

УДК 338:62-83

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

Литвинский Л.Б., к.т.н., доц., Федорченко Н.Л., асс., Федорченко Е.И. студ.

Кременчуцкий державний політехнічний університет

імені Михайла Остроградського

39614, вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук

E-mail: ket@polytech.poltava.ua

У роботі розглянуті питання зменшення витрат енергоресурсів при роботі міського транспорту. Показано, що для цього необхідно провести розробку оптимальних динамічних алгоритми роботи транспорту.

Ключові слова: принцип максимуму, оптимальні параметри роботи транспорту, економія енергоресурсів.

In work the questions of zmeshennya charges of energoresoursiv during work of public transport are considered. It is shown, that for this purpose it is necessary to conduct razrobotcou optimum .dinamichnih algorithms of work of pransportou.

Keywords: principle of maximum, optimum parameters of work of transport, economy of energoresoursiv.

Введение. Применяемая на городском электротранспорте система управления тяговыми двигателями обладает существенным недостатком, который заключается в том, что в пусковых и переходных режимах имеет место потери энергоресурсов (электроэнергии, бензин, солярка). Это объясняется тем, что применяемые алгоритмы работы энергетических установок транспорта не оптимизированы по потерям энергоресурсов и по быстродействию. Снизить потери энергии возможно путем применения оптимальных тяговых диаграмм, реализуемых компьютерными системами.

Исследования по рациональному построению тягового электропривода проводились с целью модернизации силового преобразователя. Вопросы построения алгоритмов, позволяющих уменьшить потребление энергоресурсов в динамических режимах, не исследованы.

Цель работы. Определение параметров оптимальных динамических режимов работы электротранспорта, минимизирующих потребление энергоресурсов.

Материал и результаты исследований. Основными факторами, которые негативно влияют на финансовую устойчивость предприятий городского транспорта являются чрезмерное потребление энергоресурсов и как следствие этого недостаток у предприятий финансовых и материальных ресурсов. Кроме того, бюджетные поступления на предприятия городского транспорта осуществляются в недостаточной объеме. Отсюда следует, что предприятия городского транспорта не способны в полном объеме выполнять обязательства перед деловыми партнерами, в том числе и перед поставщиками ресурсов.

Поэтому у предприятий возникает необходимость изыскания дополнительных финансовых ресурсов для закупок материальных ресурсов, а так же для расчета за потребленные топливно-энергетические ресурсы. Предприятия городского

транспорта почти не используют кредитные ресурсы, поскольку возвращение заемных средств банку представляет определенную трудность. Кредит выдается, если гарантом погашения кредита выступит бюджет (на государственном или местном уровне).

Анализ динамики структуры себестоимости продукции городского электротранспорта показывает, что материальные затраты занимают наибольший удельный вес в себестоимости услуг. а на таких предприятиях, как городской электрический транспорт более 50% материальных затрат составляют расходы на покупку электроэнергии. В Украине актуальной остается проблема обеспечения производства энергоресурсами, так как страна принадлежит к энергодефицитным странам. За счет собственной добычи она удовлетворяет свои потребности в топливно-энергетических ресурсах меньше чем на 50%. В тоже время, очень низкой является эффективность использования топливно-энергетических ресурсов как в целом в экономике Украины, так и в социальной сфере. Поэтому украинская экономика является одной из самых энергоемких в мире.

Управление по специальным алгоритмам позволяет существенно улучшить рабочие характеристики транспорта и снизить потери электроэнергии путём применения рациональных динамических режимов работы и актуально для трамвая, троллейбуса, метрополитена, работа которых носит циклический характер.

В городских автомобильных хозяйствах Украины подвижной состав не оборудован бортовыми компьютерными системами автоматического управления, реализующего оптимальные динамически режимы движения автомобиля в пусковых и тормозных режимах, это приводит к тому, что потери энергоресурсов возрастают на 30%.

На городском электротранспорте только 5% подвижного состава оборудовано тиристорно-импульсными системами управления, в результате чего третья часть электроэнергии расходуется впустую и потребление электроэнергии повышается на 33%.

Очевидно, что возникает потребность в более детальном исследовании эффективности потребления электроэнергии на предприятиях городского транспорта и разработке организационно-экономического механизма для снижения затрат энергоресурсов. В работах посвященных изучению этого вопроса, на наш взгляд, не достаточно полно рассмотрены вопросы влияния различных производственных факторов на такие ее составляющие как энергоемкость и оптимизация энергопотребления. Поэтому нами было принято решение, о необходимости исследования задач, имеющих самое прямое отношение к эффективности использования материальных и энергетических ресурсов в такой сфере городского транспорта как городской электрический транспорт.

Экономия энергоресурсов зависит от многих как внешних так и внутренних факторов на государственном, региональном и межотраслевом уровне. Поэтому решение вопросов ресурсосбережения зависит от качества алгоритмов управления техническими средствами, от оптимальности структуры самой транспортной системы, рационального распределения перевозок пассажиров, развития отраслей транспортного машиностроения и повышения качества выпускаемой для транспорта техники и т.д. Немаловажное значение имеет также повышение уровня организационно-экономической работы с ориентацией на совершенствование планирования, учета и использования материальных ресурсов. Это не только позволит обеспечить информационную базу для принятия управленческих решений, но и сократить удельные транспортные издержки.

Оптимальные динамические режимы электротранспорта, обеспечивающие экономии энергоресурсов, могут быть определены из основного уравнения движения при помощи математического аппарата “принципа максимума” акад. Понтрягина [1].

Основное уравнение движения электротранспорта [2]

$$F - \sum W = M_{np} \frac{dV}{dT} \quad (1)$$

где F - сила тяги электропровода;

$\sum W$ - сопротивление движению;

M_{np} - приведенная масса;

$\frac{dW}{dt}$ - ускорение.

Исследование динамических режимов электротранспорта, которые позволяют снизить потребление электроэнергии, заключается в определении параметров движения, обеспечивающих min значение силы тяги, при заданных значениях $\sum W$ и M_{np} .

Для этого необходимо найти минимум интеграла, определяющего интегральный критерий качества работы привода

$$L = \int_0^T F^2 dt = \int_0^T \left(\sum W + M_{np} \frac{dW}{dt} \right)^2 dt \quad (2)$$

при соблюдении условий:

$$S = \int_0^T V dt; \quad (3)$$

$$V(0)=V(T)=0. \quad (4)$$

В качестве управляющего воздействия примем силу тяги F троллейбуса. Введем следующие фазовые координаты: $X_1=X=S$; $X_2=V$; $X_0=L$;

Математическая модель движения троллейбуса запишется в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX_1}{dt} &= X_2 = V; \\ \frac{dX_2}{dt} &= \frac{dV}{dt} = \frac{F - \sum W}{M_{np}}; \\ \frac{dX_0}{dt} &= \frac{dL}{dt} = F^2. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для решения задачи “принципом максимума” необходимо ввести вспомогательную систему дифференциальных уравнений для вектор-функции Ψ :

$$\frac{dy_1}{dt} = \frac{df_1}{dt} y_1 - \frac{df_2}{dt} y_2 - \frac{df_0}{dt} y_0;$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= \frac{df_1}{dx_1} y_1 - \frac{df_2}{dx_1} y_2 - \frac{df_0}{dx_1} y_0; \\ \frac{dy_2}{dt} &= \frac{df_1}{dx_2} y_1 - \frac{df_2}{dx_2} y_2 - \frac{df_0}{dx_2} y_0; \\ \frac{dy_0}{dt} &= \frac{df_1}{dx_0} y_1 - \frac{df_2}{dx_0} y_2 - \frac{df_0}{dx_0} y_0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Согласно теореме о принципе максимума составляется функция Гамильтона

$$H = y_1 f_1 + y_2 f_2 + y_0 f_0. \quad (7)$$

Решение системы (6)

$$y_1 = C_1; y_2 = C_2 - C_1 t; y_0 = C_0, \quad (8)$$

где C_0, C_1, C_2 – постоянные интегрирования.

Оптимальный закон изменения силы тяги, минимизирующий потребление электроэнергии, определим из условия, что H как функция усилия должна принимать максимальное значение

$$\frac{dH}{dt} = \frac{y_1}{M_{np}} + 2F_{onm} y_0 = 0, \quad (9)$$

откуда получим

$$F_{onm} = \frac{y_2}{M_{np} y_0} = \frac{b_1 t - b_2}{M_{np}}, \quad (10)$$

где

$$b_1 = \frac{C_1}{2C_0}; \quad (11)$$

$$b_2 = \frac{C_2}{2C_0}, \quad (12)$$

новые постоянные интегрирования.

Решая систему (5) с учетом (10), получим

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{b_{11}^2}{2M_{np}^2} - \frac{(b_2 + M_{np} \sum W)t}{M_{np}^2} + C_3; \\ x &= \frac{b_{11}^3}{6M_{np}^2} - \frac{(b_2 + M_{np} \sum W)t^2}{2M_{np}^2} + C_3 t + C_4 \\ L &= \frac{t}{M_{np}} \left(\frac{b^2 t^2}{3} - b_1 b_2 t + b_2^2 \right) + C_5; \end{aligned} \right\} (13)$$

Постоянные интегрирования b_1, b_2, C_3, C_4 и C_5 определим из граничных условий: при $t=0, v=0, x=0, L=0$; при $t=T, v=0, x=S$. Получим

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= -\frac{12 M_{np}^2 S}{T^3}; \\ b_2 &= -M_{np} \sum W - \frac{6 M_{np}^2 S}{T^2}; \\ C_3 &= C_4 = C_5 = 0. \end{aligned} \right\} (14)$$

После подстановки значений β_1 и β_2 в (13) получим

$$\begin{aligned} X &= \frac{St^2}{T^3} (3T - 2t); \quad V = \frac{6St}{T^3} (T - t); \\ a &= \frac{6S}{T^3} (T - 2t); \quad Q = \sum W^2 T + \frac{12 M_{np}^2 S^2}{T^3}. \end{aligned} (15)$$

Из условия постоянства и равенства нулю функции Гамильтона на всем отрезке времени оптимального движения при $t=0$ находим выражение для β_2 :

$$\beta_2 = -2 \sum W \cdot M_{np}. (16)$$

Приравнявая выражения для β_2 из (14) и (16) определим оптимальное время движения

$$T = \sqrt{\frac{6 M_{np} S}{\sum W}}. (17)$$

Время, при котором скорость достигает максимального значения, определяется из (15) при ускорении, равном нулю $t_1 = \frac{T}{2}$.

Максимальное значение скорости движения получим подстановкой значения t_1 в (15) с учетом (17)

$$V_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3 \sum WS}{2 M_{np}}}. (18)$$

Начальное ускорение a_1 и конечное замедление a_3 получим из (15) с учетом (17)

$$a_1 = \frac{\sum W}{M_{np}}; \quad a_3 = -\frac{\sum W}{M_{np}}. (19)$$

Откуда следует, что при оптимальном режиме движения начальное ускорение a_1 и конечное замедление a_3 не зависят от пройденного пути, а определяются величинами $\sum W$ и M_{np} .

Закон изменения силы тяги при оптимальном управлении получим из (10) с учетом (14), (16) и (17)

$$F = 2 \sum W \left(1 - \frac{t}{T} \right). (20)$$

Из выражения (20) следует, что система управления электроприводом электротранспорта при постоянном моменте сопротивления должна строиться так, чтобы при пуске тяговое усилие изменялось по линейному закону и равнялось удвоенному значению сил сопротивления движению, при равномерном движении – значению сил сопротивления, при торможении – нулю.

Скорость движения при оптимальном управлении будет изменяться по параболическому закону.

Для определения эффективности полученных оптимальных тяговых диаграмм их необходимо сравнить с прямоугольной диаграммой тока, когда ток якоря тягового двигателя поддерживается постоянным в период пуска электротранспорта.

Для оптимальной тяговой диаграммы справедлив следующий закон изменения силы тяги (20)

$$F_0 = 2 \sum W \left(1 - \frac{t}{T_0} \right), (21)$$

где T_0 – время рейса при оптимальном управлении.

Из основного уравнения движения при

$$\sum W = 0 \text{ и } M_{np}=1, \text{ получим}$$

$$V = F \cdot t.$$

Подставляя значения F_0 из уравнения (1) в (2) и замечая, что при $t=0$

$$F_0 = F_m = 2 \sum W, (22)$$

получим

$$V_0 = F_m t \left(1 - \frac{t}{T_0} \right) = F_m t - F_m \frac{t^2}{T_0} (23)$$

$$\text{и } V' = F_m - 2 F_m \frac{t}{T_0}. (24)$$

Закон изменения силы тяги во времени можно получить путем совместного решения уравнения (22) и основного уравнения движения.

$$F(t) = \sum W + F_m - 2 F_m \frac{t}{T_0}. (25)$$

Чтобы тяговые двигатели не перегревались, должно соблюдаться условие

$$I_k \leq I_n = 1, (26)$$

где I_k – среднеквадратичный ток;

I_n – номинальный ток.

При любой форме токовой диаграммы справедливо

$$I_k^2 = \frac{1}{t} \int_0^T i^2 dt. (27)$$

Для оптимального управления с учетом уравнения (25) можно записать

$$I^2_{ко} = \frac{1}{t} \int_0^T (\sum W + I_{мо} - 2I_{мо} \frac{t}{T})^2 dt, \quad (28)$$

где $I_{мо} = F_{мо} \cdot k$, а k – коэффициент.

Проинтегрировав уравнение (28), получим

$$I^2_{ко} = \frac{I^2_{мо}}{3} + \sum W^2. \quad (29)$$

Путь, пройденный электротранспортом за время T равен

$$S_0 = v_0 T_0,$$

а с учетом уравнения (23)

$$S_0 = \frac{I_{мо} T_0^2}{6}. \quad (30)$$

Выражение для среднеквадратического тока при оптимальном управлении будет следующим:

$$I^2_{ко} = \frac{12 S_0^2}{T_0^4} + \sum W^2. \quad (31)$$

Выражение (31) устанавливает связь между тремя важнейшими показателями электротранспорта. При рациональном управлении, когда изменение скорости осуществляется по линейному закону, путь, пройденный электро-транспортом, может быть определен так

$$S_p = \frac{V_p T_p}{2} = \frac{I_{mp} T_p^2}{4}, \quad (32)$$

откуда расход энергоресурсов (тока)

$$I_{kp}^2 = \frac{16 S_p^2}{T_p^2}. \quad (33)$$

Учитывая, что нагрев тяговых двигателей Q определяется не только величиной среднеквадратичного тока, но и временем рейса, соотношение времени работы тяговых двигателей при одной и той же длине рейса (для случая

$\sum W = 0$) будет следующим:

$$\frac{T_p}{T_0} = \sqrt[3]{\frac{4}{3}} \approx 1,1, \quad (34)$$

т.к. нагрев равен $Q = I_k^2 T$.

Из выражения (34) следует, что применение оптимальных тяговых диаграмм позволяет на 10% уменьшить время движения состава при одинаковой длине рейса по сравнению с рациональным управлением.

Для оптимальной тяговой диаграммы из уравнения (23) при $t = \frac{T_0}{2}$ получим значение максимальной скорости

$$V_{мо} = \frac{F_{мо} T}{4}. \quad (35)$$

Для рациональной тяговой диаграммы максимальная скорость

$$V_{mp} = \frac{F_{мо} T}{2}. \quad (36)$$

Отношение максимальных скоростей движения электротранспорта при одной длине рейса и при равных нагревах тяговых двигателей составит:

$$\frac{V_{mp}}{V_{мо}} = 2 \frac{F_{mp} T_p}{F_{мо} T_0} = \sqrt[3]{\left(\frac{4}{3}\right)^2} \approx 1,2. \quad (37)$$

Таким образом, при оптимальном управлении максимальная скорость на 20% меньше скорости, соответствующей рациональному управлению. С учетом выражения (33) величину потерь в цепи тяговых двигателей выразим так:

$$Q_p = \frac{16 S_p^2}{T_p^3}. \quad (38)$$

Величина потерь в цепи тяговых двигателей при оптимальном управлении будет

$$Q_o = \frac{16 S_p^2}{T_0^3}. \quad (39)$$

Отношение потерь в цепи тяговых двигателей при оптимальном и рациональном управлении определим из выражений (38) и (39).

При одной и той же длине рейса и времени движения электротранспорта отношение потерь энергоресурсов будет следующим

$$\frac{Q_p}{Q_o} = 1,33. \quad (40)$$

Таким образом, при оптимальном управлении потери в цепи тяговых двигателей электротранспорта в динамических режимах работы уменьшаются на 33%.

Выводы. Применение оптимального управления позволяет улучшить экономические показатели электротранспорта следующим образом:

1. На 10% уменьшить время движения состава при одинаковой длине рейса по сравнению с рациональным управлением электротранспорта.
2. На 33% уменьшить на потери энергоресурсов, которые имеют место при динамических режимах работы электротранспорта.
3. Повысить надежность работы механического и электрического оборудования путем снижения городского электротранспорта, минимизирующие потребление электроэнергии, скорости движения и уменьшения нагрева тяговых двигателей электротранспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Понтрягин Л.С.. Математическая теория оптимальных процессов.–М.:Физматгиз, 1961.–260 с.
2. Литвинский Л.Б., Федорченко Н.Л. Алгоритмы оптимального управления тяговыми двигателями // Сб. Нові технології. – Кременчуг: ІЭНТ, 2002. –Вып. 1. – С.14–16.

Стаття надійшла 07.03.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Сокуром М.І.

