q = 3600$ т	по данным УЭЛ	930,0	—	54	—
	1-й подход	873,7	6,0	54,85	0,85
	2-й подход	851,0	8,5	54,55	0,55
	3-й подход	925,0	0,54	53,74	0,26
$Q = 3200$ т	по данным УЭЛ	879,0	—	54	—
	1-й подход	841,86	4,25	54,67	0,67
	2-й подход	749,29	14,75	54,45	0,45
	3-й подход	836,3	4,85	54,42	0,42
$Q = 2711$ т	по данным УЭЛ	816,0	—	54	—
	1-й подход	722,5	11,5	54,27	0,27
	2-й подход	648,66	20,5	53,78	0,22
	3-й подход	719,77	11,8	53,89	0,11

Заключение

По результатам сравнения расхода электроэнергии на тягу поезда, полученного с помощью данных из службы УЭЛ и расчетов на разработанной модели, было установлено, что применение 2-го подхода значительно снижает энергопотребление, следовательно, экономия отразится на расходах по оплате электроэнергии. Результаты моделирования и практические исследования показывают, что экономия энергии на тягу, полученная с применением наших подходов, составляет от 4 до 30 %, по сравнению с применяемыми сейчас на участке Пап — Коканд — Андижан режимными картами для энергооптимального ведения поездов.

Библиографический список

1. Юренко К. И. Расчет энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования / К. И. Юренко // Известия вузов. — Электромеханика. — 2013. — № 3. — С. 78–82.
2. Абляимов О. С. К энергетике электрифицированных участков железных дорог переменного тока / О. С. Абляимов // Universum: Технические науки: электрон. научн. журн. — 2019. — № 12(69). — URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/8436> (дата обращения: 25.02.2022).
3. Абляимов О. С. Уравнение движения поезда и некоторые методы его решения / О. С. Абляимов // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. — 2020. — № 9(78). — URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10715> (дата обращения: 25.02.2022).
4. Лесов А. Т. Энергооптимизация режимов движения поезда на языке программы C# / А. Т. Лесов, В. О. Иващенко // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2021. — Т. 18. — Вып. 4. — С. 480–490.
5. Черняк Ю. В. Применение интегрированного пакета программ MathCad при проведении тяговых расчетов для поездной работы / Ю. В. Черняк, С. А. Матвиенко // Сборник научных трудов ДонИЖТ. — 2006. — № 8. — С. 144–161.
6. Баранов Л. А. Оптимизация управления движением поездов: учебное пособие / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь; под ред. Л. А. Баранова. — М.: МИИТ, 2011. — 164 с.
7. Ерофеев Е. В. Определение оптимального режима ведения движения поезда при заданном времени хода / Е. В. Ерофеев // Вестник ВНИИЖТ. — 1969. — № 1. — С. 54–57.
8. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов. / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябло // Сб. научн. тр. ОАО «ВНИИЖТ». — М.: Интекст, 2012. — 80 с.
9. Петров Ю. П. Оптимальное управление движением транспортных средств / Ю. П. Петров // Энергия: М. 1969. — 96 с.

10. Садовский Л. Е. О поиске оптимального режима езды электроподвижного состава / Л. Е. Садовский, Е. М. Пекман, А. И. Пекман // Труды МИИТ. — 1970. — Вып. 310. — С. 29–41.

Дата поступления: 16.02.2022

Решение о публикации: 09.03.2022

Контактная информация:

ЛЕСОВ Алтынбек Талгат угли — аспирант; altin_goal91@mail.ru

ИВАЩЕНКО Валерий Олегович — канд. техн. наук, доц.; vio1313@mail.ru

Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption on the Basis of Uzbekistan Railway

A. T. Lesov, V. O. Ivaschenko

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Lesov A. T., Ivaschenko V. O. Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption on the Basis of Uzbekistan Railway. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 1, pp. 68–79. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-1-68-79

Summary

Objective: Analysis of existing methods for finding optimal modes of driving electric locomotives on the Pap — Kokand — Andijan section, which is part of the Uzbek Railways landfill, in order to minimize the electrical energy used for traction, taking into account such restrictions as the travel time on the stretch, the maximum permissible driving speeds, available traction power, etc. **Methods:** The method of selecting the train motion curve provides for three approaches to solving the problem and takes into account two tasks for solving the equation of train motion. **Results:** Compared with the data obtained from the service of the “Locomotive Operation Management” of Uzbek Railways, the results show that energy efficiency ranges from 4 to 30 %. The resulting maintenance regime is qualitatively different from the regime maps currently used on the Pap-Kokand-Andijan section for energy-optimal train management. **Practical importance:** The described calculation method using three approaches to solving the task makes it possible to simplify significantly and speed up traction calculations, ensure high accuracy of the results and present them in a convenient and visual form.

Keywords: Optimization, train schedule, train motion resistance, braking, energy efficiency.

References

1. Yurenko K. I. Raschet energooptimal'nyh rezhimov dvizheniya perspektivnogo podvizhnogo sostava metodom dinamicheskogo programmirovaniya [Calculation of energy-optimal modes of movement of promising rolling stock by dynamic programming method]. *Izv. vuzov. Elektromekhanika* [Bulletin of universities. electromechanics]. 2013, I. 3, pp.78–82. (In Russian)

2. Ablyalimov O. S. *K energetike elektrificirovannykh uchastkov zheleznnykh dorog peremennogo toka* [To the energy of electrified sections of AC railways]. Available at: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/8436> (accessed 25 February 2022).

3. Ablyalimov O. S. *Uravnenie dvizheniya poezda i nekotorye metody ego resheniya* [Equation of train motion and some methods of its solution]. Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10715> (accessed 25 February 2022).

4. Lesov A. T., Ivaschenko V. O. *Energooptimizatsiya rezhimov dvizheniya poezda na yazyke programmy S#* [Energy optimization of train driving modes in the C# program language]. *Izvestiya Peterburgskogo unichersiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2021, V. 8, I. 4, pp. 480–490. (In Russian)

5. Chernyak Y. V. *Primenenie integrirovannogo paketa programm MathCad pri provedenii tyagovykh raschetov dlya poezdnoj raboty* [Application of the integrated MathCad software package when performing traction calculations for train operation]. *Sb. nauchn. tr. DonIZHT* [Collection of scientific works of DonIZHT]. Donetsk, 2006, I. 8, pp. 144–161 (In Ukraine)

6. Baranov L. A., Erofeev E. V., Melyoshin I. S., Chin L. M. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniem poezdov* [Optimization of train traffic control]. Moscow, Moscow Institute of Transport Engineers Publ., 2011. 164 p. (In Russian)

7. Erofeev E. V. *Opredelenie optimal'nogo rezhima vedeniya dvizheniya poezda pri zadannom vremeni hoda* [Determination of the optimal mode of train driving at a given running time]. *Vestnik VNIIZHT* [bulletin of research institute of railway transport]. 1969, I.1, pp. 54–57 (In Russian)

8. Muginshtejn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem poezdov* [Energy-optimal methods of train traffic control]. *Sb. nauchn. tr. OAO "VNIIZHT"* [Collection of scientific papers OAO "VNIIZHT"]. Moscow, Intekst Publ., 2012. 80 p. (In Russian)

9. Petrov Y. P. *Variacionnye metody teorii optimal'nogo upravleniya* [Variational methods of optimal control theory], Moscow, Energiya [Energy], 1977, 96 p. (In Russian)

10. Sadovskij L. E., Pekman E. M., Pekman A. I. *O poiske optimal'nogo rezhima ezdy elektropodvizhnogo sostava* [About the search for the optimal driving mode of an electric rolling stock]. *Trudy MIIT* [Proceedings of MIIT]. Moscow Institute of Transport Engineers Publ., 1970, I. 310, pp. 29–41. (In Russian)

Received: February 16, 2022

Accepted: March 9, 2022

Author's information:

Altinbek T. Lesov — Postgraduate Student; altin_goal91@mail.ru

Valeriy O. Ivaschenko — PhD in Engineering, Associate Professor; vio1313@mail.ru