

УДК 681.513

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, А.Р. Гайдук, В.А. Шевченко**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОМ
В УСЛОВИЯХ НЕОДНОРОДНОСТИ ПРОФИЛЯ ПУТИ***

Рассматривается проблема планирования движения электропоезда, обеспечивающего снижение энергопотребления тягового электропривода при заданном профиле пути, состоящем из различных комбинаций спусков и подъемов. Основываясь на общем подходе, состоящем в идее поддержания не мгновенной, а средней скорости, решается задача энергосберегающего планирования движения в зависимости от профиля пути. Состоятельность предложенного подхода демонстрируется на численных примерах. На базе представленных алгоритмов может строиться система автоматизированного планирования и управления движением электропоезда.

Электропоезд; энергосбережение; управление движением.

V.Kh. Pshikhopov, M.Yu. Medvedev, A.R. Gaiduk, V.A. Shevchenko**POWER SAVING CONTROL OF AN ELECTRIC TRAIN
IN THE CONDITIONS OF HETEROGENEITY OF A TRACK PROFILE**

In the work a problem of planning of movement of the electric train, capable to reduce power consumption of the traction electric motor at movement of a train along the set track profile consisting of various combinations of descents and liftings are considered. The equations for calculation optimum from the point of view of power consumption of parameters of movement depending on a track profile are resulted. The solvency of models is shown on numerical examples. On the basis of the presented calculations algorithms of traffic control of an electric train are under construction.

Electric train; the power savings; movement control.

Введение. Железные дороги являются энергоэффективным видом транспорта благодаря таким преимуществам, как низкий коэффициент трения между колесом и рельсом, использование электрической тяги с возможностью возврата в сеть рекуперированной энергии, возможность регулирования провозной способности в зависимости от спроса за счет изменения составности пассажирских поездов. Кроме того, железные дороги представляют собой вид транспорта, пригодный для применения компьютеризированных систем управления движением.

Основным направлением мероприятий по снижению потребления энергетических ресурсов является совершенствование конструкций инфраструктуры и подвижного состава, а также методов управления движением [1]. В данной работе рассматриваются модели энергоэффективного управления электропоездом в зависимости от изменения профиля пути, на базе которых можно построить алгоритмы управления движением. Развитие технических средств позволяет повысить уровень автоматизации, в связи с чем имеется возможность использовать для управления электропоездами современные методы управления [3–5], включая методы оптимального управления [6–8].

Показатель энергетической эффективности тяги поездов в границах участка железной дороги является одним из элементов, на которых основывается планирование, контроль и управление потреблением электроэнергии. При контроле сравнивается текущее значение показателя за фиксированный интервал времени с

* Работа поддержана грантом РФФИ №12-08-13112 офи_м_РЖД «Разработка методов оптимизации энергопотребления электропоездов в динамических режимах на базе комплексной системы управления движением и энергоснабжением».

нормативным значением [9]. В [2] рассмотрен один из вариантов профиля пути. Необходимость рассмотрения других профилей заключается в различном распределении энергии, преобразующейся из кинетической в потенциальную, от чего зависит изменение скорости подвижного состава.

Расчет планируемой скорости. Согласно [2] при прохождении криволинейных планов для снижения энергопотребления необходимо изменять мгновенную скорость, поддерживая среднюю скорость постоянной. Рассмотрим различные варианты профилей пути. На рис. 1 представлен первый рассматриваемый профиль пути.

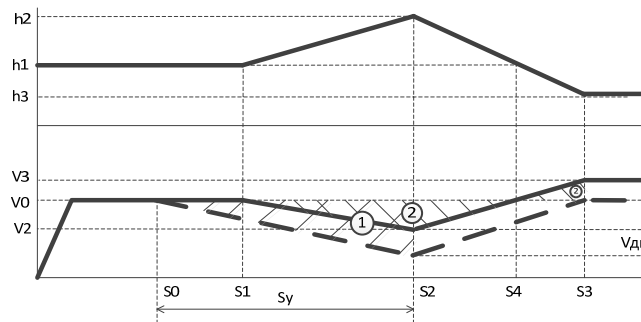


Рис. 1. Профиль пути 1

В соответствии с [2] необходимо разогнать поезд до подъема до скорости, достаточной для преодоления вершины пути и разгона до скорости V_0 под действием потенциальной энергии при движении на участке S2-S3. Если выполнено $V_0 > \sqrt{2gh_2}$, то необходимо понизить скорость поезда для того, чтобы скорость в точке S3 была приближена к V_0 .

Скорость поезда в точке S2 определяется выражением

$$V_2 = \sqrt{V_0^2 - 2g(h_2 - h_1)}. \quad (1)$$

Скорость поезда в точке S3:

$$V_3 = \sqrt{V_2^2 + 2gh_2}. \quad (2)$$

Подставим (1) в (2) и выразим V_3 через V_0 :

$$V_3 = \sqrt{V_0^2 + 2gh_1}. \quad (3)$$

Найдем выражение для S_y – расстояния до вершины, в начале которого нужно начать торможение. Для этого приравняем площади P_y и P_n , отмеченные на рис. 1 цифрами 1 и 2.

$$P_y = P_n. \quad (4)$$

Найдем P_y и P_n :

$$P_y = \frac{1}{2} V_{дп} S_y, \quad (5)$$

$$P_n = \frac{1}{2} (S_2 - S_1)(V_0 - V_2) + \frac{1}{2} (S_4 - S_2)(V_0 - V_2) + \frac{1}{2} (S_3 - S_4)(V_3 - V_0). \quad (6)$$

Величину $V_{дп}$ можно выразить как функцию средней скорости и ускорения:

$$V_{дп} = V_0 - \sqrt{V_0^2 - 2\alpha S_y}. \quad (7)$$

Также необходимо, чтобы величина, на которую понизилась начальная скорость при подъеме, равнялась величине, на которую скорость увеличивается при спуске на участке S4-S3:

$$V_0 - \sqrt{V_0^2 - 2\alpha S_y} = V_3 - V_0. \quad (8)$$

С учетом (7) и (8) преобразуем (5) к виду

$$P_y = \frac{1}{2}(V_3 - V_0)S_y. \quad (9)$$

Тогда, приравняв (9) и (6), получим

$$S_y = [V_0(2S_4 - S_1 - S_3) + V_2(S_1 - S_4) + V_3(S_3 - S_4)]/(V_3 - V_0). \quad (10)$$

Теперь из (8) выразим ускорение на участке S0-S1 α :

$$\alpha = \frac{4V_0V_3 - V_3^2 - 3V_0^2}{2S_y}. \quad (11)$$

Рассмотрим численный пример. $S_1=2000$, $S_2=2300$, $S_4=2400$, $S_3=2500$, $V_0=40$ м/с, $h_1=15$ м, $h_2=30$ м. Тогда $V_2=36$ м/с, $V_3=43,6$ м/с. $S_y=544,4$ м, $\alpha=0,25$ м/с². Скорость в точке S1 равна $V_1=38,45$ м/с, средняя скорость на участке S0-S1 – $V_{cp1}=39,2$ м/с, время прохождения $t_1=6,2$ с, скорость в точке S2 – $V_2=32,32$ м/с, средняя скорость на участке S1-S2 – $V_{cp2}=35,38$ м/с, время прохождения $t_1=8$ с, скорость в точке S3 – $V_3=40,5$ м/с, средняя скорость на участке S2-S3 – $V_{cp3}=36,43$ м/с, время прохождения $t_1=5,4$ с. Средняя скорость на участке S0-S3 – $V_{cp}=37,8$ м/с.

Рассмотрим энергетическую составляющую движения поезда. Если бы поезд поддерживал постоянную скорость V_0 , то при подъеме он потратил бы энергию $E_1=mg(h_2-h_1)=150m$, а при спуске потратил энергию на торможение $E_2=mgh_2=300m$. Допустим, при спуске половину работы по торможению выполняют силы сопротивления, а половину – активное торможение. Тогда, потраченную энергию E_2 примем равную $150m$. В общем, энергия, затраченная на этом пути, получится равной $300m$. В предлагаемом методе энергия тратится только на торможение на участке S_y до точки S2, и она равна $E_3=mgh_1=150m$. Экономия энергии при представленном варианте движения составляет около 50 %.

Если номинальная скорость движения поезда меньше скорости, полученной от перехода потенциальной энергии в кинетическую на участке S2-S3, то кинетической энергии достаточно для прохождения наивысшей точки профиля пути S2, тогда дополнительных изменений скорости не требуется. Следует отметить, что после прохождения точки S3 нет необходимости прибегать к торможению, а для экономии энергии можно отключить двигатель и продолжать движение по инерции до момента пока скорость уменьшится до значения V_0 под действием сил трения. Рассмотрим этот случай на численном примере.

Пусть $E_k \approx E_p$, тогда

$$\frac{mV_0^2}{2} \approx mg(h_2 - h_1), \quad (12)$$

$$V_0 \approx \sqrt{2mg(h_2 - h_1)}, \quad (13)$$

$V_0 \approx 17,3$, в этом случае $V_2 \rightarrow 0$, но больше нуля.

Тогда скорость V_3 равна

$$V_3 = \sqrt{2mgh_1} = 24,5. \quad (14)$$

Средняя скорость на участке S1-S2 равна $V_{cp1}=8,7$ м/с, средняя скорость на участке S2-S3 – $V_{cp2}=12,25$, а средняя скорость на S1-S3 – $V_{cp3}=10,5$ м/с. Средняя скорость на участке от S3 до точки S5 равна $V_{cp4}=20,9$ м/с. Тогда средняя скорость на участке S1-S5 равна $V_{cp}=15,7$ м/с.

Рассмотрим следующий профиль, представленный на рис. 2. Данная задача представляется аналогичной предыдущей с одним изменением – нет необходимости в каком-то определенном начальном уровне кинетической энергии, так как сначала поезд движется под горку, увеличивая кинетическую энергию за счет потенциальной, затем поднимается в горку, теряя её.

Запишем уравнение для энергии в точке S2:

$$E = \frac{mV_0^2}{2} + mgh_1 = \frac{mV_2^2}{2}; \quad (15)$$

$$V_2 = \sqrt{V_0^2 + 2gh_1}. \quad (16)$$

Аналогично, из уравнения для энергии в точке S3, выразим V3:

$$V_3 = \sqrt{V_2^2 - 2gh_2} = \sqrt{V_0^2 + 2g(h_1 - h_2)}. \quad (17)$$

Выразим S_y . Для этого воспользуемся (4). P_n определим по формуле (5), а P_n представим как:

$$P_n = \frac{1}{2}(S_2 - S_1)(V_2 - V_0) + \frac{1}{2}(S_3 - S_2)(V_2 - V_3) + (S_3 - S_2)(V_3 - V_0). \quad (18)$$

Воспользуемся уравнениями (4), (5) и (18) и выразим S_y :

$$S_y = \frac{(S_2 - S_1)(V_2 - V_0) + (S_3 - S_2)(V_2 - V_3) + 2(S_3 - S_2)(V_3 - V_0)}{V_3 - V_0}. \quad (19)$$

Ускорение определяется по уравнению (11).

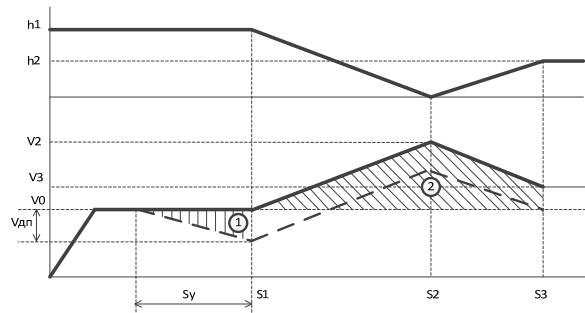


Рис. 2. Профиль пути 2

Рассмотрим теперь профиль, представленный на рис. 3. В данном случае необходимо увеличить скорость на участке S_y , так как скорость V_3 в точке S_3 будет меньше V_0 по закону сохранения энергии:

$$E = \frac{mv_2^2}{2} - mgh_2 = \frac{mv_3^2}{2}. \quad (20)$$

Выразим V_2 через V_0 также по закону сохранения энергии, уравнение которого аналогично (15). Тогда уравнение для определения V_2 аналогично (16), а выразив V_3 через V_0 получим

$$V_3 = \sqrt{V_0^2 - 2g(h_2 - h_1)}. \quad (21)$$

Аналогично предыдущим вычислениям определим S_y и ускорение α . Величина P_n определяется по уравнению (5), а для P_n находим

$$P_n = \frac{1}{2}(S_2 - S_1)(V_2 - V_0) + \frac{1}{2}(S_4 - S_2)(V_2 - V_0) + \frac{1}{2(S_3 - S_4)(V_0 - V_3)}. \quad (22)$$

$$V_{дп} = \sqrt{V_0^2 + 2\alpha S_y} - V_0. \quad (23)$$

$$\sqrt{V_0^2 + 2\alpha S_y} - V_0 = V_0 - V_3. \quad (24)$$

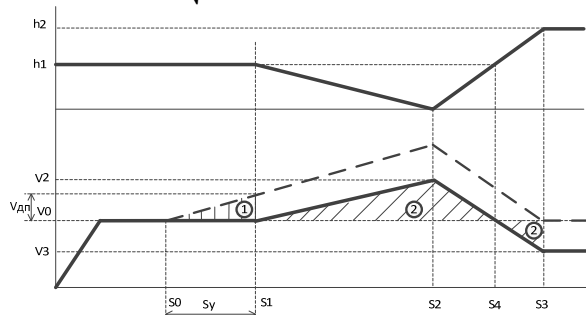


Рис. 3. Профиль пути 3

Из уравнений (5), (22), (23), (24) выразим S_y :

$$S_y = \frac{(S_2 - S_1)(V_2 - V_0) + (S_4 - S_2)(V_2 - V_0) + (S_3 - S_4)(V_0 - V_3)}{V_0 - V_3};$$

$$S_y = \frac{(V_2 - V_0)(S_4 - S_1)}{V_0 - V_3} + S_3 - S_4. \tag{25}$$

Из (24) определим α :

$$\alpha = \frac{3V_0^2 - 4V_0V_3 + V_3^2}{2S_y}. \tag{26}$$

Рассмотрим теперь профиль, представленный на рис. 4.

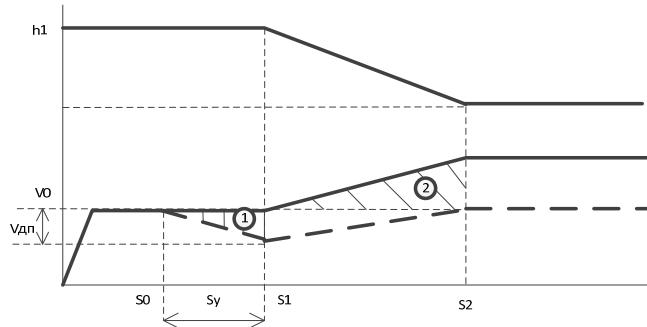


Рис. 4. Профиль пути 4

Определим величины S_y и α . Для того чтобы по выходе из неоднородности профиля в точке S_2 скорость V_2 была близка к V_0 , поезд должен снизить скорость на участке S_y на $V_{дп}$, равную $(V_2 - V_0)$. Аналогично предыдущим вычислениям определим V_2 , $V_{дп}$, S_y , α . Скорость V_2 определим по уравнению (15), $V_{дп}$ по (7). Тогда S_y будет равна

$$S_y = S_2 - S_1. \tag{27}$$

Ускорение α можно определить по уравнению (11).

Для профиля пути 5, представленного на рис. 5, S_y :

$$S_y = S_2 - S_1. \tag{28}$$

Ускорение α в этом случае определим по (26), где V_3 – заменится скоростью V_2 .

Рассмотрим также сложный профиль, представленный на рис. 6. Запишем выражение для энергии на всем участке пути $S_1 - S_6$:

$$E = \frac{mV_0^2}{2} - mg(h_1 - h_2) + mg(h_2 - h_3) - mg(h_4 - h_3) + mgh_4 - mgh_5 = \frac{mV_2^2}{2}.$$

$$E = \frac{mV_0^2}{2} + mg(h_1 - h_5) = \frac{mV_2^2}{2}. \tag{29}$$

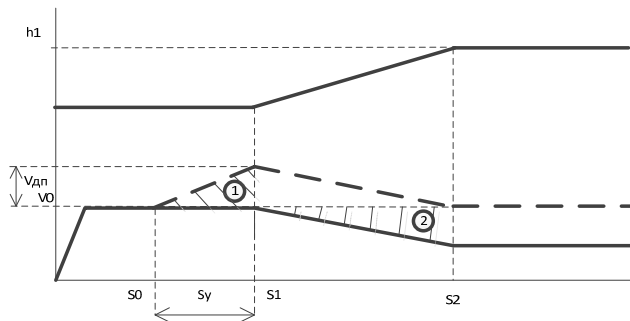


Рис. 5. Профиль пути 5

При вхождении на участок S1-S6 у энергии поезда должно хватить для преодоления высшей точки профиля h4. Также в каждой низшей точке спуска (S3, S5) скорость поезда не должна превышать максимально допустимую, т.е.

$$V_3 = \sqrt{V_0^2 + 2g(h_1 - h_3)} < V_{max}. \quad (30)$$

$$V_5 = \sqrt{V_0^2 + 2gh_1} < V_{max}. \quad (31)$$

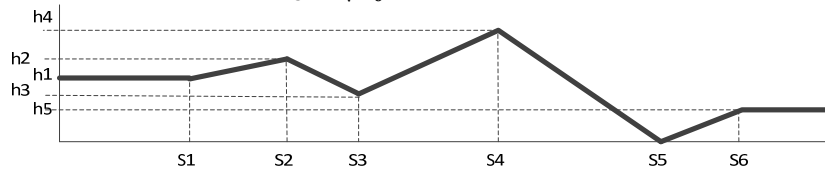


Рис. 6. Профиль пути б

По условию сохранения энергии, при рассмотрении замкнутой системы, взаимный переход кинетической энергии в потенциальную и наоборот сохраняет скорость V_0 в некоторых точках профиля, что позволяет свести задачу к профилю, представленному на рис. 7. Таким образом, задача преобразовывается в рассмотренный ранее первый случай, при котором V_0 или V_1 , при условии начала маневра по преодолению профиля, достаточно, чтобы преодолеть S2.

Рассмотренные профили пути позволяет планировать движения поезда для сложного пути, состоящего из рассмотренных отрезков или их комбинаций.

Заключение. Предложенные методы позволяют решить задачу оптимизации энергопотребления на уровне планирования и управления движением. На базе представленных методов можно построить алгоритмы энергоэффективного управления движением электропоезда, способных автоматически принимать решение о его поведении в зависимости от состояния системы и траектории движения. Для учета нелинейности и незамкнутости системы можно использовать нелинейные методы управления и методы оценивания [10–12].

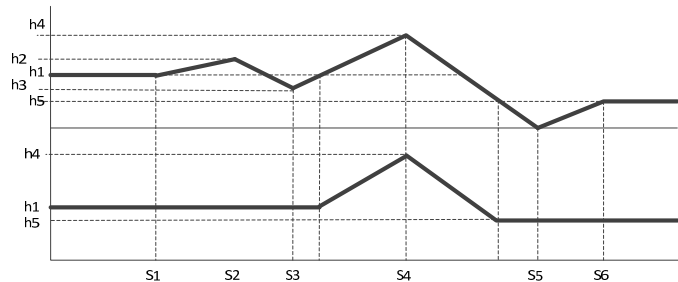


Рис. 7. Преобразование профиля пути

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cucala P., Garcia A. Fernandes Cardador. European Railway Review. – 2010. – № 4. – P. 46-50; WIT Transactions on The Built Environment. – 2010. – № 114. – P. 549-560.
2. Пшихонов В.Х., Гайдук А.Р., Медведев М.Ю., Беляев В.Е., Полуянович Н.К., Волощенко Ю.П. Энергосберегающее управление тяговыми приводами электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 192-200.
3. Пшихонов В.Х. Дирижабли: перспективы использования в робототехнике // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 15-20.
4. Пшихонов В.Х. Организация репеллеров при движении мобильных роботов в среде с препятствиями // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 34-41.

5. *Пишихов В.Х.* Аттракторы и репеллеры в конструировании систем управления подвижными объектами // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 49-57.
6. *Гайдук А.Р., Капустян С.Г., Шаповалов И.О.* Оптимальное перемещение тела интеллектуальным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 7. – С. 43-46.
7. *Пишихов В.Х.* Оптимальное по быстродействию траекторное управление электромеханическими манипуляционными роботами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2007. – № 1. – С. 51-57.
8. *Medvedev M.Y., Pshikhov V.Kh.* Robust control of nonlinear dynamic systems // Proc. of 2010 IEEE Latin-American Conference on Communications. September 14–17, 2010, Bogota, Colombia.
9. *Давыдов Б.И., Култашова О.А.* Анализ энергетической эффективности тяги поездов // Вестник ВНИИЖТ, – 2006. – № 2. – С. 43-47.
10. *Медведев М.Ю., Борзов В.И., Пишихов В.Х.* Автономные управляемые ветроэнергетические установки // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2006. – № 3(58). – С. 202-207.
11. *Пишихов В.Х., Медведев М.Ю.* Блочный синтез робастных систем при ограничениях на управления и координаты состояния // Мехатроника, автоматизация и управление. – 2011. – № 1. – С. 2-8.
12. *Медведев М.Ю.* Структура и алгоритмическое обеспечение нелинейного наблюдателя производных в условиях действия случайных шумов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 20-25.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

Пишихов Вячеслав Хасанович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: pshichor@ Rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; зав. кафедрой; д.т.н.

Медведев Михаил Юрьевич – e-mail: medvmihal@gmail.com; кафедра электротехники и мехатроники; д.т.н.; профессор.

Полюянович Николай Константинович – кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н., доцент.

Шевченко Виктор Александрович – кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Гайдук Анатолий Романович – e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; д.т.н.; профессор.

Pshikhov Vyacheslav Khasanovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: pshichor@ Rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; head the department; dr. of eng. sc.

Medvedev Mikhail Yur'evich – e-mail: medvmihal@gmail.com; the department of electrical engineering and mechatronics; dr. of eng. sc.; professor.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Shevchenko Viktor Alexandrovich – the department of electrical engineering and mechatronics; postgraduate student.

Gaiduk Anatoly Romanovich – e-mail: gaiduk_2003@mail.ru; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; dr. of eng. sc.; professor.