

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДОВ С УЧЕТОМ СТОИМОСТИ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Розроблено уточнену модель розрахунку режимів тяги з урахуванням вартості як активної, так і реактивної енергії в умовах застосування змінних тарифів оплати електроенергії.

Разработана уточненная модель расчета режимов тяги с учетом стоимости как активной, так и реактивной энергии в условиях применения переменных тарифов оплаты электроэнергии.

The improved computation model for traction modes which takes into account the cost of both active and reactive energy in the conditions of application of variable tariffs for payment of electric power is developed.

### Введение

Железнодорожный транспорт Украины – один из наибольших в стране потребителей топливно-энергетических ресурсов. Сокращение эксплуатационных расходов – важнейшее направление повышения эффективности работы железных дорог. Расчет рациональных (по расходу или стоимости энергии) режимов ведения поезда является одним из направлений снижения потребления электроэнергии. В настоящее время все более актуальной становится задача оптимизации режимов движения поезда по критерию минимума стоимости электроэнергии, цена которой в различные периоды суток при различных методах закупки неодинакова. Закупка электроэнергии может производиться по дифференцированным тарифам оплаты, тогда ее стоимость в ночной и пиковый период колеблется более, чем в 7 раз (ночь – 0,25, полу пик – 1,02, пик – 1,8 по отношению к одноставочному тарифу); возможно использование механизма оптового рынка электроэнергии, при котором цена меняется в каждый час суток, а ее вариация составляет до 10 %.

### Методика расчета оплаты за электроэнергию

Основная часть электроэнергии потребляется электродвигателями локомотивов. Любой асинхронный электродвигатель является потребителем и реактивной мощности. Для его работы требуется создание переменного магнитного поля, для чего необходим намагничивающий или, как говорят, реактивный ток. При отсутствии компенсирующих устройств в сетях реактивный ток (реактивная мощность) поступает к двигателям из сетей энергоснабжающей организации, и следовательно, подлежит оплате. Поэтому задачу

компенсации реактивной мощности (КРМ) в сети можно рассматривать как задачу энергосбережения. Проблема компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий в последнее время стала актуальнее и острее в связи с внедрением «Методики расчетов платы за перетоки реактивной мощности между электропередающей организацией и ее потребителями» (Министерство топлива и энергетики, приказ № 19 от 17.01.2002) [1].

На основании методики, плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии, определяется по формуле

$$П = П1 + П2 - П3, \quad (1)$$

где  $П1$  – основная плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии;  $П2$  – надбавка (при  $\text{tg } \phi > 0,25$ ) за недостаточную оснащенность электрической сети потребителя устройствами КРМ;  $П3$  – скидка платы при участии в оптимальном суточном регулировании режимов сети энергоснабжающей организации в расчетный период.

Величина надбавки  $П2$  находится в нелинейной зависимости от  $\text{tg } \phi$ , и при  $\text{tg } \phi > 0,6$  может принимать значения, сравнимые с основной платой  $П1$  за потребление и генерацию реактивной электроэнергии.

Уменьшение величины  $\text{tg } \phi$  за счет применения компенсирующих устройств реактивной мощности на локомотивах – довольно сложная задача, требующая централизованного решения. Эту задачу можно решать путем введения рациональных режимов управления движением поезда с применением критерия минимума расхода реактивной энергии или минимума стоимости потребленной реактивной мощности.

## Постановка задачи

Необходимо разработать методику, которая позволит рассчитывать участковые времена хода и их реализацию – режимные карты, оптимальные не только по расходу электроэнергии на тягу, но и по стоимости электроэнергии с учетом переменных тарифов оплаты и расхода реактивной энергии.

### Разработка критерия оптимальности

Основой оптимизации перегонных времен хода является математическое моделирование движения поезда. Поезд представлен как гибкая нерастяжимая нить. В качестве метода оптимизации режимов вождения поездов между пунктами остановки при заданном времени хода выступает динамическое программирование в дискретной форме [2].

Предложен и исследован усовершенствованный критерий эффективности движения поездов, который учитывает активную и реактивную составляющую электрической энергии и переменные тарифы на оплату электроэнергии в разные периоды суток.

Целевая функция для оценки закона управления движением поезда на участке  $u(x)$  представляет собой функционал (затраты электроэнергии на тягу поезда) [2, 3]:

$$A[u] = \int_{x_u}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) dx}{v(x, u)}, \quad (2)$$

где  $I_{da}(v, u)$  – активный ток электровоза.

С учетом стоимости электроэнергии (функция  $c(t)$  – определяет ценовой коэффициент в зависимости от времени  $t$ ) при расходе активной и реактивной энергии функция (2) может иметь вид:

$$A[u] = \int_{x_u}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot c(t) dx}{v(x, u)} + \int_{x_u}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot \sin \varphi(I_{da}(*)) \cdot D \cdot c(t) dx}{v(x, u)} + П2, \quad (3)$$

где первый член отражает стоимость расхода только активной энергии, а второй – стоимость реактивной,  $D$  – коэффициент ЕЕРП, который характеризует часть влияния реактивного перетока в точке учета на технико-экономические показатели в расчетном режиме, кВт/квар.;  $П2$  – надбавка за недостаточное оснащение средствами компенсации реактивной энергии.

$$П2 = П1 \cdot C_{баз} \cdot (K_{\phi} - 1) \quad (4)$$

$П1$  – основная плата за потребленную и сгенерированную реактивную энергию, второе слагаемое выражения (3),  $C_{баз} = 1$  – нормативное базовое значение коэффициента стимулирования капитальных вложений в средства компенсации в сетях потребителя;

$K_{\phi}$  – коэффициент, который рассчитывают по регламентированной таблице в зависимости от фактического значения коэффициента  $\tan \phi$  потребителя в среднем за отчетный период; для тяговых подстанций железнодорожного транспорта переменного тока он равен 1,0, а для постоянного тока = 0,5. Для железнодорожного транспорта переменного тока значение надбавки  $П2$  равняется 0.

Целевая функция задачи представляется следующим образом:

$$A[u] = \int_{x_u}^{x_k} \frac{U_c I_{da}(v, u) \cdot \{\cos \varphi(I_{da}(*)) + D \cdot \sin \varphi(I_{da}(*))\} \cdot c(t) dx}{v(x, u)}. \quad (5)$$

Вычисления ЕЕРП (коэффициент  $D$ ) выполняются электропоставляющей организацией один раз в два года. Полученные значения ЕЕРП, базового коэффициента стимулирования капитальных вложений в средства компенсации и коэффициента убытков от генерации реактивной мощности из сети потребителя закрепляются в договоре [1].

### Моделирование режимов ведения поездов

Для использования уточненного функционала задачи расчета оптимальных по стоимости режимов тяги необходимо знать значения показателя потребления реактивной энергии (мощности), которым является коэффициент мощности  $\cos \varphi$ .

Для построения характеристики  $\cos \varphi$  были использованы данные из опытных поездок на локомотиве ВЛ-80т. Измеренные зависимости значения  $\cos \varphi(I_{da})$  от активного тока локомотива были аппроксимированы кривой вида:

$$f(x) = \frac{A}{B - e^{-Cx}} \quad (6)$$

На рис. 2 представлены точки измеренных во время испытаний значений и кривая их аппроксимации по методу наименьших квадратов.

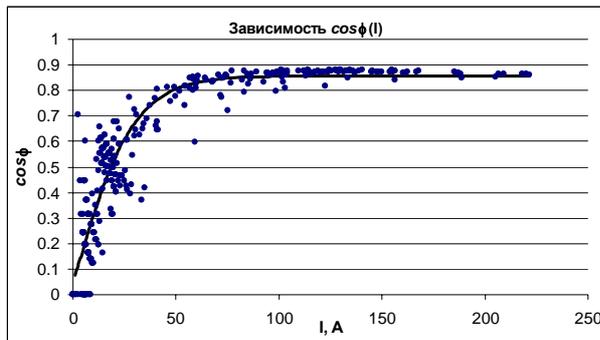


Рис. 2. Аппроксимация функции  $\cos \varphi(I_{da})$

Выполнены расчеты управления поездом на участке по уточненной методике [3] с применением дифференцированных тарифов на оплату электроэнергии. На рис. 3 показана зависимость скорости локомотива при оптимизации движения по общему расходу электроэнергии.

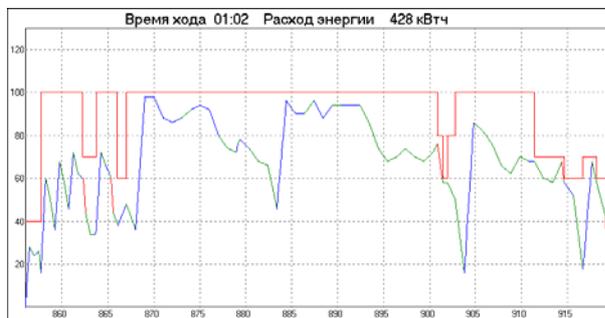


Рис. 3. Оптимизация режимов тяги по общему расходу электроэнергии



Рис. 4. Оптимизация режимов тяги по стоимости полного расхода

Можно отметить отличие характера управления поездом при различных критериях оптимизации. В первом – классическом – случае получается минимальный расход электроэнергии (рис. 3). Для второго случая, при дифференцированном тарифе (рис. 3), расход электроэнергии выше, т.к. для уменьшения расхода на оплату потребовалось использовать большее



Рис. 1. Оптимизация режимов тяги с учетом платы за реактивную энергию

количество энергии в зоне с меньшей стоимостью. Для третьего случая на рис. 1 стоимость энергии подсчитана более точно с учетом затрат на использование реактивной энергии, стоимость которой составляет примерно 10 % от тарифа на активную электроэнергию.

## Вывод

В ходе исследований показано существенное отличие режимов ведения поезда, оптимальных по стоимостным показателям, от режимов, оптимальных по критерию минимума электропотребления при учете оплаты за использование реактивной мощности.

Разработана уточненная модель расчета режимов тяги с учетом стоимости как активной так реактивной энергии в условиях применения переменных тарифов оплаты электроэнергии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «Про затвердження «Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії». Наказ Міністерства палива та енергетики України № 19 від 17.01.2002; зареєстр. в Міністерстві юстиції України 01.02.2002 р. за № 93/6381.
2. Блохин Е. П. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов / Е. П. Блохин, А. Н. Пшинько, Г. В. Евдомах, В. В. Скалзуб, В. Б. Землянов // Залізничний транспорт України. – № 6, 2001. – С. 19-22.
3. Скалзуб В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии // Транспорт: Зб. наук. пр. – Вип. 12. – Д., 2002. – С. 148-157.

Поступила в редколлегию 26.07.2007.