

УДК 629.016

К вопросу о расчете дополнительного расхода энергоресурсов на осуществление нагона в пассажирском движении

К. М. ПОПОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Как показывает практика, существующий порядок нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на нагон недостаточно совершенен.

Применение существующих программных комплексов, реализующих тяговые расчеты, осложнено как их неиспользованием в действующей сетевой системе нормирования, так и отсутствием взаимодействия этой системы и источника необходимых исходных данных — бортовых систем регистрации.

С целью возможности задания теплотехником обоснованной нормы расхода ТЭР на нагон (до решения задачи интеграции централизованной системы обработки маршрутов машиниста (ЦОММ) и регистратора параметров движения и автоведения (РПДА)) предлагается для расчетов использовать классическое уравнение теории тяги, преобразованное таким образом, чтобы среди других исходных данных присутствовало время нагона.

Ключевые слова: нагон; нормирование; пассажирское движение; тяговый расчет; топливно-энергетические ресурсы

Введение. При нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов (далее — ТЭР) в пассажирском движении отдельно рассматривается составляющая этого расхода, связанная с нагоном опоздания. Данная величина определяется как дополнительная (пооперационная) норма и учитывается как для локомотивов, так и для моторвагонного подвижного состава (МВПС).

Как известно, нагон — это сокращение опоздания, допущенного не по вине локомотивной бригады, реализуемое при следовании поезда по участку. Опоздание может быть связано с задержкой отправления поезда с начальной или одной из промежуточных станций. При определении времени нагона не учитывается сокращение опоздания за счет уменьшения времени стоянок на станциях от определенного расписанием движения поезда, а также прибытие на станцию ранее времени, определенного расписанием [1].

Вполне очевидно, что затраты ТЭР на нагон определяются увеличением скорости движения поезда на определенном участке (участках) пути следования относительно скорости, заложенной в расписание.

Отметим, что пометки о наличии нагона и перегоне, на котором он осуществлен, указаны в маршруте машиниста, при этом время нагона рассчитывает

оператор центра оперативно-технического учета работы тягового подвижного состава (ЦОТУ), который производит обработку маршрута.

Время нагона как эксплуатационный фактор используется в ряде отчетных форм автоматизированной системы ЦОММ (централизованная обработка маршрутов машиниста). Для соответствующего увеличения расчетного расхода ТЭР по норме для выполненной поездки (право расхода) теплотехник должен задать норму расхода ТЭР на 1 мин нагона.

Значимым является тот факт, что в отчетных формах ЦОММ не указывается перегон, где осуществлялся нагон; время нагона приводится по маршруту машиниста в целом. Также на основе данных по маршрутам машиниста формируются суммарные значения времени нагона по участкам нормирования и выполненным поездкам.

Существующая ситуация с определением расхода энергоресурсов на нагон. Решить задачу расчета энергии на нагон на современном уровне призваны бортовые системы регистрации параметров движения, подобные РПДА (регистратор параметров движения и автоведения). Однако на данный момент отсутствует механизм поступления данных от РПДА в ЦОММ, а в локальных системах расшифровки РПДА в локомотивных депо расчет дополнительных затрат энергии на нагон поезда не производится.

Это можно объяснить не столь значительной величиной дополнительного расхода ТЭР на нагон (например, для электроподвижного состава в среднем около 10–20 кВт·ч на 1 мин нагона). По отношению к расходу за поездку это составляет, например, для участка длиной 300 км около 0,3–0,7%. Между тем суммарное время нагона в рамках участка нормирования за месяц, особенно в летний период, может достигать весьма значительных величин (табл. 1). Соответственно выделение из общего расхода ТЭР составляющей, связанной с нагоном, должно быть обосновано.

Из табл. 1 видно, что величина $e_{\text{наг}}$ в рассмотренном примере изменяется от 18,8 до 28,6 кВт·ч/мин, т. е. в 1,5 раза. Заметно влияние на данную величину суммарного времени нагона (при увеличении суммарного

■ E-mail: popov.kirill@vniizht.ru

Таблица 1

Данные о времени нагона и расходе электроэнергии на нагон
для участка Белгород — Орёл по данным системы ЦОММ

Table 1

Data on time make up and electric energy consumption to make up for
the Belgorod — Oryol section according to the data of RMPAD system

Период	Общее время на- гона, мин	Суммарный норма- тивный расход ТЭР на нагон, кВт·ч	Удельный расход электро- энергии на нагон $e_{\text{наг}}$, кВт·ч/мин, заданный теплотехником
12.2008	1283	27919	21,8
01.2009	998	25894	25,9
02.2009	702	16984	24,2
03.2009	962	22276	23,1
04.2009	2521	54203	21,5
05.2009	4267	80466	18,8
06.2009	7890	153608	19,5
12.2009	712	20485	28,6
01.2010	469	13123	28
02.2010	647	15450	23,9
03.2010	526	12014	22,8
04.2010	686	15611	22,8
05.2010	955	20317	21,3
06.2010	1182	29975	25,4
Среднее значение			23,4

времени нагона норма на нагон ниже). Видно и различие значений $e_{\text{наг}}$ по годам для аналогичных месяцев года — например, за июнь 2009 и 2010 гг. отличается на 30%.

Поскольку в настоящее время существует ряд программных продуктов, реализующих тяговые расчеты, вполне логично, используя их, произвести два варианта расчета для поездки с нагоном: первый с учетом движения пассажирского поезда по расписанию, второй — с учетом фактических режимов движения, включающих нагон опоздания. Если при этом остальные исходные данные для расчета принять неизменными, то разница расчетных значений расхода ТЭР покажет влияние нагона на энергетические затраты при движении поезда. При этом возможно будет учесть конкретный участок пути, где осуществлялся нагон.

Использование для целей расчета дополнительно-го расхода ТЭР на нагон программы энергооптимального тягового расчета [2] было осуществлено при выполнении работы [3]. В табл. 2 представлены результаты этого расчета, проведенного для участка, аналогичного указанному в табл. 1.

Из табл. 2 видно: расчетная величина $e_{\text{наг}}$, определенная как среднее для рассмотренных поездок (10,2 кВт·ч/мин), заметно отличается от принятой теплотехником величины в январе 2010 г. (28 кВт·ч/мин).

Однако следует признать, что существующие нормативные документы, касающиеся расчета норм расхода ТЭР на тягу поездов, ориентированы не на программные продукты, а на возможность проведения расчетов с помощью аналитических выражений, основанных на уравнениях теории тяги.

Очевидно, что определение нормы на нагон теплотехником нуждается в обосновании, при этом задача

Таблица 2

Результаты расчета расхода электроэнергии на нагон для поездов, следующих по расписанию поезда №18 на участке Белгород — Орёл

Table 2

Calculation results of electric energy consumption for time make up for the trains running on schedule of train No. 8 at the section Belgorod — Oryol

№ маршрута машиниста	Дата поездки	Число вагонов	Расход электроэнергии по энергооптимальному расчету, кВт·ч, при движении		Время нагона, мин	$e_{\text{наг}}$, кВт·ч/мин
			по расписанию	по времени из маршрута		
1076	01.01.2010	17	3902	3909	1	7
1098	02.01.2010	16	3866	3926	7	8,6
1175	04.01.2010	17	4064	4121	6	9,5
1269	05.01.2010	18	4253	4293	4	10
1326	07.01.2010	18	4253	4451	16	12,4
1527	11.01.2010	18	4102	4110	1	8
1581	12.01.2010	17	4064	4073	1	9
1408	09.01.2010	18	4102	4110	1	8
1754	16.01.2010	16	3866	4059	8	24,1
1822	17.01.2010	17	4064	4092	3	9,3
5050	22.01.2010	15	3684	3740	7	8
146	28.01.2010	14	3326	3332	1	6
5332	31.01.2010	15	3526	3726	15	13,3
Среднее значение						10,2

формализации расчетных зависимостей определения расхода ТЭР на нагон является актуальной.

Справедливости ради необходимо отметить, что порядок определения дополнительного расхода электроэнергии на нагон по разнице расчетных величин расхода для движения поезда по расписанию и с нагоном был оговорен еще во Временной инструкции по нормированию 1954 г. [4], однако в более поздних документах [5] не приводится и в настоящее время в действующем нормативном документе по анализу расхода ТЭР [6] отсутствует.

Формализация расчётной зависимости для определения расхода энергоресурсов на нагон. Используем известное уравнение, характеризующее удельный расход ТЭР, Вт·ч/(т·км), при движении поезда по определенному участку пути [7, выражение (13.17), дополненное выражением (13.19)]:

$$e = \frac{g(\omega_o + \omega_{i3})}{3,6\eta} + \frac{(1+\gamma)10,7}{1000S} \left(\frac{v_T^2}{\eta} + k_{\Pi} v_{\Pi}^2 \right) + \frac{P_{CH}}{(P+Q)v_{yч}}, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$); ω_o — среднее по всему участку значение основного удельного сопротивления движению поезда, Н/т; ω_{i3} — сопротивление движению поезда от среднего эквивалентного уклона, Н/т; η — средний коэффициент полезного действия двигателей; γ — безразмерный коэффициент инерции вращающихся колес; S — длина участка, пройденного поездом, км; v_T — скорость начала торможения поезда, км/ч; k_{Π} — безразмерный коэффициент пуска; v_{Π} — скорость окончания пуска, км/ч; P_{CH} — средняя мощность собственных нужд электровоза, Вт; P — масса локомотива, т; Q — масса состава, т; $v_{yч}$ — средняя участковая скорость, км/ч.

В выражении (1) каждая из трех составляющих — на преодоление сопротивления, на восстановление кинетической энергии после торможений и на собственные нужды локомотива — в разной степени зависит от времени движения.

Учитывая то, что скорость окончания пуска по данным маршрута машиниста определить невозможно, а также допуская, что пусковые потери при нагоне и без него будут равны, в дальнейших расчетах произведение коэффициента пуска на квадрат скорости пуска не учитываем. Также при дальнейших расчетах в качестве допущения вместо неизвестной скорости начала торможения будем использовать среднюю техническую скорость.

В дальнейшем учтем следующее:

- среднее удельное сопротивление движению поезда представляет собой средневзвешенное удельное сопротивление локомотива и состава вагонов:

$$\omega_o = \frac{\omega'_o P + \omega''_o Q}{P + Q}, \quad (2)$$

где ω'_o — среднее по всему участку значение основного удельного сопротивления движению локомотива, Н/т; ω''_o — среднее по всему участку значение основного удельного сопротивления движению состава вагонов, Н/т;

- известные выражения для определения основного удельного сопротивления движению локомотива и состава вагонов представим в виде, зависящем от времени движения:

$$\omega'_o = a_1 + a_2 \frac{S}{t_{ДВ}} + a_3 \frac{S^2}{t_{ДВ}^2}, \quad (3)$$

где a_1, a_2, a_3 — постоянные коэффициенты, определяемые согласно ПТР; $t_{ДВ}$ — время движения поезда по участку S , ч;

$$\omega''_o = b_1 + \frac{b_2 + b_3 \frac{S}{t_{ДВ}} + b_4 \frac{S^2}{t_{ДВ}^2}}{q_o}, \quad (4)$$

где b_1, b_2, b_3, b_4 — постоянные коэффициенты, определяемые согласно ПТР; q_o — средняя осевая нагрузка, т/ось;

- в связи с тем что количество остановок по расписанию в нашем примере для отдельных номеров поезда больше единицы, второе слагаемое выражения (1) умножим на количество остановок $n_{ост}$;

- техническую и участковую скорости также представим в известном виде, зависящем от времени:

$$v_{ТЕХ} = \frac{S}{t_{ДВ}}; \quad (5)$$

$$v_{yч} = \frac{S}{t_{ДВ} + t_{СТ}}, \quad (6)$$

где $t_{СТ}$ — общее время стоянок поезда на промежуточных станциях участка длиной S , ч.

Ранее отмечено, что расход ТЭР на нагон будет определяться разностью расходов, определенных выражением (1) для значений времени $t_{ДВ} - t_{Н}$ и $t_{ДВ}$, т. е.

$$e_{Н} = e(t_{ДВ} - t_{Н}) - e(t_{ДВ}), \quad (7)$$

где $t_{Н}$ — общее время нагона на участке длиной S , ч.

Раскроем выражение (7) с учетом (1) — (6) и в результате несложных преобразований получим расчетное выражение для определения удельного расхода электроэнергии на нагон:

$$e_{Н} = \frac{gS}{3,6(P+Q)\eta} \times \left(\left(Pa_2 + \frac{Q}{q_o} b_3 \right) \left(\frac{1}{t_{ДВ} - t_{Н}} - \frac{1}{t_{ДВ}} \right) + S \left(Pa_3 + \frac{Q}{q_o} b_4 \right) \times \right.$$

Таблица 3

Исходные данные по расчетному участку и серии локомотива

Table 3

Input data on calculating section and locomotive series

Параметр	Значение
Длина участка, км	315
Средний эквивалентный уклон, ‰	0,36
Серия локомотива	ЧС7
Расчетный номинальный КПД локомотива	0,9
Масса локомотива, т	172

Таблица 4

Исходные данные и результаты расчета расхода электроэнергии на нагон

Table 4

Input data and results of calculation electric energy consumption for time make up

Параметр	Данные по поездкам с №					
	8	10	18	20	26	144
Время движения поезда по расписанию, ч	5,18	4,42	4,75	4,23	4,53	4,98
Число стоянок на промежуточных станциях	2	1	1	1	1	8
Средняя масса поезда, т*	983	949	1037	795	786	810
Число поездок в январе 2010 г.	22	30	31	31	8	15
Расход электроэнергии на 1 мин нагона, кВт·ч	7	11	9	12	8	8
	Средневзвешенное значение — 9,6					

*С учетом разной составности поезда в отдельных поездках.

$$\times \left(\frac{1}{(t_{\text{дв}} - t_{\text{н}})^2} - \frac{1}{t_{\text{х}}^2} \right) + \frac{\eta_{\text{ост}}(1 + \gamma)10,7S}{1000\eta} \left(\frac{1}{(t_{\text{дв}} - t_{\text{н}})^2} - \frac{1}{t_{\text{х}}^2} \right) - \frac{P_{\text{сн}}t_{\text{н}}}{(P + Q)S}. \quad (8)$$

Очевидно, что факт зависимости расхода ТЭР на нагон от составности поезда и от расписания движения требует рассчитывать значение этого расхода для каждого номера поезда индивидуально.

Результаты расчета дополнительного расхода электроэнергии на нагон с помощью выражения (8) при исходных данных участка Белгород — Орёл (табл. 3) приведены в табл. 4 (значения расхода электроэнергии в киловатт-часах округлены до целого).

Среднее значение расчетного расхода электроэнергии на одну минуту нагона для поезда №18 — 9 кВт·ч/мин достаточно близко к результату 10,2 кВт·ч/мин, полученному ранее по результатам энергооптимальных тяговых расчетов (см. табл. 2), что указывает на сходимость результатов и возможность использования полученного расчетного выражения.

Выводы. 1. Существующий порядок определения дополнительного расхода ТЭР на осуществление нагона основан на эмпирической оценке данной величины теплотехником без подтверждения определенным расчетным методом. Это приводит к недостаточно достоверной оценке энергоемкости нагона и не позволяет обоснованно разрабатывать мероприятия по регулированию данного эксплуатационного фактора во взаимосвязи с другими факторами, характеризующими как выполнение графика движения поездов, так и связанный с этим расход ТЭР.

2. При наличии фактической скоростной траектории движения поезда рациональным способом определения дополнительного расхода ТЭР на осуществление нагона можно считать проведение вариантных энергооптимальных тяговых расчетов, как учитывающих непосредственные места нагона на участке следования. Такой порядок расчета может быть осуществлен на основе данных систем РПДА, однако для этого требуется специальная доработка существующих программ обработки данных этих систем с участием их разработчиков.

3. При расчете нагона по данным маршрутов машиниста в системе ЦОММ, т.е. при отсутствии данных о непосредственных местах нагона в поездке и соответствующей разбивки общего времени нагона по этим местам, рационально опираться на классические уравнения теории тяги, формализованные с учетом выделения времени нагона в числе других исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Басов Ю. М., Карцев Я. П., Лебедева И. М. Оплата труда железнодорожников. М.: Транспорт, 1973. 416 с.
- Мугинштейн Л. А., Илютович А. Е., Яблоко И. А. Энергооптимальные методы управления движением поездов: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2012. 80 с.
- Методика технического нормирования топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов на основе АРМ-Теплотехника: утв. старшим вице-президентом ОАО «РЖД» 21.11.2011 г. 50 с.
- Временная инструкция по техническому нормированию расхода энергии на электрическую тягу поездов. М.: Трансжелдориздат, 1954. 60 с.
- Молярчук В. С. Нормирование расхода электрической энергии на тягу поездов. М.: Трансжелдориздат, 1962. 60 с.
- Методика анализа и прогнозирования расхода ТЭР на тягу поездов: утв. старшим вице-президентом ОАО «РЖД» 26.12.2014 г., №512. М.: ОАО «РЖД», 2014. 47 с.
- Теория электрической тяги/ В. Е. Розенфельд [и др.]; под ред. И. П. Исаева. М.: Транспорт, 1995. 294 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Кирилл Михайлович,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник отделения «Тяга поездов, тяжеловесное движение и компьютерная оптимизация перевозочной работы железнодорожного транспорта», АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 23.10.2015 г., принята к публикации 11.01.2016 г.

On the question of calculating additional consumption of energy resources for the implementation of time make up in passenger traffic

K. M. POPOV

Joint Stock Company Railway Research Institute (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russian Federation

Abstract. The article discusses the features of definition of the energy component during time make up in passenger traffic. The total time of make up within the valuation section per month, especially in the summer, can reach very high values, therefore, segregation of energy component, associated with the make up, from total fuel consumption must be justified. This issue is also relevant in view of the fact that when rationing fuel and energy resources (FER) in passenger traffic component of consumption associated with time make up is considered alone. Thus network automated system for centralized processing of driver's routes (CPDR), with which the valuation is made, based on the processing of driver's routes, where a set of data on completed trips is limited.

Determination of FER consumption for time make up with the use of software products that implement traction calculations requires actual speed data path in this trip. On-board system of registration of motion parameters, such as RMPAD (recorder of motion parameters and automatic driving) can act as the source of such data. However, there is currently no mechanism of data provision from RMPAD in CPDR, and in local RMPAD decryption systems in calculation of additional energy consumption for locomotive depot with time make up is not possible.

To allow heating engineer set reasonable norms of fuel and energy resources for make up before solving the problem of integration of CPDR and RMPAD it is proposed for calculations to use the classical equation of the theory of traction, converted so that make up time could be among other input data.

Keywords: time make up; rationing; passenger traffic; traction calculation; fuel and energy resources

REFERENCES

1. Basov Yu. M., Kartsev Ya. P., Lebedeva I. M. *Oplata truda zheleznodorozhnikov* [Labour payments for railman]. Moscow, Transport Publ., 1973, 416 p.

■ E-mail: popov.kirill@vniizht.ru (K. M. Popov)

2. Muginshtein L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem poezdov*. Sb. nauch. tr. OAO "VNIIZhT" [Energy optimal methods for train motion control. Coll. sci. works of JSC "VNIIZhT" (Railway Research Institute)]. Moscow, Intext Publ., 2012. 80 p.

3. *Methods of technical regulation of fuel and energy resources for train traction based on ARM-Heat engineering*, approved by the order of JSC "Russian Railways" on November 21, 2011. 50 p. (in Russ.)

4. *Vremennaya instruktsiya po tekhnicheskomu normirovaniyu raskhoda energii na elektricheskuyu tyagu poezdov* [Temporary instruction on technical regulation of energy consumption for electric traction power]. Moscow, Transzheldorizdat, 1954, 60 p.

5. Molyarchuk V. S. *Normirovanie raskhoda elektricheskoy energii na tyagu poezdov* [Rationing of electrical energy consumption for train traction]. Moscow, Transzheldorizdat, 1962, 60 p.

6. *Methods of analysis and forecasting of consumption of energy resources for train traction*, approved by the order of JSC "Russian Railways" on December 26, 2015. №512r. 47 p. (in Russ.)

7. Rozenfel'd V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N., Ozerov M. I. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Theory of electric traction]. Moscow, Transport Publ., 1995, 294 p.

ABOUT THE AUTHOR

POPOV Kirill Mikhaylovich,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Department "Train traction, heavy haul transport and computer optimization of railway operations", JSC "VNIIZhT"

Received 23.10.2015

Accepted 11.01.2016

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Дыдышко П. И. Земляное полотно железнодорожного пути. Справочник: науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2014. 416 с.

Изложены справочные данные и научное обоснование обеспечения стабильности земляного полотна железнодорожного пути, включая инновационные решения, на основе исследований процессов тепломассопереноса в грунтах. Представлено неизвестное ранее термоэлектрокинетическое явление, обуславливающее перенос влаги в капиллярных анизотермических системах, который

Косарев А. Б., Косарев Б. И., Сербиненко Д. В. Электромагнитные процессы в системах энергоснабжения железных дорог переменного тока. М.: ВМГ-Принт, 2015. 349 с.

Изложены методы анализа электромагнитных процессов в современных системах тягового электроснабжения и их влияние на электроустановки и электрические сети магистральных железных дорог. Обоснованы методы расчета нестационарных, в том числе и грозовых, режимов в сложных и неоднородных нелинейных цепях с переменной структурой, при представлении элементов цепи в виде линий с распределенными параметрами, носящими вероятностный характер. С привлечением методов линейной алгебры и теории многополосников рассмотрены матричные методы анализа энергетических соотношений в современных системах тяго-

влияет на несущую способность и устойчивость основания пути. Материалы справочника включают в себя порядок проведения инженерных изысканий, методы расчетов, конструкции земляного полотна новых линий, дополнительных главных путей и усиления (реконструкции) эксплуатируемых линий. Рассмотрены объекты в различных инженерно-геологических условиях. Приведены порядок содержания земляного полотна, правила приемки объектов в эксплуатацию и правила охраны окружающей среды.

вого электроснабжения при учете несинусоидального характера токов электропоездов. Основные технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения защищены авторскими свидетельствами и патентами на полезную модель.

Предназначена для научных работников, аспирантов. Может быть полезна инженерам-электрикам, а также студентам электротехнических специальностей высших транспортных учебных заведений.

По вопросам предварительного заказа на приобретение книг обращайтесь в редакционно-издательский отдел АО «ВНИИЖТ», тел. (499) 260-43-20.