

УДК 338:62-83

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНОГО УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСА С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ

О. Н. Синчук, Е. И. Лосина

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: katice@mail.ru

Рассмотрены вопросы разработки и синтеза систем оптимального управления электроприводом. Внедрение оптимального управления режимами работы троллейбуса способствует снижению потребления электроэнергии. Программное управление режимами движения троллейбуса определяет параметры оптимальных динамических режимов движения и учитывает влияние момента сил сопротивления, зависящего от профиля трассы на маршруте движения троллейбуса.

Ключевые слова: принцип максимума, оптимальные динамические режимы работы электротранспорта, экономия энергоресурсов.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНОГО РІВНЯННЯ РУХУ ТРОЛЕЙБУСА З УРАХУВАННЯМ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ РУХУ

О. М. Сінчук, К. І. Лосіна

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: katice@mail.ru

Розглянуто питання розробки та синтезу систем оптимального управління електроприводом. Упровадження оптимального управління режимами роботи троллейбуса сприяє зниженню втрат електроенергії. Програмне керування режимами руху троллейбуса визначає параметри оптимальних динамічних режимів руху і враховує вплив моменту сил опору, що залежить від профілю траси на маршруті руху троллейбуса.

Ключові слова: принцип максимума, оптимальні динамічні режими роботи електротранспорту, економія енергоресурсів.

ВВЕДЕНИЕ. Повысить рентабельность работы троллейбусного транспорта можно путем снижения затрат электроэнергии на перевозку пассажиров, т.е. внедрения оптимальных динамических режимов работы троллейбуса, а также применения бесконтактного тиристорного управления тяговыми двигателями.

Анализ предыдущих исследований показал, что вопросы разработки и синтеза систем оптимального компьютеризированного управления электроприводом рассматривались без учета влияния некоторых фазовых координат [1], а частные решения были получены для случая постоянства момента сопротивления движению троллейбуса. Однако при этом не были решены вопросы оптимизации динамики движения троллейбуса, от которой зависят режимы работы тяговых двигателей и потребление электроэнергии. Полностью решить вопрос программного управления режимами троллейбуса можно в том случае, если будут определены параметры оптимальных динамических режимов движения и учтено влияние момента сил сопротивления, зависящего от профиля трассы на маршруте движения троллейбуса.

Целью работы является определение параметров оптимальных динамических режимов работы электротранспорта, минимизирующих потребление энергоресурсов в том случае, когда сопротивление движению троллейбуса линейно зависит от маршрута.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

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

Для случая, когда сопротивление движению линейно зависит от пути, уравнение движения троллейбуса запишется так:

$$F = (W_0 + kS) + M_{pr} a, \tag{1}$$

где F – сила тяги троллейбуса; $W_0 + kS$ – суммарное сопротивление движению; M_{pr} – приведенная масса; a – ускорение.

Исследование динамических режимов электротранспорта при моменте сопротивления, зависящем от пути линейно, заключается в определении динамических параметров движения, обеспечивающих минимальное значение силы тяги и минимальное потребление электроэнергии тяговыми двигателями при заданных значениях W и M_{pr} . Для этого необходимо найти минимум интеграла, определяющего интегральный критерий качества работы троллейбуса:

$$L = \int_0^T F^2 dt = \int_0^T (W_0 + kS + \frac{dV}{dt})^2 dt; S = \int_0^T v dt; v(0) = v(T). \tag{2}$$

Если в качестве управляющего воздействия принять силу тяги F троллейбуса и ввести фазовые координаты: путь $X_1=S$; скорость $X_2=V$; потери в цепи двигателей $X_0=L$, то математическая модель движения троллейбуса запишется в виде:

$$f_1 = \frac{dX_1}{dt} = X_2; f_2 = \frac{dX_2}{dt} = a = \frac{F - (W_0 + M_{pr}) + kX_1}{M_{pr}}; f_0 = \frac{dX_0}{dt} = F^2. \tag{3}$$

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

$$\frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{k}{M_{pr}} \psi_2; \frac{d\psi_2}{dt} = -\psi_1; \frac{d\psi_0}{dt} = 0. \tag{4}$$

Решение системы (4):

$$\psi_1 = C_2 e^{-\pi} + C_1 e^{\pi}; \psi_2 = \frac{C_2 e^{-\pi} - C_1 e^{\pi}}{r}; \psi_0 = C_0, \tag{5}$$

где C_0, C_1, C_2 – постоянные, $r = \sqrt{k / M_{pr}}$.

Оптимальный закон изменения силы тяги определим из условия, что функция Гамильтона должна принимать максимальное значение.

Алгоритм изменения силы тяги при оптимальном движении троллейбуса:

$$F_{opt} = \frac{\beta_1 e^{rt} - \beta_2 e^{-rt}}{rM_{pr}} \quad (6)$$

Решая систему уравнений (3) с учетом (6), получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$x_1'' + r^2 x_1 = \frac{\beta_1 e^{rt} - \beta_2 e^{-rt}}{rM_{pr}^2} - \frac{(W + kS)r^2}{2M_{pr}} \quad (7)$$

решение которого можно представить в виде:

$$x_1 = (Ar+D)sh(rt) + (B+Cr)ch(rt) + \frac{W_0+k/2}{k} \quad (8)$$

Дифференцируя (8), получим выражение для скорости троллейбуса при оптимальном управлении:

$$V = (Ar+D)sh(rt) + (B+Cr)ch(rt) + \frac{W_0+k/2}{k} \quad (9)$$

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:

$$A = \frac{W_0 + kS / 2}{k}; B = \frac{W_0 r(1 - ch(rt))}{k(sh(rt) + rt)} + \frac{Sr(1 + ch(rt))}{2(sh(rt) - rt)}$$

$$C = \frac{W_0(1 - ch(rt)) + S(1 + sh(rt))}{k(sh(rt) + rt) + 2(sh(rt) - rt)}; D = \frac{W_0 r sh(rt)}{k(sh(rt) + rt)} + \frac{S r sh(rt)}{2(sh(rt) - rt)}$$

Для определения значения силы тяги из выражения (6) необходимо вычислить значения β_1 и β_2 :

$$\beta_1 = M_{pr} k(B + D); \quad (10)$$

$$\beta_2 = M_{pr} k(B - D). \quad (11)$$

Из уравнений (10), (11) с учетом уравнений (6) получим следующие выражения для пути, скорости, ускорения и тягового усилия:

$$\begin{aligned} x &= (A+Bt)ch(rt) + (C+Dt)sh(rt) - A; \\ v &= (Ar+D)sh(rt) + rt(Bsh(rt)+Dch(rt)); \\ a &= (Ar+2D)rch(rt) + Brch(rt) + rt(Bch(rt)+Dsh(rt)); \\ F &= 2M_{pr}r(Bsh(rt)+Dch(rt)). \end{aligned}$$

Условие постоянства и равенства нулю функции Гамильтона на всем отрезке времени оптимального движения, в частности, при $t=0$, дает возможность определить соотношение:

$$\frac{kS}{2W_0} = \frac{sh(rt) - rt}{sh(rt) + rt} \quad (12)$$

С учетом (12) выражения для постоянных интегрирования A, B, C, D примут вид:

$$A = -\frac{2W_0 sh(rt)}{k(sh(rt) + rt)}; B = -\frac{2W_0 ch(rt)}{k(sh(rt) + rt)}$$

RESEARCH OF BASIC EQUATION MOVEMENT OF TROLLEYBUS WITH ACCOUNTABILITY DEPENDENCE OF RESISTANCE OPPOSITION

O. Sinchuk, K. Losina

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: katices@mail.ru

The problems of development and synthesis of optimal control systems electric drive. Implementation of optimal control modes trolley helps to reduce power consumption. Software control modes trolley movement defines the parameters of the optimal dynamic modes of motion and takes into account the effect of the resistance moment depending on the profile of road traffic on the route trolleybus.

Key words: the maximum principle, optimal dynamic modes of the electric, energy savings.

REFERENCES

1. Litvinskiy L.B., Fedorchenko N.L. Development algorithms of optimal control of electric drive municipal electric // Col. of scientific papers "New technologies". – 2003. – Iss. 1. – PP. 33–35. [in Russian]

$$C = \frac{2W_0 ch(rt)}{k(sh(rt) + rt)}; D = \frac{2W_0 sh(rt)}{k(sh(rt) + rt)},$$

откуда получим выражения для постоянных B и D через A и C :

$$B = -Ar, D = -Cr.$$

Выражения для пути, скорости, ускорения и силы тяги троллейбуса будут следующими:

$$x = (Ach(rt) + Csh(rt)) - rt(Ash(rt) + Cch(rt)) - A; \quad (13)$$

$$v = -r^2 t(Ach(rt) + Csh(rt)); \quad (14)$$

$$a = -r^2(Ach(rt) + Csh(rt)) + rt(Ash(rt) + Cch(rt)); \quad (15)$$

$$F = -2M_{np}r^2(Ach(rt) + Csh(rt)); \quad (16)$$

$$F^2 = 4M_{np}^2r^4(Ach(rt) + Csh(rt))^2. \quad (17)$$

Оптимальное время движения троллейбуса определяется из выражения (12). Приравнявая ускорение нулю в (15), определяем время t_1 , при котором скорость достигает максимального значения:

$$\frac{th(rt_1) + rt_1}{rt_1 th(rt_1) + 1} = th(rt). \quad (18)$$

Максимальная скорость троллейбуса на участке:

$$v_{max} = r^2 t_1 (Ach(rt_1) + Csh(rt_1)). \quad (19)$$

Начальное ускорение a_1 и конечное замедление a_3 :

$$a_1 = \frac{2Wsh(rt)}{M_{pr}(sh(rt) + rt)}; a_3 = -\frac{2Wsh(rt)}{M_{pr}(sh(rt) + rt)}. \quad (20)$$

Потери в тяговых двигателях L :

$$L = \frac{8W^2 (sh(rt)ch(rt) - rt)}{r(sh(rt) + rt)^2}. \quad (21)$$

Максимальная сила тяги в начале движения троллейбуса определяется из уравнения:

$$F_{max} = \frac{4Wsh(rt)}{sh(rt) + rt} \quad (22)$$

ВЫВОДЫ. Исследован вопрос разработки алгоритмов энергосберегающего управления электроприводом троллейбуса для случая, когда момент сил сопротивления движению зависит от пути. На основании проведенных исследований энергосберегающие режимы работы могут быть определены исходя из полученных выражений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвинский Л.Б., Федорченко Н.Л. Разработка алгоритмов оптимального управления электроприводом городского электротранспорта // 36. наук. пр. «Нові технології». – Кременчуг: ІЭНТ. – 2003. – Вып. 1. – С. 33–35.

Стаття надійшла 9.07.2012.
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й.