



ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE LONGITUDINAL TRACK PROFILE CATEGORY ON THE TRACTION AND ENERGY PERFORMANCE OF A FREIGHT TRAIN

Lesov Altynbek Talgatovich¹

Otegenov Farkhad Maksetbay uly²

¹Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Rolling Stock

²Master's Student, Department of Electric Rolling Stock Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20395547>

ARTICLE INFO

Received: 18th May 2026

Accepted: 25th May 2026

Online: 26th May 2026

KEYWORDS

Longitudinal track profile, traction calculations, electricity consumption, specific energy consumption, permissible train consist mass, KORTES, LESOV003, profile complexity coefficient.

ABSTRACT

The article presents the results of a computational experiment to assess the influence of the longitudinal track profile category on traction electricity consumption, specific energy consumption, and the permissible mass of a freight train. The study was performed on three virtual 30 km long sections: flat, hilly, and mountainous. Calculations were carried out in the KORTES software package for fixed train masses of 3730, 3243, and 2833 t, as well as in the author-developed LESOV003 program with automatic formation of the permissible train consist based on the length of receiving-departure tracks and starting conditions. It was established that an increase in profile complexity leads to a steady rise in energy consumption: according to KORTES data, at a mass of 3730 t, energy consumption increases from 539.8 to 1135.5 and 1447.5 kWh, while according to LESOV003 data, specific energy consumption increases from 6.63 to 10.73 and 14.4 conventional units. An integral profile complexity coefficient is proposed, based on the average absolute gradient and the variability of the longitudinal profile. Its values for the flat, hilly, and mountainous sections were 1.000, 1.610, and 2.134, respectively. It is shown that this coefficient correlates with the energy intensity of the profile and can be used as a basis for subsequent refinement of traction calculations and for selecting the permissible train consist mass.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАТЕГОРИИ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПУТИ НА ТЯГОВО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗОВОГО ПОЕЗДА

Лесов Алтынбек Талгатович¹

Отегенов Фархад Максетбай улы²

¹доктор (PhD) технических наук, доцент кафедры "Электроподвижной состав"



²магистрант кафедры "Электроподвижной состав"

Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, Ташкент

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20395547>

ARTICLE INFO

Received: 18th May 2026

Accepted: 25th May 2026

Online: 26th May 2026

KEYWORDS

Продольный профиль
пути, тяговые
расчеты, расход
электроэнергии,
удельный расход
энергии, допустимая
масса состава, КОПТЭС,
LESOV003,
коэффициент
сложности профиля.

ABSTRACT

В статье представлены результаты вычислительного эксперимента по оценке влияния категории продольного профиля пути на расход электроэнергии на тягу, удельный расход энергии и допустимую массу грузового поезда. Исследование выполнено на трех виртуальных участках длиной 30 км: равнинном, холмистом и горном. Расчеты проведены в программном комплексе КОПТЭС при фиксированных массах поезда 3730, 3243 и 2833 т, а также в авторской программе LESOV003 при автоматическом формировании допустимого состава по условиям длины приемо-отправочных путей и трогания с места. Установлено, что усложнение профиля пути приводит к устойчивому росту энергозатрат: по данным КОПТЭС при массе 3730 т расход энергии возрастает от 539,8 до 1135,5 и 1447,5 кВт·ч, а по данным LESOV003 удельный расход энергии увеличивается от 6,63 до 10,73 и 14,4 усл. ед. Предложен интегральный коэффициент сложности профиля, основанный на средней абсолютной крутизне и изменчивости продольного профиля, значения которого для равнинного, холмистого и горного участков составили 1,000; 1,610 и 2,134 соответственно. Показано, что данный коэффициент согласуется с энергетической тяжестью профиля и может использоваться как основа для последующего уточнения тяговых расчетов и выбора допустимой массы состава.

Введение

Энергоэффективность перевозочного процесса на железнодорожном транспорте в значительной степени определяется продольным профилем пути, поскольку именно профиль задает структуру дополнительных сопротивлений движению, характер изменения скорости и

продолжительность работы локомотива в тяговых режимах. Для грузовых поездов влияние профиля пути особенно существенно, так как изменение уклонов и длины отдельных элементов трассы непосредственно сказывается как на расходе электроэнергии на тягу, так и на допустимой массе состава. В практических задачах тяговых



расчетов это влияние традиционно учитывается поэлементно, по текущему уклону каждого элемента продольного профиля. Однако при сопоставлении различных участков такая схема не всегда позволяет получить наглядную интегральную оценку энергетической тяжести профиля.

В последние годы задачи энергооптимизации движения поездов, выбора рациональной массы состава и совершенствования методов тягового расчета получили развитие в работах, посвященных оптимальному управлению движением и снижению расхода энергоресурсов на тягу [1–8]. Вместе с тем для инженерной практики сохраняет актуальность вопрос о том, какой показатель наиболее чувствительно отражает влияние профиля пути на энергетические характеристики движения и может быть использован как удобный критерий предварительной оценки сложности участка.

Целью настоящей статьи является установление влияния категории виртуального продольного профиля пути на расход электроэнергии на тягу, удельный расход энергии и допустимую массу состава, а также формирование интегрального коэффициента сложности профиля, согласованного с полученными расчетными результатами.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования приняты три виртуальных продольных профиля пути длиной по 30 км: равнинный, холмистый и

горный. Формирование виртуальных профилей выполнялось таким образом, чтобы обеспечить сопоставимость расчетов по длине участка и числу элементов профиля. Каждый профиль включал 24 элемента различной длины, а его категориальная принадлежность определялась по доле длины элементов в заданных диапазонах уклонов. Для равнинного профиля доля элементов с уклонами от -3 до $+3\%$ превышала 60 %, для холмистого профиля доля элементов с уклонами от -5 до $+5\%$ также превышала 60 %, тогда как горный профиль характеризовался преобладанием участков с уклонами повышенной крутизны и долей элементов в диапазоне $\pm 5\%$ менее 60 %.

Расчеты выполнены в двух программных средах. Программный комплекс КОРТЭС использовался для сопоставления профилей различных категорий при фиксированных массах грузового поезда 3730, 3243 и 2833 т. Авторская программа LESOV003 применялась для определения допустимой массы состава при одинаковых ограничениях по длине прямо-отправочных путей и условиям трогания с места. В обоих случаях длина участка принималась равной 30 км, расчетная скорость — 55 км/ч, максимальная скорость — 60 км/ч, а в энергетическом балансе учитывался только расход электроэнергии на тягу.

Для интегральной оценки геометрической сложности профиля использованы два показателя. Первый показатель характеризует



средневзвешенную абсолютную крутизну профиля:

$$I_1 = \frac{1}{S} \sum (S_j \cdot |i_j|)$$

Здесь S — длина участка, S_j — длина j -го элемента профиля, i_j — уклон j -го элемента. Второй показатель отражает изменчивость профиля и определяется следующим выражением:

$$I_1 = \frac{1}{S} \sum (\bar{s}_j \cdot |i_j - i_{j-1}|)$$

Показатель I_1 характеризует среднюю профильную напряженность участка, а показатель I_2 — интенсивность чередования подъемов и спусков. Для получения безразмерной интегральной оценки сложности профиля предложен коэффициент

$$K_{проф} = \sqrt{0,5 \frac{I_1}{I_{1, баз}} + \frac{I_2}{I_{2, баз}}}$$

где $I_{1, баз}$ и $I_{2, баз}$ — значения показателей для базового равнинного профиля. Для последующего локального учета в поэлементной модели движения вводится смягченная поправка

$$k_1 = \sqrt{K_{проф}}$$

Тогда для подъемов $i_j \geq 0$ принимается $i^*_j = k_{лок} \cdot i_j$, а для спусков $i_j < 0$ используется зависимость $i^*_j = i_j / k_{лок}$. Такая схема позволяет усилить энергетическую тяжесть подъемов и одновременно снизить чрезмерно оптимистичную компенсацию энергозатрат на спусках.

Таблица 1

Основные характеристики виртуальных продольных профилей пути

Профиль	Длина, м	Число элементов	Диапазон уклонов, ‰	Критерий категории	Общая характеристика
Равнинный	30000	24	-4...+4	доля элементов в диапазоне $\pm 3‰ > 60\%$	Преобладают площадки и малые уклоны
Холмистый	30000	24	-6,5...+7,0	доля элементов в диапазоне $\pm 5‰ > 60\%$	Чередование умеренных подъемов и спусков
Горный	30000	24	-12,0...+10,0	доля элементов в диапазоне $\pm 5‰ < 60\%$	Преобладают уклоны повышенной крутизны

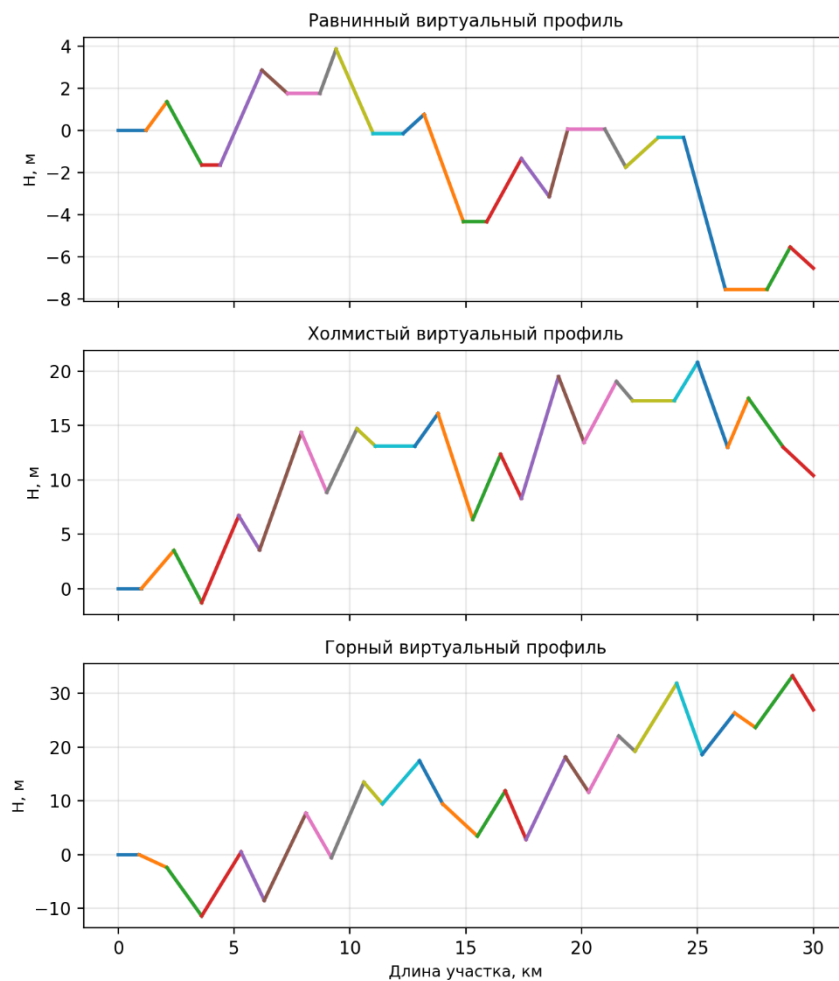


Рисунок 1 — Виртуальные продольные профили равнинного, холмистого и горного участков

Как видно из рисунка 1, различие между принятыми виртуальными профилями проявляется не только в диапазоне уклонов, но и в характере их распределения по длине участка. Для равнинного профиля характерно преобладание площадок и малых уклонов, холмистый профиль отличается более частым чередованием умеренных подъемов и спусков, а горный профиль содержит значительную долю элементов повышенной крутизны. Это позволяет использовать выбранные виртуальные участки как корректную расчетную основу для

сопоставительного вычислительного эксперимента.

Результаты расчетов и обсуждение

Результаты расчетов в КОРТЭС показали, что при фиксированных массах поезда усложнение продольного профиля пути приводит к устойчивому росту расхода электроэнергии на тягу. При массе 3730 т расход энергии увеличивается от 539,8 кВт·ч на равнинном профиле до 1135,5 кВт·ч на холмистом и 1447,5 кВт·ч на горном. Для масс 3243 и 2833 т наблюдается та же закономерность: энергозатраты на горном профиле остаются максимальными, а на равнинном — минимальными. Следовательно, категория профиля пути выступает одним из

определяющих
энергетической
движения.

факторов
напряженности

Таблица 2
Результаты расчетов в КОРТЭС
для фиксированных масс состава

Профиль	Масса поезда, т	Средняя скорость, км/ч	Время хода, мин	Максимальный ток, А	Расход энергии, кВт·ч
Равнинный	3730	51	35.1	285	539.8
	3243	51	35.1	285	479.0
	2833	52	34.9	285	393.0
Холмистый	3730	55	32.7	285	1135.5
	3243	55	32.8	285	944.4
	2833	56	32.4	285	766.1
Горный	3730	44	41.1	285	1447.5
	3243	44	40.7	285	1303.0
	2833	45	40.5	285	1112.0

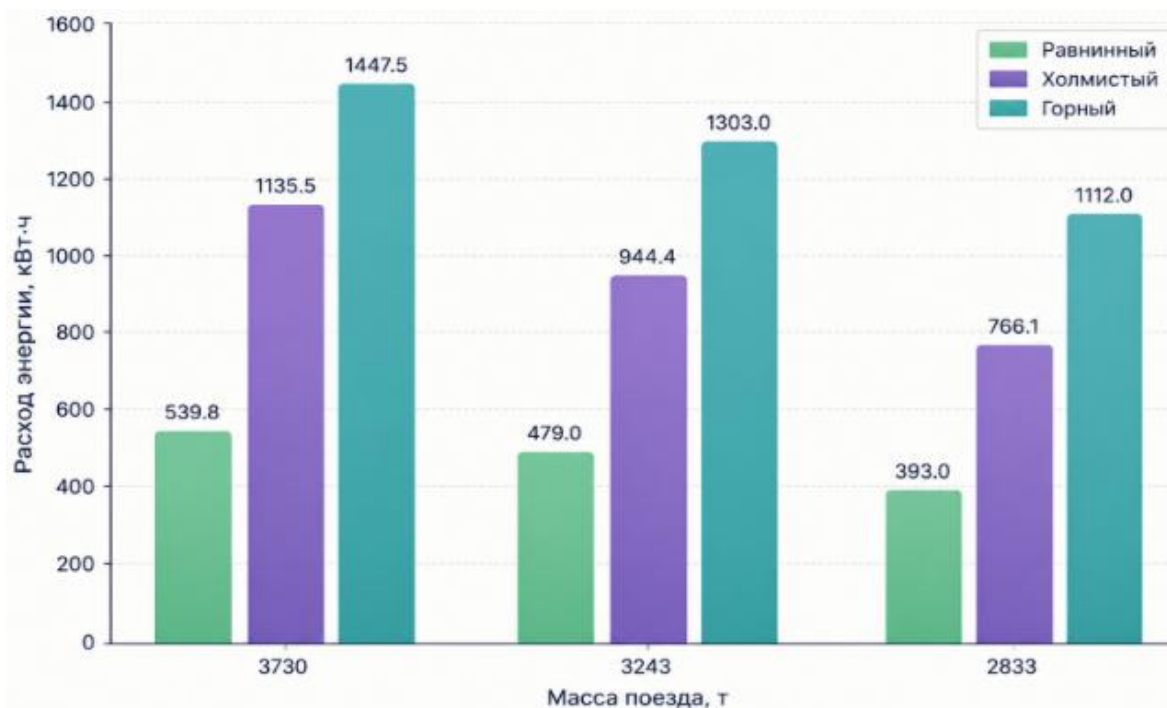


Рисунок 2 — Расход электроэнергии на тягу по данным КОРТЭС в зависимости от массы поезда и категории профиля

Рисунок 2 наглядно подтверждает монотонный рост энергозатрат при переходе от равнинного профиля к холмистому и далее к горному. Важно отметить, что максимальный ток во всех расчетах сохранялся на уровне

285 А, следовательно, различие в расходе энергии связано не с ростом пиковых токовых нагрузок, а с общей структурой движения по участку, то есть с большей длительностью и напряженностью тяговых режимов на более сложных профилях.

Изменение профиля неодинаково отражается на энергетических и кинематических показателях. На



холмистом профиле средняя скорость составила 55–56 км/ч при времени хода 32,4–32,8 мин, тогда как на равнинном профиле она находилась в пределах 51–52 км/ч при времени 34,9–35,1 мин. Это означает, что более сложный профиль не обязательно приводит к пропорциональному ухудшению временных показателей. Однако даже в случае сохранения сравнительно благоприятной средней скорости холмистый профиль требует существенно больших энергозатрат. Следовательно, именно энергетические показатели оказываются более чувствительными к категории профиля, чем средняя скорость и время хода.

Авторская программа LESOV003 использовалась не для сравнения одинаковых составов, а для

определения допустимой массы поезда при одинаковых эксплуатационных ограничениях. Такой подход позволил перейти от чисто сравнительной оценки профилей к инженерной задаче формирования состава. По результатам расчетов допустимая масса для равнинного профиля составила 3659,2 т, для холмистого — 3977,6 т, для горного — 3145,6 т. Соответствующий расход энергии на тягу составил 755,446; 1325,139 и 1418,605 кВт·ч. Особенно показательным оказался удельный расход энергии: 6,63 для равнинного профиля, 10,73 для холмистого и 14,40 для горного.

Таблица 3

Результаты расчетов в LESOV003 для допустимых составов

Профиль	Допустимая масса, т	Число вагонов	Длина поезда, м	Расход энергии, кВт·ч	Удельный расход а	Минимальная скорость, км/ч
Равнинный	3659.2	62	900.7	755.446	6.63	50–55
Холмистый	3977.6	68	990.0	1325.139	10.73	40–45
Горный	3145.6	54	787.0	1418.605	14.4	55–57

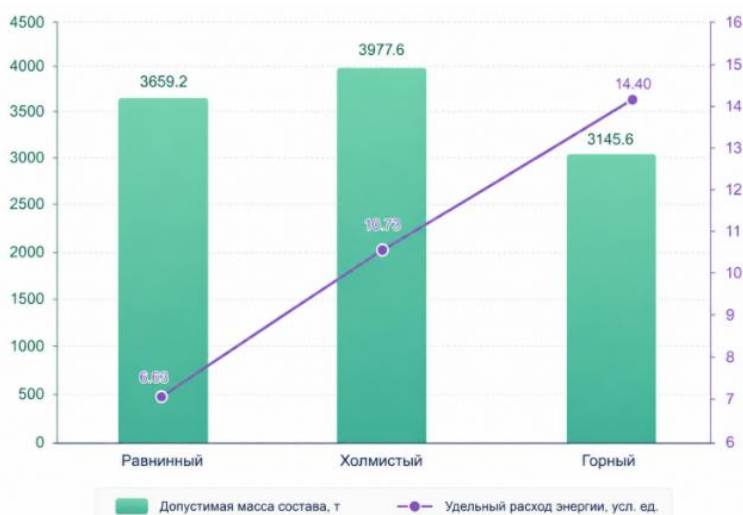


Рисунок 3 — Допустимая масса состава и удельный расход энергии по данным LESOV003

По рисунку 3 видно, что удельный расход энергии возрастает монотонно от равнинного профиля к горному, тогда как допустимая масса состава определяется не только формальной категорией участка, но и конфигурацией профиля, а также совокупностью эксплуатационных ограничений. Повышенное значение допустимой массы на холмистом профиле не следует трактовать как его «преимущество» над равнинным. Этот результат указывает на то, что при выборе допустимой массы состава необходимо учитывать не только диапазон уклонов, но и структуру профиля по длине участка.

Для того чтобы перейти от качественного описания сложности

профиля к количественной интегральной оценке, были вычислены показатели I_1 и I_2 , а затем — коэффициент сложности профиля $K_{проф}$. Расчет показал, что для равнинного, холмистого и горного профилей значения I_1 составили 1,448; 3,783 и 6,708 соответственно, а значения I_2 — 2,821; 7,253 и 12,625. На основе этих величин получены коэффициенты $K_{проф}$, равные 1,000; 1,610 и 2,134. Для локального включения в поэлементную модель движения использована смягченная поправка $k_{лок} = \sqrt{K_{проф}}$, составившая 1,000; 1,269 и 1,461 соответственно.

Таблица 4

Интегральные показатели сложности виртуальных профилей и производные коэффициенты

Профиль	I_1	I_2	$K_{проф}$	$k_{лок} = \sqrt{K_{проф}}$
Равнинный	1.448	2.821	1.0	1.0
Холмистый	3.783	7.253	1.61	1.269
Горный	6.708	12.625	2.134	1.461

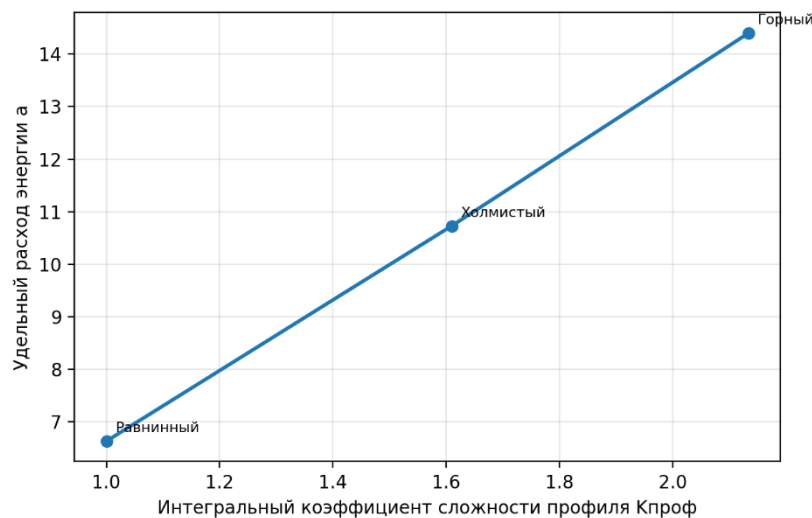


Рисунок 4 — Связь между интегральным коэффициентом

сложности профиля и удельным расходом энергии



Как видно из рисунка 4, рост коэффициента $K_{\text{проф}}$ сопровождается ростом удельного расхода энергии. Для рассматриваемых виртуальных профилей коэффициент сложности практически воспроизводит последовательность изменения энергетической тяжести участка и может рассматриваться как удобный интегральный индикатор влияния продольного профиля пути на энергорасход. Для первого этапа исследований такой коэффициент целесообразно использовать не как окончательно верифицированную поправку ко всем режимам движения, а как согласованный с расчетами показатель, подлежащий дальнейшей проверке в повторном цикле тяговых расчетов.

Полученные результаты позволяют сформулировать несколько важных положений. Во-первых, категория продольного профиля пути оказывает определяющее влияние на расход электроэнергии на тягу. Во-вторых, удельный расход энергии является более чувствительным критерием сложности профиля, чем средняя скорость или время хода. В-третьих, интегральный коэффициент $K_{\text{проф}}$, вычисляемый по геометрии профиля, согласуется с наблюдаемой энергетической тяжестью движения и может использоваться как основа для последующего уточнения тяговых расчетов и выбора допустимой массы состава.

Заключение

Выполненный вычислительный эксперимент на трех виртуальных продольных профилях пути позволил установить устойчивое влияние категории профиля на тягово-энергетические показатели движения грузового поезда. По данным КОРТЭС расход электроэнергии на тягу при одинаковых массах состава возрастает от равнинного профиля к холмистому и далее к горному. По результатам LESOV003 аналогичная тенденция подтверждается для допустимых составов, при этом наиболее чувствительным показателем оказался удельный расход энергии, значения которого составили 6,63; 10,73 и 14,40 для равнинного, холмистого и горного профилей соответственно.

Предложенный интегральный коэффициент сложности профиля, основанный на средневзвешенной абсолютной крутизне и изменчивости продольного профиля, дал значения 1,000; 1,610 и 2,134 для рассматриваемых виртуальных участков. Это позволяет использовать его как количественный индикатор энергетической тяжести профиля и как основу для дальнейшего совершенствования методики тяговых расчетов. Практическая значимость результатов заключается в возможности предварительной оценки энергетической напряженности участка и повышения обоснованности выбора допустимой массы состава.



References:

1. Баранов Л.А., Ерофеев Ю.В., Мелешин И.С., Чин Л.М. Оптимизация управления движением поездов. М.: МИИТ, 2011. 164 с.
2. Климович А.В. Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу. М.: Компания Спутник+, 2008. 263 с.
3. Лесов А.Т., Иващенко В.О. Оптимизация кривой движения поезда для минимизации энергопотребления на базе железных дорог Узбекистана // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 1. С. 68–79.
4. Лесов А.Т., Абляимов О.С. К обоснованию оптимального режима управления движением грузового поезда на участке Коканд – Андижан Узбекской железной дороги // Universum: Технические науки. 2022. № 11(104). С. 30–35.
5. Лесов А.Т., Иващенко В.О. Энергооптимизация режимов движения поезда на языке программы C# // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2021. Т. 18. Вып. 4. С. 480–490.
6. Мугинштейн Л.А., Илютович А.Я., Яблоко И.А. Энергооптимальные методы управления движением поездов. М.: Интекст, 2012. 80 с.
7. Nazirkhonov T.M., Radjibaev D.O. Evaluation of the efficiency of a 4q-S converter of an alternating current electric locomotive of the O'Z-ELR series using a computer simulation model // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2476. 020055.
8. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Озеров М.И. Теория электрической тяги. М.: Транспорт, 1995. 294 с.
9. Dongre N.R. Optimization of energy consumption in electric traction system by using interior point method // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2018. Vol. 13. No. 2. P. 9–15.
10. Chen R., Liu L., Guo J. Optimization of high-speed train control strategy for traction energy saving using an improved genetic algorithm // Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2012. Vol. 1. No. 12.