

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ШАХТНОЙ ЭЛЕКТРОВОЗНОЙ ОТКАТКИ

*Хараджян А.А., к.т.н.*

*Криворожский государственный педагогический университет*

*Синчук И.О.*

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского*

*39614, г. Кременчуг, ул.Первомайская, 20*

*E-mail: [kh\\_aa@mail.ru](mailto:kh_aa@mail.ru)*

В статті запропоновано метод оптимізації енергоспоживання електровозами шахтної відкатки шляхом вибору оптимального швидкісного режиму. В основу методу покладено принцип руху з максимальною швидкістю та максимальними прискореннями. Такий рух забезпечує мінімальне споживання енергії та мінімальний час руху.

**Ключові слова:** енергоспоживання, мінімізація енергоспоживання, шахтна відкатка.

In article is offered the method of optimization of consumption of energy by mine electric locomotives by way of choice of optimum speed mode. The principle of motion is prescribed In base of method with maximum velocity and maximum speedups. Such motion provides the minimum consumption of energy and minimum time of motion.

**Key words:** consumption of energy, minimization consumption of energy, mine electric locomotives.

**Введение.** Задачи снижения энергопотребления в настоящее время становятся очень актуальными, особенно в энергоемких отраслях промышленности. Одной из таких отраслей является транспорт, в частности шахтная электровозная откатка. Путей снижения энергопотребления на шахтном транспорте существует несколько, причем они являются взаимодополняющими: использование регулируемого электропривода, улучшение состояния рельсового пути, изменение профиля пути, оптимизация загрузки состава, выбор оптимального режима движения состава. С наименьшими капитальными затратами в настоящее время возможно снижение энергопотребления путем выбора оптимального режима движения состава. При поиске оптимального режима необходимо подходить с двух позиций: минимизация затрат электроэнергии и минимизация времени движения состава [1].

**Цель работы.** Обоснование алгоритма минимизации энергопотребления шахтной электровозной откатки путем выбора оптимального режима движения.

**Материал и результаты исследования.** На величину потребляемой энергии рудничной откатки влияет множество факторов: масса состава  $M$ , уклон пути  $i$ , закругления пути  $s$ , скорость движения  $V$ , режим питания контактной сети  $U_c$ , коэффициент сцепления  $f$ .

Степень влияния этих факторов различна и носит случайный характер. Однако возможно определение степени влияния отдельных компонентов на потребление энергии.

Расход энергии  $E$  за время  $T$  определяется формулой:

$$E = \int_0^T P(t) dt,$$

где  $P$  – потребляемая мощность,  $T$  – время движения.

Математическую модель движения состава определим следующим образом. Энергия, потребляемая из сети, затрачивается на:

- перемещение состава на участке пути, изменение потенциальной и кинетической энергии;
- работу вспомогательных систем локомотива, которые не принимают участие в непосредственном перемещении состава.

$$E = \int_0^T (P_B + P_{дв}) dt,$$

где  $P_B$  – мощность, потребляемая вспомогательными устройствами локомотива;  $P_{дв} = F_T V$  – мощность, затрачиваемая на перемещение состава;  $F_T$  – сила тяги локомотива;  $V$  – скорость движения.

Сила тяги должна обеспечивать компенсацию силы сопротивления движению и динамические режимы движения [1]:

$$F_T = Mka + F_{тр}, \quad (1)$$

где  $M$  – масса состава;  $k$  – коэффициент вращающихся масс ( $k=1,1-1,2$ ) [1];  $F_{тр}$  – суммарная сила сопротивления движению.

Уравнение движения состава определяется системой уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = V,$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{F_T - F_{тр}}{Mk} = a,$$

где  $x$  – путь, пройденный составом.

В общем виде  $F_{тр}$  является функцией вида

$$F_{тр} = (k_{тр} \pm i)Mg + \frac{\beta V^2}{2}, \quad (2)$$

где  $k_{тр}$  – коэффициент трения качения;  $i$  – уклон пути;  $\beta$  – аэродинамический коэффициент.

Начальные и конечные условия движения:

$$\begin{aligned} x(t=0) &= 0; \\ V(t=0) &= 0; \\ x(t=T) &= L; \\ V(t=T) &= 0. \end{aligned}$$

С целью упрощения решения поставленной задачи выбираем на интервалах движения тяговое усилие  $F_T$  и силу сопротивления  $F_{тр}$  постоянными. Это позволяет избавиться от сингулярности. При действии постоянной силы на интервале возникает средняя скорость:

$$V_{cp} = \frac{V_{k+1} + V_k}{2},$$

где  $V_{k+1}$  – скорость в точке  $k+1$ ;  $V_k$  – скорость в точке  $k$ .

Время движения на интервале может быть определено таким образом:

$$h_t = \frac{L_{k+1} - L_k}{V_{cp}} = \frac{2h_L}{V_{k+1} + V_k} = \frac{h_L}{V_{cp}},$$

где  $h_L$  – длина интервала,

Ускорение на интервале определяется следующим образом

$$\begin{aligned} a &= \frac{V_{k+1} - V_k}{h_t} = \frac{(V_{k+1} - V_k)(V_{k+1} + V_k)}{2h_L} = \\ &= \frac{V_{k+1}^2 - V_k^2}{2h_L}. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда из выражения (3) можно определить скорости в точке  $k+1$

$$V_{k+1} = \sqrt{V_k^2 + 2ah_L},$$

и в точке  $k$

$$V_k = \sqrt{V_{k+1}^2 - 2ah_L}.$$

Сила сопротивления на интервале  $k$  определяется с учетом (1):

$$F_{тр,k} = (k_{тр} \pm i_k)Mg + \frac{\beta(V_{k+1} + V_k)^2}{2}.$$

Общее время пути  $T = t_n$

$$t_n = 2 \sum_{k=0}^{n-1} \frac{h_{Lk}}{V_{k+1} + V_k}.$$

Необходимое тяговое усилие на интервале  $k$  с учетом (3) определяется выражением:

$$F_{т,k} = \frac{M(V_{k+1}^2 - V_k^2)}{2h_L} + F_{тр,k}.$$

Рассмотрим влияние отдельных компонентов на общие затраты энергии с учетом (1):

$$E = P_e T + \int_0^T P_{де} dt = P_e T + \int_0^T Mka + F_{тр} V dt =$$

$$= P_b T + Mk \int_0^T a V dt + \int_0^T F_{тр} V dt. \quad (4)$$

Т.о., постоянные потери энергии на вспомогательные системы зависят только от времени движения. Т.е. уменьшить эти затраты энергии возможно только уменьшив время движения [2].

Для дискретного представления пути в выражении (4) заменим интегралы суммами:

$$E = P_b T + \frac{Mk}{2} \sum_{k=0}^n (V_{k+1}^2 - V_k^2) + h_L \sum_{k=0}^n F_{тр,k}.$$

Рассмотрим случай движения с заданным графиком скорости (рис. 1) и неизменным уклоном трассы.

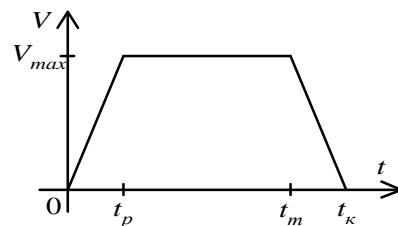


Рисунок 1 – График скорости движения.

На рис. 1 можно выделить три участка движения, которые имеют следующие характеристические параметры:

$$1) \text{ разгон} \quad a_1 = \frac{V_{max}}{t_p}, \quad V_1(t) = a_1 t,$$

$$F_{тр,1} = (k_{тр} \pm i)Mg + \frac{\beta(a_1 t)^2}{2};$$

$$2) \text{ движение с постоянной скоростью} \quad a_2 = 0,$$

$$V_2(t) = V_{max}, \quad F_{тр,2} = (k_{тр} \pm i)Mg + \frac{\beta V_{max}^2}{2};$$

$$3) \text{ торможение} \quad a_3 = \frac{-V_{max}}{t_r}, \quad V_3(t) = a_3 t,$$

$$F_{тр,3} = (k_{тр} \pm i)Mg + \frac{\beta(a_3 t)^2}{2}.$$

Таким образом, суммарная энергия, необходимая для движения локомотива, с учетом (2), будет определяться выражением:

$$\begin{aligned} E &= P_b T + Mk \left( \int_0^{t_p} a_1 dt + \int_0^{t_p} a_2 dt \right) + \\ &+ \int_0^T (F_{тр,1} + F_{тр,2} + F_{тр,3}) dt \end{aligned}$$

После подстановок и преобразований получим:

$$\begin{aligned} E &= P_b T + Mka_1 \frac{t_p}{2} + Mka_3 \frac{t_r}{2} + (k_{тр} \pm i)MgT + \\ &+ \frac{\beta}{6} (a_1^2 t_p^3 + a_3^2 t_r^3) + \frac{\beta}{2} V_{max}^2 (T - t_p - t_r) \end{aligned}$$

С учетом  $t_p = \frac{V_{\max}}{a_1}$ ,  $t_m = \frac{-V_{\max}}{a_3}$ , а также того,

что рекуперация энергии при торможении не происходит, получим:

$$E = P_B T + Mk \frac{V_{\max}}{2} + (k_{тр} \pm i) MgT + \frac{\beta}{6} V_{\max}^3 \left( \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_3} \right) + \frac{\beta}{2} V_{\max}^2 \left( T - \frac{V_{\max}}{a_1} - \frac{V_{\max}}{a_3} \right).$$

Анализ полученного выражения позволяет утверждать следующее:

- при увеличении максимальной скорости потребление энергии возрастает;
- при увеличении ускорений разгона и торможения потребление энергии уменьшается;
- потери энергии на трение и изменение потенциальной энергии зависят только от времени движения;
- потери энергии на вспомогательное оборудование зависят только от времени движения.

Таким образом, наименьшее потребление энергии будет при движении с максимально возможной скоростью и ускорениями при этом будет обеспечено минимальное время движения.

На основании изложенного выше подхода к выбору оптимальной скорости движения разработана программа для определения задания скорости при заданных параметрах трассы [3]. Выполнено моделирование оптимизации скорости движения состава при параметрах состава и условиях моделирования приведенных в табл. 1. Результаты моделирования приведены на рис. 2-4.

**Выводы.** Колебания величин потребляемого тока, скорости и тягового усилия влекут за собой повышенный расход энергии, затрачиваемый на движение состава. При этом зависимость влияющих факторов носит сложный характер. Только за счет упорядочения энергопотребления электровозом, расход энергии на один рейс может быть снижен на 10-40%. Как показано на результатах моделирования движение с максимальной скоростью и ускорениями обеспечивает минимальное энергопотребление и минимальное время движения. Однако при ручном управлении локомотивом выдержать скоростной режим очень сложно из-за различных субъективных причин.

Таблица 1 – Характеристики локомотива

Параметр	Значение
Масса состава	10 т
Мах. ускорение	2 м/с <sup>2</sup>
Мах. замедление	2 м/с <sup>2</sup>
Мах. сила тяги	5тс
Доп. потери	5 кВт
КПД	0.95
Коэф. трения качения	0.01
Коэф. аэродин. сопр.	0.001
Мах. скорость	25 км/ч
Длина пути	1 км
Кол-во точек расчета	100

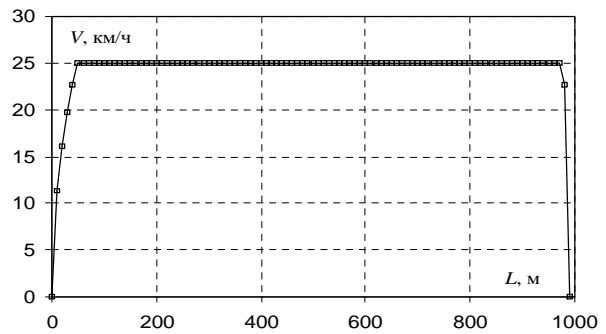


Рисунок 2 – Движение на горизонтальном участке трассы: E=0.212036 кВт·ч, T=2.54444 мин

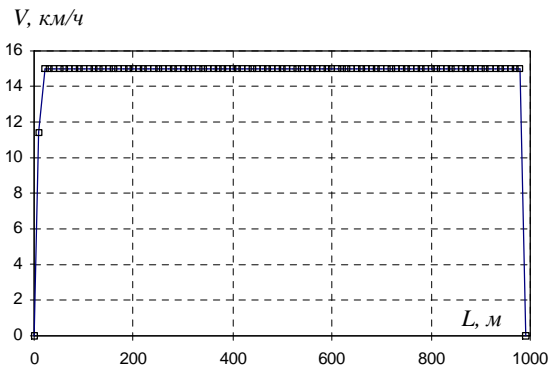


Рисунок 3 – Движение на горизонтальном участке трассы при ограничении скорости 15 км/ч: E=0.340534 кВт·ч, T=4.08641 мин

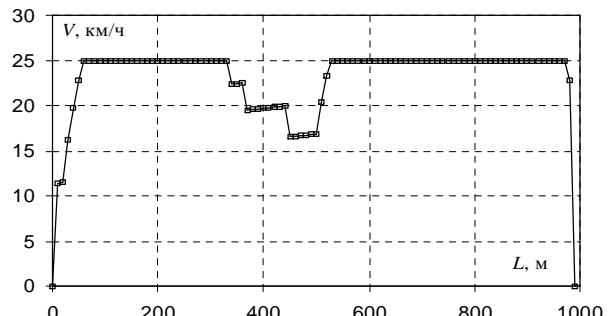


Рисунок 4 – Движение на сложном участке трассы: E=0.646287 кВт·ч, T=2.68694 мин

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голубева О.В. Теоретическая механика. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 703 с.
2. Ляпунов А.М. Лекции по теоретической механике. – К.: Наукова думка, 1982. – 632 с.
3. Таха Х.А. Введение в исследование операций.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 912 с.

Стаття надійшла 11.04.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.