

УДК 621.33

**POSSIBLE WAYS OF ELECTRIC TRAIN ENERGY CONSUMPTION
DECREASE AT FLAT PROFILE OF WEST SIBERIAN RAILWAY
ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ТЯГУ
ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ В УСЛОВИЯХ РАВНИННОГО ПРОФИЛЯ ЗАПАДНО-
СИБИРСКОЙ Ж.Д.**

Klimovich A.V. / Климович А.В.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

Petrov I.I. / Петров И.И.

c.t.s., as.prof. / к.т.н., доц.

Omsk State Transport University, Omsk, Marx st. 35, 644046

Омский государственный университет путей сообщения, Омск, ул. К. Маркса 35, 644046

Аннотация. В статье рассматриваются возможности снижения энергозатрат на тягу при движении электропоездов в условиях равнинного профиля Западно-Сибирской железной дороги за счет отключения тяговой секции электропоезда и рационального распределения времени хода по всему направлению движения.

Для определения потенциальных возможностей снижения энергозатрат на тягу при управлении движением электропоезда проанализирована конкретная поездка электропоезда ЭД4М по маршруту Омск – Иртышская. Приводятся расчетные графики движения электропоезда в рассматриваемой поездке, а также с отключением одной тяговой секции. На основании данных о расходе электроэнергии в целом по депо ТЧ-31 Омск определяется возможная экономия энергозатрат на тягу за счет применения предложенных способов.

Ключевые слова: энергозатраты электропоезда, график движения, сопротивление движению поезда, режимы работы локомотива, отключение тяговых электродвигателей.

Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 г. предполагает создание интеллектуальной системы железнодорожного транспорта. Согласно данной стратегии локомотивы оборудуются системами автоматического ведения поезда, автоматического определения технического состояния подвижного состава, системами передачи информации в режиме реального времени о фактическом состоянии локомотива и рядом других. Необходимость совершенствования систем управления поездом обусловлена требованиями не только точности исполнения расписания движения поездов, но и внедрения ресурсосберегающих технологий.

При анализе движения рельсового транспортного средства массой m по участку между станциями N и M длиной l_{NM} заданного произвольного плана и профиля и перегонного времени хода t_{MN} [1, 2] была получена целевая функция, которую необходимо минимизировать для снижения энергозатрат на тягу:

$$J = \frac{gm(\omega(M_s[v]) + c_\omega D_s[v])l_{NM}}{\eta_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где $\omega(v) = a_\omega + b_\omega v + c_\omega v^2$ – зависимость основного удельного сопротивления движению поезда от скорости; a_ω , b_ω , c_ω – постоянные коэффициенты; g – ускорение свободного падения; $M_s[v]$ и $D_s[v]$ – соответственно математическое ожидание и дисперсия скорости движения поезда, полученные в результате математической обработки графика его движения по участку $v = f(s)$; $\eta_{\text{ср}}$ – средневзвешенный коэффициент полезного действия локомотива при движении поезда по всему рассматриваемому участку.

Подробный анализ приведенной целевой функции выполнен в работе [3]. Здесь же отметим, что числитель выражения (1) представляет собой расчетное значение полезной работы, выполненной поездом при перемещении груза из пункта N в пункт M в рассматриваемой поездке. Заметим также, что приведенная целевая функция обязательно имеет минимум для некоторых заранее заданных условий выполнения поездки. Очевидно, что максимальные значения функция будет иметь в двух случаях. Во-первых, если установленное время хода поезда по рассматриваемому участку будет минимально возможным. Здесь возможен только один график движения, когда на станции отправления поезд будет разгоняться до максимально допустимой скорости с максимальным ускорением, реализуемым при полном использовании мощности локомотива и максимальном коэффициенте сцепления колес локомотива с рельсом. Далее до станции прибытия должна поддерживаться максимально допустимая скорость движения, а торможение при остановке поезда должно выполняться с максимально допустимым замедлением.

Другим предельным случаем, приводящим к максимальному значению рассматриваемой функции, следует считать движение по участку за время,

стремящееся к бесконечности. Теоретически это соответствует, например, движению по участку в течение недели, месяца, года. Полезная работа, выполненная при перемещении поезда в этих случаях, будет примерно одинаковой. Но энергозатраты на собственные нужды локомотива начнут стремительно возрастать.

Поиск оптимального по энергозатратам на тягу режима управления движением рельсового транспортного средства с использованием приведенной целевой функции должен выполняться в результате сравнения нескольких графиков его движения по участку $v = f(s)$, отвечающих двум обязательным требованиям. Во-первых, пройденный поездом путь во всех рассматриваемых графиках движения должен быть одинаков с учетом заранее заданной погрешности вычислений (например, ± 100 метров). Во-вторых, время хода поезда по участку должно быть неизменным (допустимой погрешностью следует считать отклонение на ± 10 секунд). В противном случае сравнение энергозатрат на тягу в анализируемых графиках движения будет математически не корректным.

Наиболее удобно выполнять анализ нескольких графиков движения поезда по участку $v = f(s)$, если для их расчета и построения используется аналитический метод решения дифференциального уравнения движения поезда [4]. Это возможно, если все тяговые характеристики локомотива на возможных позициях контроллера машиниста, а также тормозные характеристики при рекуперативном, реостатном либо пневматическом торможениях аппроксимировать квадратными трехчленами, подобными зависимости основного удельного сопротивления движению поезда от скорости.

В соответствии с приведенной целевой функцией минимальные энергозатраты на тягу любого рельсового транспортного средства могут быть достигнуты, если, во-первых, добиться минимума дисперсии скорости поезда $D_s[v]$ в его графике движения по участку $v = f(s)$. Это возможно, если машинист выбирает так называемую «ровную езду», когда скорость поезда незначительно отклоняется от средней ходовой скорости по участку, а разгон и торможение

выполняются с максимальным комфортным ускорением (замедлением). Во-вторых, необходимо выбирать режимы работы локомотива, обеспечивающие максимальное значение его средневзвешенного коэффициента полезного действия [3, 5].

Рассматривая с представленной точки зрения возможности снижения энергозатрат на тягу при движении электропоездов в условиях равнинного профиля Западно-Сибирской железной дороги, отметим следующее. Мощность тяговых двигателей электропоезда такова, что даже при полной загрузке он достаточно быстро разгоняется до ходовой скорости, требуемой для прохождения участка пути между остановочными пунктами за время, предписанное расписанием движения. Однако теоретически оптимальный график движения (на рис. 1 показан под номером 1), характеризующийся поддержанием этой скорости на всем межостановочном участке пути постоянной, по известным техническим причинам невозможен. Поэтому для электропоездов становится оптимальным так называемый «пилообразный» график движения, характеризующийся чередованием режимов разгона и выбега (на рис. 1 показан под номером 2).

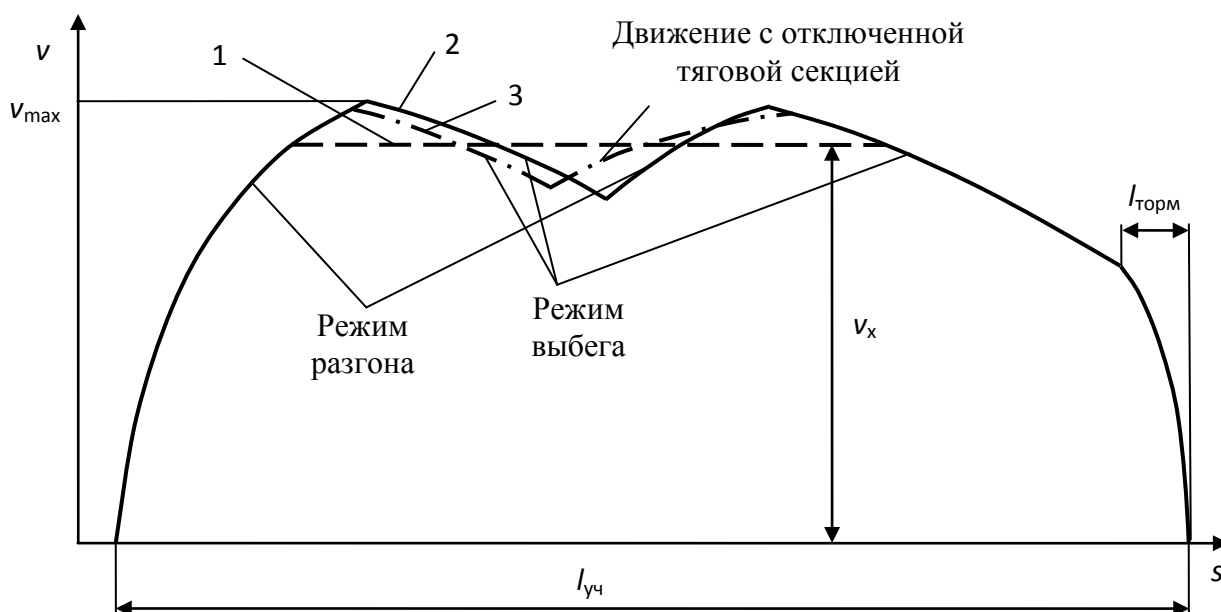


Рис. 1. Оптимальные графики движения электропоезда

Зависимость КПД любого тягового двигателя, в том числе электропоезда, от потребляемого тока всегда имеет явно выраженный максимум при номинальных режимах работы (рис. 2). Система управления электропоезда обычно настраивается таким образом, чтобы во время его разгона после отправления со станции N ток тяговых двигателей соответствовал зоне максимальных значений КПД (зона 1 на рис. 2). При этом потребляемая энергия расходуется, во-первых, на преодоление сопротивления движению поезда и, во-вторых, на создание требуемой кинетической энергии. После разгона для поддержания требуемой ходовой скорости электропоезда на равнинных участках пути ток тяговых двигателей существенно снижается, так как при этом энергия расходуется только на преодоление сопротивления движению (зона 2 на рис. 2). В результате КПД электропоезда также заметно снижается.

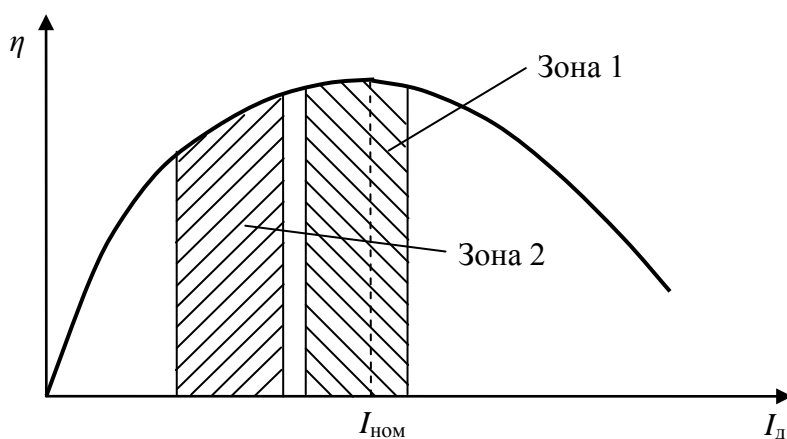


Рис. 2 Зависимость КПД тягового двигателя от тока

Следовательно, для снижения энергозатрат на тягу целесообразным становится отключение одной из трех тяговых секций электропоезда, обеспечивая поддержание скорости, близкой к требуемой ходовой, двумя секциями. В этом случае уменьшение затрат энергии на перемещение поезда будет происходить по двум причинам. Во-первых, уменьшается дисперсия скорости поезда $D_s[v]$ в его графике движения (на рис. 1 показан под номером 3), а, следовательно, и полезная работа при его перемещении. Во-вторых, увеличивается нагрузка на тяговые двигатели оставшихся в работе двух тяговых секций электропоезда. При этом ток двигателей становится близким к

$I_{\text{ном}}$ (зона 1 на рис. 2), а КПД возрастает. Ожидаемое снижение энергозатрат на тягу составляет 3-4 % от потребления энергии при существующем режиме вождения электропоездов.

Для определения потенциальных возможностей снижения энергозатрат на тягу при управлении движением электропоезда с отключенной тяговой секцией проанализирована конкретная поездка электропоезда ЭД4М по маршруту Омск – Иртышская, выполненная 1 мая 2017 года. Рассматривался наиболее протяженный межстаночный перегон, длина которого составляет 17,9 км. Электропоезд проследовал по перегону за 18,75 минуты. При этом затраты электроэнергии на тягу составили 80,25 кВтч.

Первоначально выполнено моделирование движения электропоезда с помощью известной системы компьютерного моделирования. Использовалась аналитическая методика выполнения тяговых расчетов, согласно которой тяговые характеристики электропоезда аппроксимировались квадратными трехчленами. Длина пути, пройденная электропоездом по представленному графику движения, составляет 17,85 км, а расчетное время хода по перегону равно 18,7 минуты. Таким образом, погрешность расчета по пути и по времени не превышает 0,3 %. Для расчетного графика движения определены средняя по пути скорость электропоезда и дисперсия скорости по пути, которые составили соответственно 64,44 км/ч и 375,6 км²/ч².

Расчетный график движения электропоезда по рассматриваемому перегону с одной отключенной тяговой секцией имеет следующие параметры: пройденный электропоездом путь 17,97 км, время хода 18,4 минуты.

В данном случае разгон электропоезда выполняется в том же тяговом режиме, что и на реальном графике (позиция М до 20 км/ч, позиция П1 до максимальной скорости). Отличается максимальная скорость разгона: на реальном графике 83 км/ч, на расчетном с отключенной тяговой секцией 64,4 км/ч. Снижение максимальной скорости движения представилось возможным добиться благодаря исключению длительного во времени подъезда к конечной станции чередованием режимов торможения и выбега.

Требуемая средняя ходовая скорость движения электропоезда по перегону на расчетном графике достигается чередованием режимов выбега и тяги на позиции 2 (П2). Торможение на расчетном графике движения до скорости 40 км/ч рекуперативное, а затем пневматическое. В результате средняя по пути скорость электропоезда и дисперсия скорости по пути составили соответственно 56,77 км/ч и 64,97 км²/ч².

Расчетные энергозатраты в графике движения с отключенной тяговой секцией составили 64,8 кВтч, что на 19,25 % меньше реального. Для выявления составляющей снижения энергозатрат за счет отключения тяговой секции дополнительно был рассчитан график движения без отключения тяговой секции, но исключая длительный торможение на конечной станции. Расчетные значения средней по пути скорости электропоезда и дисперсии скорости по пути составили соответственно 57,857 км/ч и 157,7 км²/ч². Расчетные энергозатраты в этом случае составили 68,7 кВтч, что на 14,6 % меньше реального.

Таким образом, на расчетном межостановочном перегоне 131 км – Иртышская снижение расхода электроэнергии за счет отключения одной тяговой секции составляет 4,65 %. Экономия энергозатрат величиной в 14,6 % может быть достигнута благодаря использованию системы автоведения поезда. Как отмечают практически все эксплуатирующие специалисты, основным достоинством данной системы является способность определения требуемой ходовой скорости из условия заданного прибытия электропоезда на конечную станцию.

Следует отметить, что на всем направлении движения электропоезда в исследуемой поездке Омск – Иртышская имеется 21 межостановочный перегон. Только на девяти из них машинист несколько превысил требуемую ходовую скорость, что потребовало несколько замедлить прибытие на остановочный пункт. Причем эти ошибки машиниста были существенно меньше по сравнению с рассмотренным перегонем, так как длина остальных перегонов

меньше. На перегонах длиной 1,5 – 2,5 км такие ошибки практически исключены.

Улучшить график движения по коротким перегонам на равнинном участке пути, где кроме позиции П1 другие позиции контроллера машинист не может использовать, система автоведения не способна. В результате в общей величине затрат электроэнергии непосредственно на тягу по всему направлению Омск – Иртышская, которые в рассматриваемой поездке составили 1143,75 кВтч, доля экономии энергозатрат, получаемая благодаря использованию систем автоведения существенно снижается. Расчеты показали, что в анализируемой поездке исключение ошибок машиниста при выборе поддерживаемой ходовой скорости для обеспечения заданного времени прибытия электропоезда на остановочные пункты позволяет экономить примерно 69,8 кВтч, т.е. 6,1 % затрат электроэнергии непосредственно на тягу.

Отключение одной тяговой секции из трех на рассматриваемом направлении движения Омск – Иртышская оказывается эффективным на 15-ти межостановочных перегонах из 21. В результате общая эффективность рассматриваемого режима управления также несколько уменьшается, но остается все же ощутимой. По всему направлению движения расчетная экономия электроэнергии составила 48 кВтч или 4,2 % затрат электроэнергии непосредственно на тягу.

Имеется еще одна возможность снижения общих затрат электроэнергии на тягу в рассматриваемой поездке. Она заключается в рациональном распределении времени хода электропоезда по всему направлению движения из условия сохранения времени его прибытия на конечную станцию. Так как основное сопротивление движению пропорционально квадрату скорости движения, затраты электроэнергии на тягу также зависят от квадрата скорости. Поэтому уменьшение максимальной скорости на некоторых перегонах даст существенную экономию энергозатрат. Расчетная экономия расхода электроэнергии на тягу в рассматриваемой поездке при рациональном времени

хода электропоезда по отдельным перегонам составила 37,4 кВтч или 3,3 % затрат электроэнергии непосредственно на тягу.

Таким образом, суммарный резерв экономии затрат электроэнергии на тягу за счет применения режима отключения одной тяговой секции и перераспределения времен хода по отдельным межстаночным перегонам составляет 82,7 кВтч на одну поездку (7,5 % затрат электроэнергии непосредственно на тягу).

Для расчета возможной экономии электроэнергии по всему моторвагонному депо ТЧ-31 Омск за счет применения режима отключения одной тяговой секции и перераспределения времен хода по отдельным межстаночным перегонам будем исходить из предположения, что величина возможного снижения энергозатрат не зависит от типа электроподвижного состава, что вполне оправдано, так как на всех электропоездах доля мощности тяговых двигателей, приходящаяся на единицу массы, примерно одинакова. Определим величину затрат электроэнергии в целом по депо, израсходованных в первом полугодии 2017 года непосредственно на тягу. Расчет приводится в табл. 1.

Таблица 1

Расход электроэнергии непосредственно на тягу

| | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь |
|--|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Расход электроэнергии по счетчикам ЭПС, кВтч | 1 675 692 | 1 381 699 | 1 257 404 | 1 163 324 | 1 096 432 | 1 059 949 |
| Доля затрат электроэнергии на тягу, % | 55,6 | 58 | 63 | 71 | 81,5 | 94,8 |
| Затраты электроэнергии на тягу, кВтч | 931 685 | 801 385 | 792 165 | 825 960 | 893 592 | 1 004 832 |
| Суммарные затраты электроэнергии на тягу, кВтч | 5 249 618 | | | | | |
| | в пригородном движении | | | 4 288 938 | | |
| | в пассажирском движении | | | 866 187 | | |

Учитывая примерно одинаковые технические условия выполнения поездной работы электропоездов на Омском отделении Западно-Сибирской железной дороги в пригородном и пассажирском движении с точки зрения возможности использования режима их вождения с отключением одной тяговой секции при поддержании требуемой ходовой скорости, экономию электроэнергии, расходуемой на тягу определим для суммарных энергозатрат: $5\,249\,618 * 0,042 = 220\,484$ кВтч.

Экономия расхода электроэнергии на тягу при рациональном распределении времени хода электропоездов по отдельным перегонам возможна только в пригородном движении: $4\,288\,938 * 0,033 = 141\,535$ кВтч. Суммарная экономия составляет 362 019 кВтч, что при стоимости электроэнергии 2,05 рубля за 1 кВтч составляет 742 тыс. рублей.

Литература:

1. Пат. № 2237589 РФ, МПК В 61 L 27/00. Способ выбора наиболее экономичного режима движения поезда на заданном участке пути / А. В. Климович, В. Д. Авилов (РФ). – № 2003121717/11; Заявлено 13.07.2003; Опубл. 10.10.2004. Бюл. № 28.
2. Климович А. В. Метод поиска оптимального по энергозатратам графика движения поезда / А. В. Климович // Вестник Томского гос. ун-та. Общenaуч. периодич. журнал. Бюл. оперативной науч. информации. № 32. Июль 2004. С. 78-83.
3. Климович А. В. Оптимизация управления движением поезда по минимуму затрат энергоресурсов на тягу (монография) / А. В. Климович. М.: Компания Спутник+, 2008. 263 с.
4. Климович А.В. Аналитический метод решения дифференциального уравнения движения поезда / А.В. Климович // Изв. вузов. Электромеханика. 2006. № 2. С. 52-54.
5. Климович А. В. Построение оптимального графика движения поезда по заданному участку при помощи целевой функции / А. В. Климович, А. А. Кообар, А. В. Харламова // Омский научный вестник. Омск: 2006, № 9 (46), декабрь. С. 88-91.

Abstract. In article the possibilities of decrease in energy consumption on draft at the movement of electric trains in the conditions of a flat profile of West Siberian Railway due to shutdown of traction section of an electric train and rational distribution of time of the course in all direction of the movement are considered.

During the calculating and creation of schedules of the train for site $v = f(s)$ is used an analytical method of the solution of the differential equation of the movement of the train. For the

analysis of optimum schedules of the train at each stage of their modeling an inspection of calculations which allows to guarantee reliability of the received results is carried out.

For definition of potential opportunities of decrease in energy consumption on draft at traffic control of an electric train the concrete trip of an electric train of ED4M along a route Omsk – Irtyshskaya is analysed. Settlement schedules of an electric train are provided in the considered trip, and also with shutdown of one traction section. Average is defined by standard means of system of computer modeling on the way the electric train speed, dispersion of speed on the way, energy consumption. The received size of energy consumption for draft with the disconnected traction section is much less than energy consumption on a real trip. Rational distribution of time of the course of the electric train in all direction of movement from a condition of preserving time of its arrival also allows to reduce an electric power expense on draft by the terminal station.

Based on consumption data of the electric power in general possible economy of energy costs on draft due to application of the offered methods is determined by Omsk TCh-31 depot.

Key words: *electric train energy consumption, train schedule, resistance to the movement of the train, operation modes of the locomotive, disconnection of traction motors.*

References:

1. Klimovich A. V., Avilov V. D. Patent RU 2237589 B 61 L 27/00 10.10.2004.
2. Klimovich A. V. Method of search of the trains schedule, optimum on energy consumption [Metod poiska optimalnogo po energozatratam grafika dvizheniya poezda]. *Vestnik Tomskogo gos. universiteta – Journal of Tomsk state university*, 2004, no. 32, pp. 78 – 83.
3. Klimovich A. V. *Optimizaciya upravleniya dvizheniem poezda po minimumu zatrat energoresursov na tyagu* (Optimization of traffic control of the train on a minimum of costs of energy resources for draft). Moscow: Company Sputnik+, 2008, 263 p.
4. Klimovich A. V. Analytical method of the solution of the differential equation of the movement of the train [Analiticheskij metod resheniya differencialnogo uravneniya dvizheniya poezda]. *Izvestiia vuzov Elektromehanika – The journal of Electromechanics Studies*, 2006, no. 2, pp. 52 – 54.
5. Klimovich A. V., Koobar A. A., Kharlamova A. V. Creation of the optimum schedule of the train on the set site by means of criterion function [Postroenie optimalnogo grafika dvizheniya poezda po zadannomu uchastku pri pomoschi celevoi funkicii]. *Omskii nauchnij vectnik – The journal Omsk scientific bulletin*, 2006, no. 9 (46), pp. 88 – 91.

Статья отправлена: 09.06.2018 г.

© Климович А.В.