

УДК 62-83

***Е. И. Лосина, ассистент***

*(Украина, г. Кременчуг, Кременчугский национальный университет им. М. Остроградского)*

## **К ВОПРОСУ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ВИДОВ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА**

**Введение.** Городские виды электротранспорта - троллейбус, трамвай, метрополитен - относятся к числу наиболее энергоемких потребителей электроэнергии городского коммунального хозяйства, поэтому задача снижения потребления электроэнергии троллейбусом при перевозках пассажиров является актуальной [1].

Электропривод городского электротранспорта, как правило, строится с использованием реостатной схемы управления, что приводит к существенным потерям (до 30 %) электроэнергии, особенно в пусковых и маневровых режимах работы тягового привода. Значительные потери электроэнергии при пере-

возке пассажиров (для Кременчуга эта цифра составляет до 130 тыс. грн. в месяц), привели к тому, что в настоящее время городской электротранспорт находится на грани банкротства. Основными недостатками существующей системы прямого управления являются значительные потери электроэнергии в пусковых реостатах при пуске тягового электротехнического комплекса, при движении на пониженных скоростях и отсутствие автоматизированного управления [2].

Снизить потери энергии возможно путем применения алгоритмов оптимального управления движением, полученных путем анализа динамических режимов электротранспорта и реализуемых при помощи автоматизированных микропроцессорных систем управления.

Непроизводительные потери электроэнергии при эксплуатации городского электротранспорта значительно уменьшаются путем применения оптимальных динамических режимов и применением импульсного регулирования напряжения на тяговых двигателях.

Количество перевозимых пассажиров, их вес существенно влияет на потребление электроэнергии электротранспортом и этот фактор обязательно должен быть учтен при определении энергосберегающих алгоритмов работы [3].

**Цель работы.** Разработка энергосберегающих режимов функционирования электрифицированных видов городского транспорта.

**Материалы и результаты исследований.** Влияние вариации веса пассажиров может быть учтено путем введения параметра пассажирозаполняемости электротранспорта  $p$  с размерностью кг/м.

В этом случае уравнение движения запишется в виде:

$$F = kQ - p(S - 2x) + M_{ПП}a, \quad (1)$$

где  $p$  – условная пассажирозаполняемость на 1 м пути.

Получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{dx_1}{dt} = x_2 = v; \\ f_2 &= \frac{dx_2}{dt} = a = \frac{F - (kQ + pS) + 2px_1}{M_{ПП}}; \\ f_0 &= \frac{dx_0}{dt} = \frac{dL}{dt} = F^2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Дифференциальные уравнения для вектор-функции  $\psi$  будут следующими [1]:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{2p}{M_{пп}}\psi_2; \quad \frac{d\psi_2}{dt} = -\psi_1; \quad \frac{d\psi_0}{dt} = 0 \quad (3)$$

Решение этой системы будет представлено в виде:

$$\psi_1 = C_2 e^{-rt} + C_1 e^{rt}; \quad \psi_2 = \frac{C_2 e^{-rt} - C_1 e^{rt}}{r}; \quad \psi_0 = C_0, \quad (4)$$

где  $C_0, C_1, C_2$  – постоянные интегрирования,

$$r = \sqrt{2p / M_{пп}}. \quad (5)$$

Соответственно алгоритм изменения силы тяги при движении троллейбуса:

$$F_{onm} = \frac{\beta_1 e^{rt} - \beta_2 e^{-rt}}{rM_{пп}}. \quad (6)$$

Решая систему уравнений (2) с учетом (6), получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$x_1'' + r^2 x_1 = \frac{\beta_1 e^{rt} - \beta_2 e^{-rt}}{rM_{пп}^2} - \frac{(kQ + pS)}{2p}, \quad (7)$$

решение которого можно представить в виде:

$$x_1 = (A + Bt)ch(rt) + (C + Dt)sh(rt) + \frac{kQ + pS}{2p}.$$

Дифференцируя, получим выражение для скорости электротранспорта при оптимальном управлении:

$$v = x' = (Ar + D)sh(rt) + (B + Cr)ch(rt) + rt(Bsh(rt) + Dch(rt)). \quad (8)$$

Постоянные интегрирования  $A, B, C, D$  определяем из граничных условий при  $t = 0, x = 0, v = 0$ ; при  $t = T, x = S, v = 0$ , откуда получим:

$$A = -\frac{kQ + pS}{2p}; \quad B = \frac{kQr(1 - ch(rt))}{2p(sh(rt) + rt)} + \frac{Sr(1 + ch(rt))}{2(sh(rt) - rt)};$$

$$C = -\frac{kQ(1 - ch(rt))}{2p(sh(rt) + rt)} + \frac{S(1 + ch(rt))}{2(sh(rt) - rt)}; \quad D = \frac{kQrsch(rt)}{2p(sh(rt) + rt)} + \frac{Srsh(rt)}{2(sh(rt) - rt)}.$$

Для определения силы тяги из выражения (6) необходимо вычислить значения  $\beta_1$  и  $\beta_2$ :

$$\beta_1 = M_{np}^2 r^2 (B + D); \quad (9)$$

$$\beta_2 = M_{np}^2 r^2 (B - D). \quad (10)$$

Из уравнений (8) с учетом уравнений (9), (10) получим следующие выражения для пути, скорости, ускорения и тягового усилия:

$$x = (A + Bt)ch(rt) + (C + Dt)sh(rt) - A; \quad (11)$$

$$v = (Ar + D)sh(rt) + rt(Bsh(rt) + Dch(rt)); \quad (12)$$

$$a = (Ar + 2D)rch(rt) + Brsh(rt) + r^2 t(Bch(rt) + Dsh(rt)); \quad (13)$$

$$F = 2M_{np}r(Bsh(rt) + Dch(rt)). \quad (14)$$

Из условия постоянства и равенства нулю функции Гамильтона на всем отрезке времени оптимального движения, в частности при  $t = 0$ , можно найти соотношение:

$$\frac{pS}{kQ} = \frac{sh(rt) - rt}{sh(rt) + rt}. \quad (15)$$

С учетом (15) выражения постоянные интегрирования примут вид:

$$A = -\frac{kQs\hbar(rt)}{p(sh(rt) + rt)}; \quad B = -\frac{kQrc\hbar(rt)}{p(sh(rt) + rt)}; \quad C = \frac{kQc\hbar(rt)}{p(sh(rt) + rt)}; \quad D = \frac{kQrs\hbar(rt)}{p(sh(rt) + rt)}. \quad (16)$$

Выразим постоянные  $B$  и  $D$  через  $A$  и  $C$ :

$$B = -Ar; \quad D = -Cr. \quad (17)$$

Выражения для пути, скорости, ускорения и усилия будут следующими:

$$x = (Ach(rt) + Csh(rt)) - rt(Ash(rt) + Cch(rt)) - A; \quad (18)$$

$$v = -r^2 t(Ach(rt) + Csh(rt)); \quad (19)$$

$$a = -r^2 [(Ach(rt) + Csh(rt)) + rt(Ash(rt) + Cch(rt))]; \quad (20)$$

$$F = -2M_{np}r^2 (Ach(rt) + Csh(rt)); \quad (21)$$

$$f_0 = F^2 = 4M_{np}^2 r^4 (Ach(rt) + Csh(rt))^2. \quad (22)$$

Выражения для вектор-функции  $\Psi$  :

$$\psi_1 = -4M_{np}^2 r^3 (Ash(rt) + Cch(rt)) A_0; \quad (23)$$

$$\psi_2 = -4M_{np}^2 r^2 (Ash(rt) + Cch(rt)) A_0. \quad (24)$$

Подставляя значения скорости и ускорения из (19) и (20) в (5), можно убедиться, что функция Гамильтона постоянна и равна нулю на всем отрезке оптимального движения

Оптимальное время движения тягового электротехнического комплекса определяется из выражения (15). Приравнявая ускорение нулю в (20), определяем время  $t_1$ , при котором скорость достигает максимального значения:

$$\frac{th(rt_1) + rt_1}{rt_1 th(rt_1) + 1} = th(rT). \quad (25)$$

Оптимальное время движения:

$$T_{onm} = \sqrt{\frac{6mS}{kQ}}. \quad (26)$$

Максимальная скорость тягового электротехнического комплекса на участке:

$$v_{max} = r^2 t_1 (Ach(rt_1) + Csh(rt_1)). \quad (27)$$

Начальное ускорение  $a_n$  и конечное замедление  $a_k$  определяем из (20):

$$a_n = \frac{2kQs\hbar(rT)}{M_{np}(sh(rT) + rT)}; \quad a_k = -\frac{2kQs\hbar(rT)}{M_{np}(sh(rT) + rT)}; \quad (28)$$

$$L = \frac{8(kQ)^2 (sh(rT)ch(rT) - rT)}{r(sh(rT) + rT)^2}. \quad (29)$$

Из уравнения (21) определим максимальную силу тяги в начале движения:

$$F_{max} = \frac{4kQs\hbar(rT)}{sh(rT) + rT}. \quad (30)$$

Определим параметры алгоритма оптимального управления электротранспортом для случая, когда задано время движения, и известны следующие параметры рейса:  $W, S, M_{np}, k$ .

Необходимо определить оптимальные параметры тяговой диаграммы – скорость, ускорение, потери электроэнергии в цепи тяговых двигателей.

Приравнявая ускорение нулю, находим время  $t_1$ , при котором скорость движения электротранспорта достигает максимального значения:

$$th(rt_1) = -\frac{(Ar + 2D + Brt_1)}{B + DBrt_1}; \quad (31)$$

$$v_{max} = (Ar + D)sh(rt_1) + rt_1 (Bsh(rt_1) + Dcc(rt_1)). \quad (32)$$

Из выражения для ускорения (31) определяем начальное ускорение  $a_1$  и конечное замедление движения  $a_2$ :

$$a_1 = \frac{kQs\hbar(rT) - rT}{M_{np}(sh(rT) + rT)} + \frac{pS(sh(rT) + rT)}{M_{np}(sh(rT) - rT)}; \quad (33)$$

$$a_2 = \frac{W(sh(rT) - rT)}{M_{np}(sh(rT) + rT)} - \frac{pS(sh(rT) + rT)}{M_{np}(sh(rT) - rT)}, \quad (34)$$

$$L = (kQ)^2 T \left[ \frac{4(ch(rT) - 1)}{rT(sh(rT) + rT)} + \frac{C^2(rT)^2(ch(rT) + 1)}{sh(rT) - rT} \right]. \quad (35)$$

Алгоритм оптимального управления городским электротранспортом, обеспечивающий минимальное эффективное усилие при заданных  $W$ ,  $S$ ,  $M_{np}$  и  $v_{max}$  определяется для каждого вида участка движения.

Участки оптимальных траекторий ускоренного и замедленного движений должны удовлетворять рассмотренным выше условиям принципа максимума.

**Выводы.** Анализ алгоритма для осуществления оптимальных динамических режимов работы электротранспорта показывает, что система управления должна строиться так, чтобы сила тяги изменялась следующим образом: на участке разгона: в начале и в период  $0 \leq t \leq t_0$  сила тяги должна поддерживаться постоянной, равной допустимой по условиям перегрузки тягового двигателя, а затем, в период  $t_D \leq t \leq t_1$  должна изменяться по закону (30); в период равномерного движения поддерживалась постоянной и равной статическому сопротивлению движения.

#### Список литературы

1. Далека В. Ф. Управление перевозочным процессом на городском электротранспорте и задачи ресурсосбережения // Коммунальное хоз-во городов. – К. : Техника. – Вып. 23. – 2000. – С. 214-217.
2. Литвинский Л. Б. Энергосберегающие технологии на транспорте // Вісник КДПУ. – 2008. – № 2/2008 (49). – С. 137-140.
3. Понтрягин Л. С. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. – М. : Наука, 1969. – 384 с.