

УДК 629.4.016.2

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-4-21-30

А.А. Зарифьян

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ПРИ РАБОТЕ ГРУЗОВОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Целью работы является получение энергетических показателей работы грузового электровоза при заданном графике движения, но при разных законах изменения скорости и на различном профиле пути. Применены методы компьютерного моделирования (программный комплекс «Универсальный Механизм»), причем последующее сопоставление полученных результатов с записями бортового регистратора показало практически полное

совпадение. Построен баланс мощностей в различных случаях, получены также значения удельной работы на тягу поезда, которые обозначают пределы для целевого показателя по сокращению удельного расхода электроэнергии на тягу.

**Ключевые слова:** грузовой магистральный электровоз, энергетические показатели, использование мощности, экономичность.

A.A. Zarifiyan

## ENERGY BALANCE DURING FREIGHT ELECTRIC LOCOMOTIVE OPERATION

The purpose of this work consists in obtaining power indices of a freight electric locomotive at the specified schedule of motion, but at different laws of speed changes and on different track profiles.

CAD methods are used, at that, the further comparison of the results obtained with the records of the locomotive crew recorder has shown an actually complete coincidence.

As expected, a minimum work performed for a train hauling is achieved in an ideal case – at the motion without stops at a constant speed on a straight horizontal track. When moving along an actual profiled track a work performed for hauling changes by a dif-

ference of potential energy of gravity in the initial and end points.

Often accelerations and slowdowns result in the work increase for hauling, for that there are obtained quantity values. In order to avoid excess power waste it is necessary to move possibly without sharp accelerations and hard braking. To support motion uniformity it is expedient to use a speed controller.

There are obtained the values of a specific work for train hauling in different cases which define limits for a purpose index on the decrease of specific power consumption for hauling.

**Key words:** freight main-line electric locomotive, power indices, capacity use, efficiency.

### Введение

В Долгосрочной программе развития ОАО «Российские железные дороги» до 2025 года (утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.03.2019 г. № 466-р) отмечается, что рост грузооборота к 2025 году потребует увеличения объема потребления электроэнергии по базовому сценарию на 13% к уровню 2018 года, а по оптимистичному сценарию – на 22%. Наряду с этим, прогнозируется рост тарифов на электроэнергию на 3,5...7,4% ежегодно.

Из сказанного вытекает насущная необходимость снижения удельного потребления электрической энергии на тягу поездов. Поставлена задача сокращения

удельного расхода электроэнергии со 102,2 кВт·ч/изм в 2018 году до 100,2 кВт·ч/изм к 2025 году.

В настоящей статье представлен анализ энергетического баланса при работе грузового электровоза. Этот анализ выполнен методами теории тяги поездов и основан, с одной стороны, на обработке записей бортового регистратора, а с другой – на применении современных пакетов прикладных программ. В результате определены и проанализированы ограничения, которым должны подчиняться целевые требования по сокращению удельного расхода электроэнергии на тягу.

### Условия работы электровоза

Двухсекционный электровоз 2ЭС5-003, оснащенный бортовым регистратором, ведет порожний грузовой состав из 75 полувагонов. Масса поезда составляет  $m = P + Q = 2 \cdot 100 + 75 \cdot 25 = 2075$  т. Поездка

выполнена на участке Северо-Кавказской железной дороги, спрямленный профиль которого показан на рис. 1. Уклоны находятся в пределах  $\pm 9$  ‰, согласно [1], это холмистый профиль III типа.

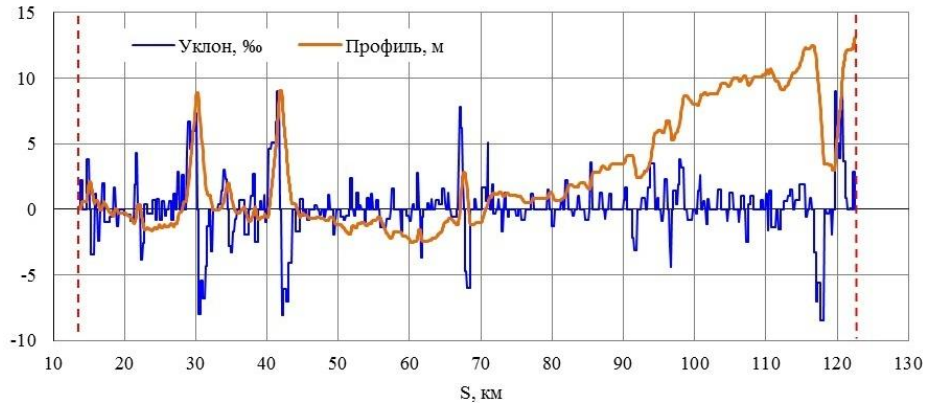


Рис. 1. Спрямоленный профиль (оранжевая линия) и уклоны (синяя линия) участка пути. Пунктирными линиями показаны начальное и конечное положения электровоза.

Пройденное расстояние равно  $S = 108,220$  км, полное время движения  $t_{\Sigma} = 7956$  с (то есть 2 ч 12 мин 36 с). Пунктир-

ными линиями на рис. 1 показаны начальное и конечное положения электровоза.

### Дифференциальное уравнение движения поезда

Здесь полагаем, что поезд, как система связанных между собой единиц подвижного состава (локомотив и вагоны), движется поступательно с общей для всех элементов скоростью  $V$ . Тогда дифференциальное уравнение движения поезда в проекции на ось  $x$ , направленную в сторону движения поезда, будет иметь вид [2, 3]:

$$x: m_{\text{пр}} \frac{dV}{dt} = F_{\text{кx}} + W_{\text{кx}} + B_{\text{тx}}, \quad (1)$$

где  $t$  – время, с;  $V$  – скорость, м/с;  $m_{\text{пр}}$  – приведенная масса поезда, т.

Приведенная масса поезда записывается как

$$m_{\text{пр}} = m \cdot (1 + \gamma), \quad (2)$$

где  $\gamma$  – коэффициент инерции вращающихся частей, согласно [2] принимаем  $\gamma = 0,06$ . Тогда  $m_{\text{пр}} = 2075 \cdot (1 + 0,06) \approx 2200$  т.

Первое слагаемое в правой части уравнения (1) представляет собой касательную силу, которая при работе локомотива в режиме тяги направлена в сторону движения, а при электрическом торможении – противоположно движению. Величина этой силы  $F_{\text{к}}$  определяется машинистом, а её проекция на ось  $x$  равна:

$$F_{\text{кx}} = k_1 F_{\text{к}}, \quad (3)$$

здесь  $F_{\text{к}} > 0$ .

Коэффициент  $k_1$  в (3) определяется следующим образом:

$$k_1 = \begin{cases} +1, & \text{при работе в режиме тяги,} \\ -1, & \text{при электрическом торможении,} \\ 0, & \text{при работе в других режимах.} \end{cases}$$

Заметим, что магистральные локомотивы оснащены многодвигательным тяговым электроприводом, поэтому суммарная сила тяги  $F_{\text{к}}$  складывается из сил тяги, реализуемых всеми обмоточными осями локомотива.

Далее, в правой части уравнения (1) присутствует проекция силы сопротивления движению  $W_{\text{кx}}$ . Полное сопротивление движению поезда  $W_{\text{к}}$  состоит из основного сопротивления движению и дополнительных сопротивлений, возникающих от наличия уклонов и кривых:

$$W_{\text{к}} = W_{\text{o}} + W_{\text{i}} + W_{\text{r}}. \quad (4)$$

Основное сопротивление  $W_0$  определяем согласно [2] и [4], раздел 1.2. Оно всегда направлено противоположно движению:  $W_{ox} = -W_0 < 0$ . По величине, основное сопротивление зависит от скорости движения, массы поезда и нагрузки на ось.

Что касается дополнительных сопротивлений, возникающих от наличия уклонов и кривых, то в настоящей работе использовался спрямленный профиль пути, поэтому принимаем

$$W_{спрх} = W_{ix} + W_{rx} .$$

$$k_2 = \begin{cases} -1, & \text{при работе в режиме пневматического торможения,} \\ 0, & \text{при работе в других режимах.} \end{cases}$$

Различают три основных режима движения поезда: 1) тяга; 2) выбег; 3) торможение (пневматическое или электрическое). Далее будем рассматривать движение

$$x : m_{пр} \frac{dV}{dt} = k_1 F_k + W_{ox} + W_{спрх} + k_2 B_T = F_{кx} + W_{ox} + W_{спрх} . \quad (1^*)$$

Таким образом, приходим к первой (прямой) задаче динамики: по известному движению (в нашем случае – по известной скорости движения  $V = V(t)$ ) необходимо найти действующие силы, которые порождают это движение. Нас интересуют касательная сила тяги (электрического тормо-

Таким образом, из (4) получаем проекцию полного сопротивления движению поезда на направление движения в виде

$$W_{кx} = W_{ox} + W_{спрх} , \quad (5)$$

причем  $W_{ox}$  всегда отрицательно, а  $W_{спрх}$  может быть как положительно, так и отрицательно.

Проекцию сил пневматического торможения на направление движения  $B_{Tx}$  запишем как:

$$B_{Tx} = -B_T = k_2 B_T \leq 0 .$$

Введем в рассмотрение коэффициент  $k_2$  следующим образом:

ние в режимах тяги, выбега и электрического торможения. Тогда (1), с учетом принятых обозначений, примет вид:

жения) электровоза  $F_k$ , которая может быть определена из (1\*) при известном законе изменения скорости, а также мощность на тягу  $P_T$  и полезная работа на тягу поезда  $A_T$ .

### Варианты моделирования.

Рассмотрим следующие ситуации, для обозначения которых будем применять двойную индексацию типа  $\{X_1 - X_2\}$ . Выбор вариантов продиктован стремлением выделить вклад каждого фактора в итоговый результат.

$$V_0 = S / t_\Sigma = 108220 / 7956 = 13,6 \text{ м/с (48,96 км/ч)}, \quad (6)$$

и показана зеленой пунктирной линией на рис. 2.

**{0 – 1}**. Профиль идеализированный ( $X_1 = 0$ ), поезд движется по нему с плавно изменяющейся скоростью ( $X_2 = 1$ ), которая

**{0 – 0}**. Профиль участка идеализированный – прямой, ровный и горизонтальный ( $X_1 = 0$ ), поезд проходит его без остановок с постоянной скоростью ( $X_2 = 0$ ). Скорость определяется как

показана синей линией на рис. 2. Выделим три промежутка времени.

1. Трогание с места и разгон ( $0 \leq t \leq t_1 = 480 \text{ с}$ ), скорость возрастает по синусоидальному закону:

$$V = \frac{V_{уст}}{2} \left( \sin \frac{\pi(t - 0,5t_1)}{t_1} + 1 \right) = 7,238 \left( \sin \frac{\pi(t - 240)}{480} + 1 \right), \text{ м/с.}$$

Величина установившейся скорости  $V_{уст} = 14,476 \text{ м/с}$  будет определена далее.

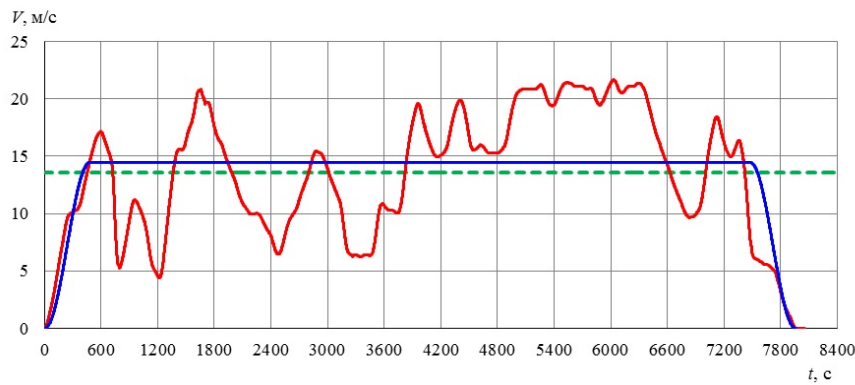


Рис. 2. Скорость движения поезда, м/с:

( $X_2 = 0$ ) – зеленая пунктирная линия; ( $X_2 = 1$ ) – синяя линия; ( $X_2 = 2$ ) – красная линия

2. Установившееся движение ( $t_1 = 480 \leq t \leq t_2 = 7476$  с) со скоростью  $V = V_{уст} = 14,476$  м/с.

3. Торможение и остановка ( $t_2 = 7476 \leq t \leq t_{\Sigma} = 7956$  с), скорость убывает по синусоидальному закону:

$$V = \frac{V_{уст}}{2} \left( \sin \frac{\pi(t - t_2 + 0,5t_1)}{t_1} + 1 \right) = 7,238 \left( \sin \frac{\pi(t - 7236)}{480} + 1 \right), \text{ м/с.}$$

Установившуюся скорость находим, записав выражение для пройденного пути:

$$S = 2 \cdot \frac{V_{уст}}{2} \cdot t_1 + V_{уст} \cdot (t_{\Sigma} - 2 \cdot t_1) = 108220 \text{ м,}$$

откуда

$$V_{уст} = \frac{108220}{7476} = 14,476 \text{ м/с (52,11 км/ч).}$$

{0 – 2}. Профиль идеализированный ( $X_1 = 0$ ), скорость взята по записям бортового регистратора ( $X_2 = 2$ ).

{1 – 0}. Поезд движется по участку пути, спрямленный профиль которого ( $X_1 = 1$ ) показан на рис. 1. Скорость постоянна  $V_0 = 13,6$  м/с ( $X_2 = 0$ ).

{1 – 1}. Поезд движется по участку пути с профилем ( $X_1 = 1$ ), скорость плавно изменяется ( $X_2 = 1$ ).

{1 – 2}. Поезд движется по участку пути с профилем ( $X_1 = 1$ ), скорость взята по регистратору ( $X_2 = 2$ ). Этот случай соответствует реальной поездке, и полученные при моделировании результаты по энергетическому балансу будут сопоставлены с записями бортового регистратора.

Указанные выше варианты сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Варианты моделирования

Скорость / Профиль	Скорость постоянна ( $X_2 = 0$ )	Скорость плавно изменяется ( $X_2 = 1$ )	Скорость по регистратору ( $X_2 = 2$ )
Идеализированный профиль ( $X_1 = 0$ )	{0 – 0}	{0 – 1}	{0 – 2}
Спрямленный профиль реального участка ( $X_1 = 1$ )	{1 – 0}	{1 – 1}	{1 – 2}

Работа электровоза на тягу поезда

{0 – 0}. В этом случае из (1\*) получаем

$$F_{кx} = -W_{ox}, \quad (7)$$

то есть в данном случае сила тяги уравновешивает только лишь силу основного со-

противления, возникающую при движении со скоростью  $V_0 = 13,6$  м/с.

Силы основного сопротивления определяем согласно [2, 4]:

- для двухсекционного электровоза (масса одной секции  $M_{эл} = 100$  т, скорость  $V$  в км/ч)

$$2W_{эл} = -2M_{эл}g(1,9 + 0,008V + 0,00025V^2) = -5670,7 \text{ Н};$$

- для состава (75 порожних грузовых вагонов, масса одного вагона  $M_{ваг} = 25$  т)

$$75W_{ваг} = -75M_{ваг} \left( 5,2 + \frac{35,4 + 0,785V + 0,027V^2}{M_{ваг} / 4} \right) = -51326,7 \text{ Н}.$$

Тогда основное сопротивление поезда будет равно

$$W_{ок} = -5670,7 - 51326,7 = -56997,4 \text{ Н} \approx -57000 \text{ Н}.$$

Отсюда сила тяги электровоза согласно (7)

$$F_{кx} = -W_{ок} = 57000 \text{ Н}.$$

Находим мощность электровоза на тягу (сила тяги в Н, скорость в м/с):

$$P_k = F_{кx} \cdot V_0 = 57000 \cdot 13,6 = 775200 \text{ Вт} = 775,2 \text{ кВт}.$$

Работа электровоза на тягу поезда

$$A_{T\{0-0\}} = P_k \cdot t_{\Sigma} = 775200 \cdot 7956 = 6167491200 \text{ Дж} = 1713 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

Это значение полезной работы, совершенной электровозом на тягу поезда, дает нам точку отсчёта для дальнейшего.

Значения работы на тягу поезда в различных случаях сведем в таблицу 2.

Таблица 2

Работа на тягу поезда  $A_T$ , кВт·ч

$X_2 \backslash X_1$	0	1	2
0	1713	1795	2058
1	1788	1864	2128

{0 – 1}. В этом случае, как и во всех дальнейших, для моделирования движения был применен разработанный под руководством профессора Д.Ю. Погорелова программный комплекс «Универсальный Механизм» [5], версия 8.3.4.1, модуль «Train». Была создана модель поезда с двухсекционным электровозом и 75 грузовыми полувагонами, с поглощающими аппаратами типа Ш-2-В.

Макрогеометрия пути соответствовала прямому горизонтальному участку без уклонов. Скорость изменялась согласно рис. 2 (синяя линия).

Полученный баланс мощностей за время поездки представлен на рис. 3. Видим, что в любой момент времени мощность на тягу  $P_T$  равна алгебраической сумме мощностей сил сопротивления  $P_w$  и сил инерции  $P_{ин}$ , взятой с противоположным знаком.

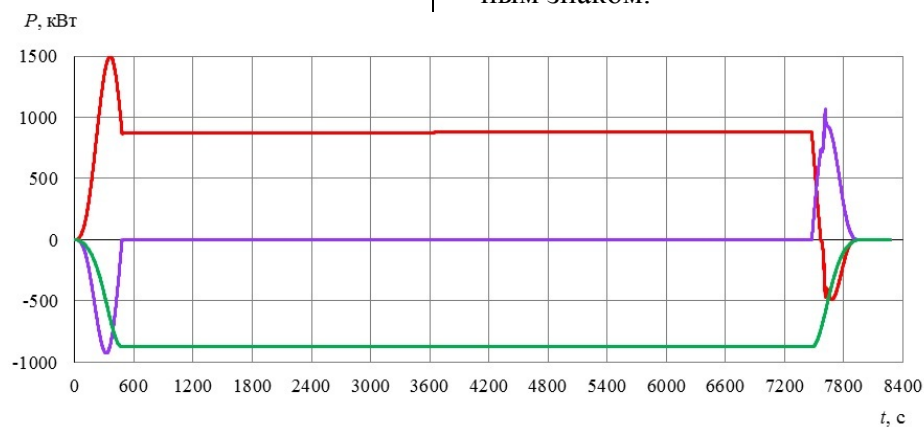


Рис. 3. Баланс мощностей в случае {0 – 1}: мощность на тягу  $P_T$  – красная линия; мощность сил основного сопротивления  $P_w$  – зеленая линия; мощность сил инерции  $P_{ин}$  – фиолетовая линия

Работа на тягу поезда вычисляется как интеграл мощности по времени:

$$A_T = \int_{t_0=0}^{t_\Sigma} P_T dt,$$

в нашем случае она равна  $A_{T\{0-1\}} = 1795$  кВт·ч, что составляет 105% от работы  $A_{T\{0-0\}}$ .

Причина увеличения работы, совершенной электровозом, хорошо иллюстрируется рисунком 4. Видим, что при разгоне электровоз развивает мощность на тягу  $P_T > 0$ , которая уравнивает сумму мощностей сил инерции  $P_{ин} = -m_{уп} V \frac{dV}{dt} < 0$  и основного сопротивления  $P_w < 0$  (которое возрастает по модулю с увеличением скорости):

$$P_T = -P_{ин} - P_w,$$

и в результате мощность на тягу достигает пикового значения  $P_T = 1500$  кВт, тогда как мощность на тягу при установившемся движении составляет 869 кВт.

Отметим, что работа на тягу, совершенная электровозом при разгоне поезда (то есть при  $0 \leq t \leq t_1 = 480$  с), эквивалент-

на начальной кинетической энергии, достаточной для подъема поезда на возвышенность 18,9 м с учетом действия сил сопротивления.

При торможении имеем мощность сил сопротивления  $P_w < 0$  (убывает по модулю по мере уменьшения скорости), но мощность сил инерции при торможении положительна,  $P_{ин} > 0$ , и в итоге мощность  $P_T$  по модулю не превышает 500 кВт.

{0 – 2}. Отличие от предыдущего случая заключается в том, что скорость изменяется согласно рис. 2 (красная линия). Полученный баланс мощностей представлен на рис. 4. Наибольшее значение мощности  $P_T$  в режиме тяги достигает 3750 кВт, в режиме электрического торможения – 4000 кВт.

Работа на тягу поезда составила  $A_{T\{0-2\}} = 2058$  кВт·ч, что на 20% больше работы  $A_{T\{0-0\}}$ . Причина заключается в том, что за время движения поезд несколько раз разгонялся и тормозил (см. рисунок 2, красная линия), что потребовало дополнительных затрат.

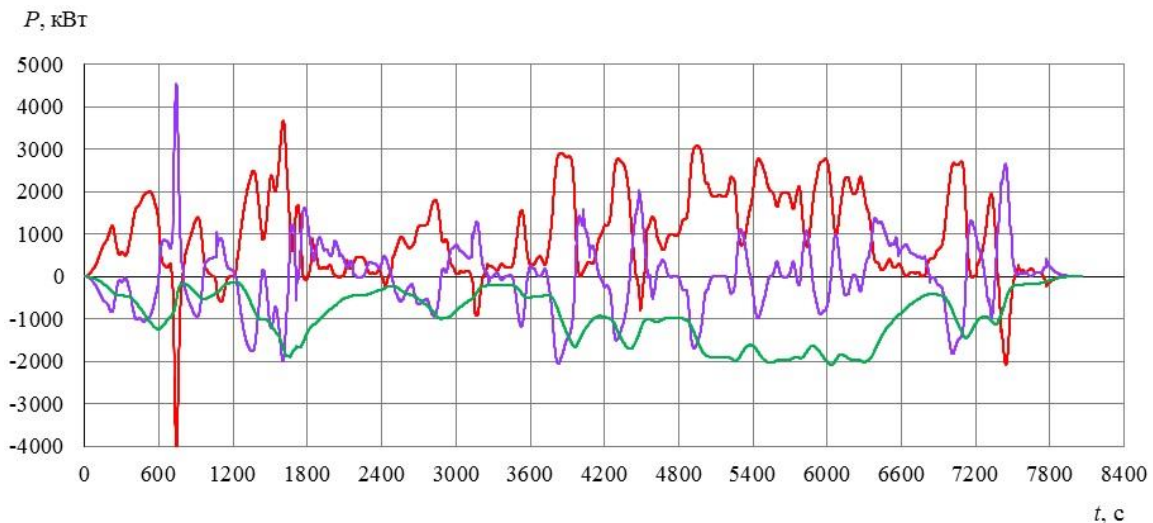


Рис. 4. Баланс мощностей в случае {0 – 2}: мощность электровоза – красная линия; мощность сил основного сопротивления – зеленая линия; мощность сил инерции – фиолетовая линия

{1 – 0}. В данном случае спрямленный профиль пути принимаем согласно рисунку 1, а скорость постоянна,  $V_0 = 13,6$  м/с. Из (1\*) получаем:

$$F_{кx} = -W_{оx} - W_{спрх},$$

причем сила основного сопротивления постоянна и всегда отрицательна, тогда как

сила дополнительного сопротивления при движении по профилю изменяется и по величине, и по направлению. Конечная точка пути выше начальной на  $\Delta h = 12,24$  м (см. рис. 1).

Баланс мощностей показан на рис. 5. Наибольшее значение мощности  $P_T$  в ре-

жиме тяги достигает 2700 кВт, в режиме электрического торможения – 1200 кВт.

Работа на тягу поезда равна  $A_{T\{1-0\}} = 1788$  кВт·ч, что на 75 кВт·ч больше, чем

$A_{T\{0-0\}}$ . Отметим, что работа  $A_{T\{1-0\}}$  – если считать поезд материальной точкой – может быть получена как  $A_{T\{1-0\}} = A_{T\{0-0\}} + mg \cdot \Delta h$ , где  $mg \cdot \Delta h \approx 70$  кВт·ч.

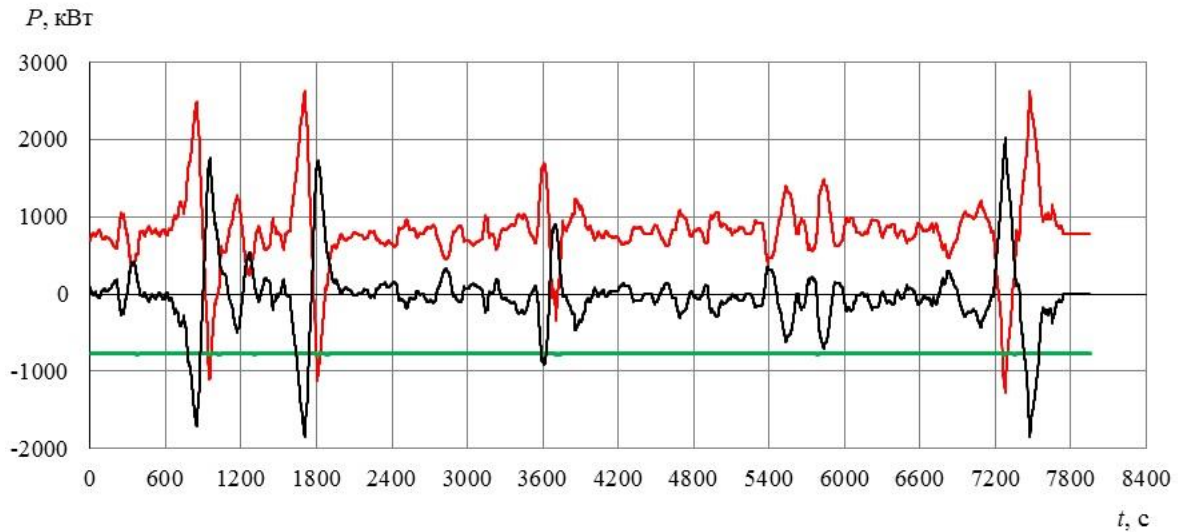


Рис. 5. Баланс мощностей в случае {1 – 0}: мощность на тягу – красная линия; мощность сил основного сопротивления – зеленая линия; мощность сил дополнительного сопротивления – черная линия

{1 – 1}. Спрямленный профиль пути соответствует реальным условиям движения, а скорость плавно изменяется (синяя линия на рис. 2).

Баланс мощностей показан на рис. 6. Наибольшее значение мощности  $P_T$  в ре-

жиме тяги достигает 2900 кВт, в режиме электрического торможения – 1200 кВт. Работа на тягу поезда равна  $A_{T\{1-1\}} = 1864$  кВт·ч.

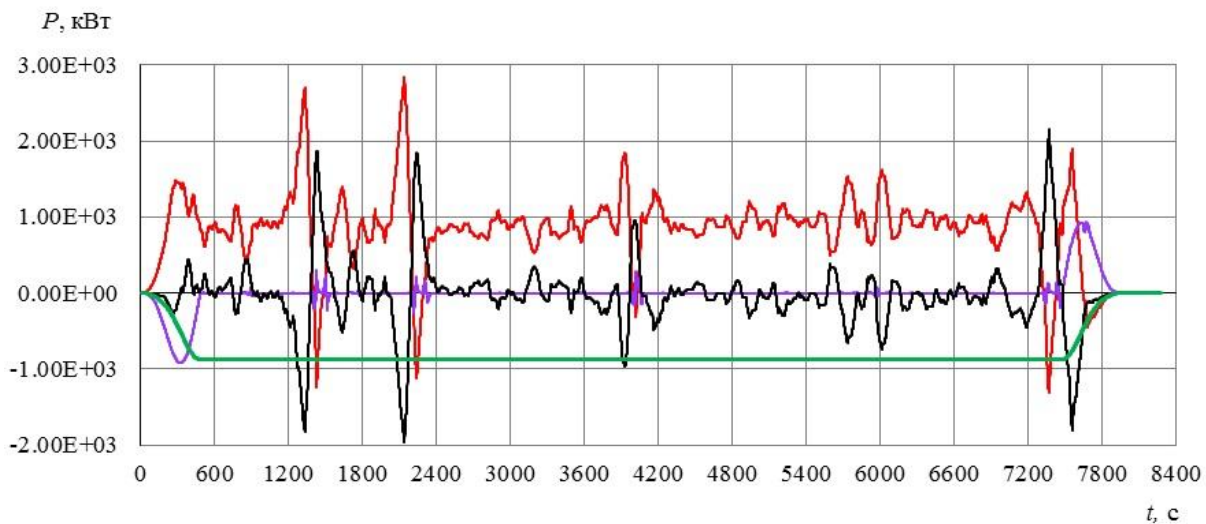


Рис. 6. Баланс мощностей в случае {1 – 1}: мощность на тягу – красная линия; мощность сил основного сопротивления – зеленая линия; мощность сил дополнительного сопротивления – черная линия; мощность сил инерции – фиолетовая линия

{1 – 2}. Этот случай соответствует реальной поездке. На рис. 7 показано сопоставление записи силы тяги по регистратору и по результатам моделирования

при  $1200 \leq t \leq 4800$  с, то есть в течение одного часа. Видим, что при моделировании вполне достоверно воспроизводится реальный процесс тяги.

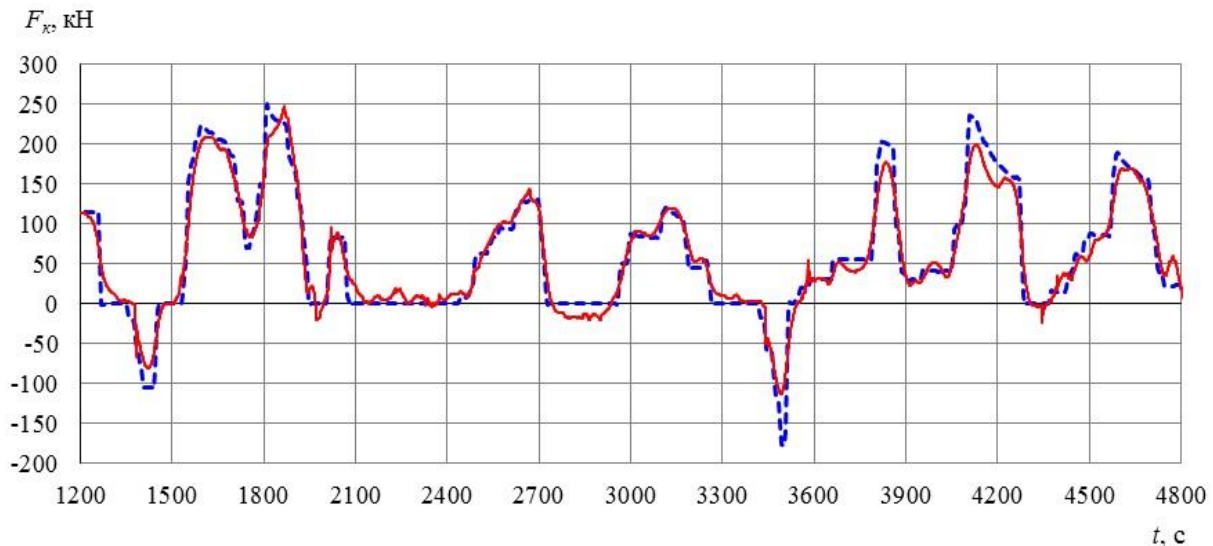


Рис. 7. Сила тяги электровоза: запись регистратора (синяя пунктирная линия) и по результатам моделирования (красная линия)

Баланс мощностей показан на рис. 8. Наибольшее значение мощности в режиме тяги достигает  $P_T = 4500$  кВт, в режиме электрического торможения — 3800 кВт.

Подчеркнем, что во всё время поездки электровоз работает в переменных режимах, его мощность остается постоянной только в течение нескольких минут.

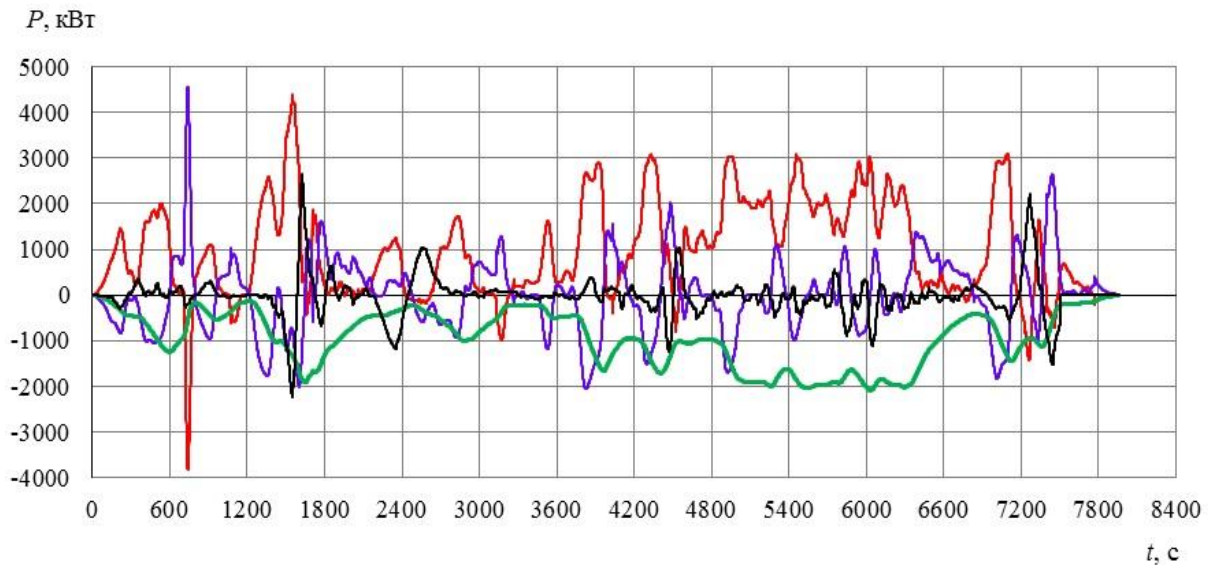


Рис. 8. Баланс мощностей в случае {1 – 2}: мощность на тягу – красная линия; мощность сил основного сопротивления – зеленая линия; мощность сил дополнительного сопротивления – черная линия; мощность сил инерции – фиолетовая линия

Согласно записям регистратора, работа электровоза на тягу поезда составила 2119 кВт·ч. При компьютерном моделировании, работа на тягу поезда оказалась равной  $A_{T\{1-2\}} = 2128$  кВт·ч. Таким образом, расхождение расчетных и экспериментальных результатов находится в пределах 1%.

Полученные значения удельной работы на тягу поезда (в абсолютных величинах и в процентах к случаю {0 – 0}) сведены в таблицу 3.

Сопоставим удельную работу на тягу поезда, приведенную в таблице 3, с целевым показателем удельного расхода электроэнергии 100,2 кВт·ч/изм. Поскольку работа на тягу поезда представляет собой



потребленную энергию, умноженную на коэффициент полезного действия, величина которого в различных условиях эксплуатации приведена в [6], приходим

к выводу о том, что достижение целевого показателя представляет собой крайне сложную задачу.

Таблица 3

Удельная работа на тягу поезда, кВт·ч / изм

$X_2 \backslash X_1$	0	1	2
0	76,3 (100%)	80 (105%)	91,6 (120%)
1	79,6 (104%)	83 (109%)	95 (125%)

### Заключение

Получены энергетические показатели работы грузового электровоза при заданном графике движения, но при разных законах изменения скорости и на различном профиле пути. Используются методы теории тяги поездов. Применение компьютерного моделирования позволило получить результаты, сопоставление которых с записями бортового регистратора показало практически полное совпадение.

Как и следовало ожидать, минимум работы, совершенной на тягу поезда, достигается в идеальном случае – при движении без остановок с постоянной скоростью по прямому горизонтальному профилю пути. При движении с постоянной скоростью по участку с реальным профилем, работа на тягу изменяется на величину, равную разности значений потенциальной энергии сил тяжести в начальной и конечной точках (также очевидный результат).

Частые разгоны и торможения приводят к возрастанию работы на тягу, здесь получены количественные оценки. Чтобы сократить нерациональный расход электрической энергии, необходимо по возможности избегать резких разгонов. Для поддержания равномерности движения целесообразно применение регулятора скорости [7].

Получены значения удельной работы на тягу поезда в различных случаях, которые обозначают пределы для целевого показателя по сокращению удельного расхода электроэнергии на тягу.

В настоящей статье рассмотрена поездка электровоза с порожним составом некоторой массы. Дальнейшие исследования должны принимать во внимание, кроме факторов  $X_1$  (профиль) и  $X_2$  (скорость), также фактор  $X_3$ , который учитывает различные варианты массы поезда.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика расчета индикатора энергоэффективности электровоза. Утверждено ОАО «РЖД» 26.12.2014, №519. Одобрено Научно-техническим советом ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», протокол № 3 от 11.12.2014. 29 с.
2. Кузьмич В.Д., Руднев В.С., Френкель С.Я. Теория локомотивной тяги / под ред. В.Д. Кузьмича. М.: Маршрут, 2005. 448 с.
3. Зарифьян А.А., Гребенников Н.В., Талахадзе Т.З., Сироткин В.В. Определение полезной работы, совершаемой локомотивом при тяге поезда // Вестник РГУПС. 2018. № 1. С. 40-49.
4. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» 12.05.2016. № 867р.
5. Программный комплекс Универсальный механизм (UM) предназначен для моделирования динамики и кинематики плоских и пространственных механических систем – URL: <http://www.universalmechanism.com> (дата обращения: 15.11.2019).
6. Зарифьян А.А. Показатели энергетической эффективности грузовых магистральных электровозов в различных условиях эксплуатации / Техника железных дорог. 2019. № 2 (46). С. 18-25.
7. Зарифьян А.А. Реализация регулятора скорости электровоза методами теории конечных автоматов // Вестник РГУПС. 2019. №3. С. 30-37.

tific-Technical Board of FSBEI HPE “Omsk State University of Railway Communications”, Transactions No. 3 of 11.12.2014. 29 p.

2. Kuzmich V.D., Rudnev V.S., Frenkel S.Ya. Theory of Locomotive Traction / under the editorship of V.D. Kuzmich. M.: Marshrut, 2005. 448 p.
3. Zarifiyan A.A., Grebennikov N.V., Talakhadze T.Z., Sirotkin V.V. Definition of useful work performed by locomotive at train hauling // Bulletin of RSURC. 2018. No.1. P. 40-49.
4. Rules of Traction Computations for Train Work. Confirmed by the order of PC "RRW", 12.05.2016. No. 867г.
5. Program Complex, Universal Mechanism (UM) Intended for Modeling of Dynamics and Kinematics of Flat and Spatial Mechanical Systems - URL: <http://www.universalmechanism.com> (address date: 15.11.2019).
6. Zarifiyan A.A. Power efficiency indices of freight main-line electric locomotives under different operation conditions / Railway Engineering. 2019. No. 2 (46). P. 18-25.
7. Zarifiyan A.A. realization of speed regulator of electric locomotive through methods of finite automatic device theory // Bulletin of RSURC. 2019. No. 3. P. 30-37.

Ссылка для цитирования:

Зарифьян А.А. Энергетический баланс при работе грузового электровоза // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 4. С. 21-30. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-4-21-30.

Статья поступила в редакцию 03.12.19

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Кобищанов В.В.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 26.03.20.

#### Сведения об авторах:

**Зарифьян Александр Александрович**, к.т.н., доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный универ-

**Zarifiyan Alexander Alexandrovich**, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. "Traction Rolling-Stock", FSBEI HE "Rostov State University of Railway Com-

ситет путей сообщения»; ведущий инженер КБ «Локомотивы» ООО «ТМХ-Инжиниринг», тел. +7 904 347 94 83, e-mail: [zar.plgrph@gmail.com](mailto:zar.plgrph@gmail.com).

munications"; Leading engineer of design office "Locomotives" of PC "TMH-Engineering", phone: +7 904 347 94 83, e-mail: [zar.plgrph@gmail.com](mailto:zar.plgrph@gmail.com).