

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРОЛЛЕЙБУСОМ

Федорченко Н.Л., ассист.

Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского

39600, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20

E-mail: ket@politech.poltava.ua

Сформовано умови зменшення витрат енергоресурсів при роботі троллейбуса в оптимальних динамічних режимах. Проведено аналіз ефективності режимів роботи троллейбуса, досліджено ступінь впливу режимів на енергозбереження.

Ключові слова: енергозбереження, оптимальні динамічні режими роботи, економія енергоресурсів

The energy resources saving conditions when trolleybus works in optimal dynamic regimes have been stated. The efficiency of trolleybus work regimes has been analyzed and the degree of regimes impact energy saving has been studied.

Keywords: energy saving, optimal dynamic regimes of work, energy resources saving

Введение. В настоящее время сложились негативные тенденции в области потребления электроэнергии электротранспортом, в частности троллейбусом, которые заключаются в повышенном потреблении энергоресурсов. Для того, чтобы переломить эти негативные тенденции и существенно повысить энергоэффективность работы электротранспорта, требуется внедрение комплексных методов управления электропотреблением, включающее этапы создания базы данных, выявления аномальных режимов, прогнозирования, нормирования, разработку алгоритмов энергосберегающего управления троллейбусом. Они позволяют в процессе энергосбережения задействовать системный уровень оперативного и структурного управления, который ранее не использовался. При этом в реальном масштабе времени осуществляются процедуры формирования базы данных по электропотреблению, выявлению аномальных объектов, прогнозированию, нормированию и обеспечению оптимального управления динамическими режимами троллейбуса. Это дает возможность предприятиям электротранспорта извлекать из процесса энергосбережения новые ресурсы и дополнительные конкурентные преимущества, создавая предпосылки оптимального расходования средств на перевозку пассажиров.

Анализ проблемы показывает, что последующее внедрение этих мероприятий уже на первом (организационном) этапе реализации методики энергосберегающих технологий позволяет экономить до 10–15% от объемов ежегодных выплат за потребляемую электроэнергию без существенных капитальных вложений. Последующее внедрение энергосберегающих технологий и технических решений еще больше увеличивает экономию средств. В свою очередь, менеджмент предприятия получает уникальный инструментарий, позволяющий эффективно управлять электротехническим комплексом в условиях

динамично развивающейся промышленности и демографических изменений.

Энергоемкость национального продукта на Украине в 3–4 раза выше, чем в развитых европейских странах и США, и в 7 раз выше, чем в Японии. В последние 10 – 15 лет этот показатель у нас продолжает из года в год ухудшаться. Примечательно, что здесь мы контрастируем с некоторыми бывшими республиками СССР, ныне независимыми государствами. Примером может служить Литва, где за последние десять лет отмечается рост промышленного производства при почти неизменном уровне потребления электроэнергии. Думается, ситуация изменится, если Украина пойдет по пути, пройденному США, Германией, Японией и другими странами с начала энергетического кризиса 70-х годов XX века, когда на практике стали использоваться методы исследования и оптимизации больших электротехнических и электроэнергетических комплексов и систем.

Основу энергосбережения в электроэнергетике составляет планомерная реализация комплекса технических и технологических мер, которым должна предшествовать оптимизация электропотребления инфраструктуры на системном уровне. Ее целью является упорядочивание электропотребления объектами инфраструктуры, экономия направленных на оплату за потребленную электроэнергию средств, полученная за счет организационных мероприятий, а также создание научно обоснованных предпосылок для проведения целенаправленных энергетических обследований с последующей реализацией технических и технологических мер по энергосбережению.

Анализ предыдущих исследований. Методология исследований в области энергосбережения может быть условно разделена на три уровня. Первый уровень соответствует исследованиям, нацеленным на конкретные технические и технологические разработки,

способствующие снижению энергопотребления (замена устаревшей аппаратуры, внедрение энергосберегающих частотно-регулируемых электроприводов, модернизация внутреннего электрооборудования зданий и сооружений и т.д.). В основе методологии здесь лежит имитационное моделирование, которое базируется на аксиоматике гауссовых распределений и теории оптимального управления. Это позволяет широко использовать вероятностные свертки при определении законов функционирования и квазипараллельные алгоритмы при моделировании. С другой стороны, на третьем уровне исследований осуществляется стратегическое планирование и прогнозирование в электроэнергетике.

Наиболее простой вариант использования преобразователя частоты, когда одним преобразователем управляется один электродвигатель троллейбуса. Преобразователь подключается непосредственно к одному электродвигателю и управляет его работой в зависимости от заданных параметров и получаемой от датчиков информации. При этом эффект от работы электропривода определяется снижением расхода электроэнергии и повышением качества регулируемого технологического параметра, который чаще всего и определяет качество.

Расчеты показывают, что составляющая экономии электроэнергии часто позволяет окупить затраты на установку ПЧ менее чем за 1 год и далее приносить чистую экономию. Если на объекте расположены несколько электроприводов, работающих во взаимосвязанном режиме, то целесообразно рассмотреть установку преобразователя в комплекте с системой управления электроприводов – так называемую станцию управления электроприводами.

При более сложных схемах регулирования, когда требуется контроль и регулирование по нескольким параметрам, применяются программируемые логические контроллеры на самых современных микропроцессорах ведущих фирм мира. Применение программируемых логических контроллеров позволяет создавать полностью автоматизированные объекты, включать их в схемы АСУ ТП, SCADA-системы, получая при этом максимальным экономический эффект (снижение потребления электроэнергии троллейбусами, маневрирование максимумами нагрузок в энергосистеме, снижение потерь в линиях электропередач, эффективный контроль над коэффициентом мощности и т.д.). Связующим звеном в представленной классификации является промежуточный (второй, средний) уровень исследований. На нем осуществляется оптимизация электропотребления инфраструктур, будучи взяты в целом. В качестве методологической основы на этом уровне широко применяется ранговый анализ, основывающийся на ценовом подходе, цифровой математической статистике. Именно этот уровень является ключевым при построении методологии управления электропотреблением объектов. Учитывая принципиальные концептуальные и

методологические отличия, лежащие в основе исследований на втором уровне, он рассматривается как системный по отношению к уровню исследований, касающихся конкретных технических и технологических решений в области энергосбережения.

На третьем уровне исследований осуществляется стратегическое планирование и прогнозирование в электроэнергетике.[1]

По оценкам специалистов, внедрение схем автоматизации технологических процессов в существующие типовые технологические процессы может обеспечить работу технологического оборудования в оптимальном режиме и реальную экономию энергоресурсов.

Цель работы. Рассмотреть вопросы снижения затрат энергоресурсов при оптимальных динамических режимах работы троллейбуса и выполнить анализ эффективности режимов работы троллейбуса, исследовав степень влияния режимов работы на энергосбережение.

Материалы и результаты исследований. Эффективность оптимизации алгоритмов оптимального управления троллейбусом может быть определена путем сравнения с алгоритмами рационального управления.

Основное уравнение движения троллейбуса:

$$F - \sum W = M_{np} \frac{dv}{dt}, \quad (1)$$

где F – сила тяги электропривода; $\sum W$ – суммарное сопротивление движению; M_{np} – приведенная масса;

$v, \frac{dv}{dt}$ – соответственно скорость и ускорение.

При решении задачи оптимизации необходимо найти минимум интеграла, определяющего интегральный критерий качества работы привода:

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

при соблюдении условий:

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

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

В качестве управляющего воздействия принимается сила тяги F и вводятся следующие фазовые координаты: $X_1 = X = S$; $X_2 = V$; $X_0 = L$;

Математическая модель движения троллейбуса запишется в виде:

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= \frac{dX_1}{dt} = X_2 = v \\ f_2 &= \frac{dX_2}{dt} = \frac{dv}{dt} = \frac{F - \sum W}{M_{np}} \\ f_3 &= \frac{dX_0}{dt} = \frac{dL}{dt} = F^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для решения задачи “принципом максимума” вводится система дифференциальных уравнений для вектор-функции Ψ :

$$\frac{dy_i}{dt} = - \sum_{i=1}^3 \frac{df_i}{dx_i} \quad (6)$$

Согласно теореме о принципе максимума составим функцию 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 определяется из условия, что H как функция усилия должна принимать максимальное значение:

$$dH / dt = \frac{\phi_1}{M_{np}} + 2F_{onm} Y_0, \quad (9)$$

откуда получаем

$$F_{onm} = -\frac{Y_2}{2M_{np} Y_0} = \frac{b_1 t - b_2}{M_{np}}, \quad (10)$$

где

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

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

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

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

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

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

и $C_3 = C_4 = C_5 = 0$.

После подстановки значений b_1 и b_2 в (13) получим:

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

Из условия постоянства и равенства нулю функции Гамильтона на всем отрезке времени оптимального движения при $t=0$ находим выражение для b_2 :

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

Приравняв выражения для b_2 из (14) и (16), определим оптимальное время движения

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

Время, при котором скорость достигает максимального значения, определяется из (15) при

ускорении, равном нулю для момента времени

$$t_1 = \frac{T}{2}. \quad [2]$$

Максимальное значение скорости движения получается путем подстановки значения t_1 в (15) с учетом (17):

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

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

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

$$a_3 = -\frac{\sum W}{M_{np}}. \quad (20)$$

Из последних выражений следует, что при оптимальном динамическом 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 может быть получен из (10) с учетом (14), (16) и (17).

Для оптимальной тяговой диаграммы справедлив следующий закон изменения силы тяги [2]:

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

где T_0 – время рейса при оптимальном управлении.

Из основного уравнения движения при $\sum W = 0$ и $M_{np} = 1$, получим:

$$v = F \cdot t. \quad (22)$$

Представляя значения F_0 с учетом того, что при $t=0$

$$F_0 = F_m = 2 \sum W,$$

получим:

$$v_0 = F_m \frac{t}{M_{np}} \left(1 - \frac{t}{T_0}\right), \quad (23)$$

$$v = F_m \frac{t}{M_{np}} \left(1 - 2 \frac{t}{T_0}\right). \quad (24)$$

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

$$F(t) = F_m - 2F_m \frac{t}{T}. \quad (25)$$

Чтобы исключить перегрев тяговых двигателей, должно соблюдаться условие:

$$I_k \leq I_n, \quad (26)$$

где I_k – среднеквадратичный ток; I_n – номинальный ток.

При любой форме токовой диаграммы справедливо соотношение

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

Для оптимального управления, с учетом уравнения (24), можно записать:

$$I_{ko}^2 = \frac{1}{T} \int (\sum Wk + I_{mo} - 2I_{mo} \frac{t}{T_0})^2 dt, \quad (28)$$

где $I_{mo} = F_{mo}k$; k – коэффициент.

Проинтегрировав уравнение (28), получим

$$I_{ko}^2 = \frac{I_{mo}^2}{3} + k^2 \sum W^2. \quad (29)$$

Путь, пройденный троллейбусом за время T_0 с учетом уравнения (23):

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

Выражение для среднеквадратического тока при оптимальном управлении будет следующим:

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

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

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

откуда

$$I_{kp}^2 = \frac{16S_p^2}{T_p^4}. \quad (33)$$

Учитывая, что нагрев тяговых двигателей определяется величиной среднеквадратичного тока и временем рейса, соотношение времени работы тяговых двигателей при одной и той же длине рейса (для случая $\sum W = 0$) будет следующим:

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

т.к. $Q = I_k^2 T$.

Из выражения (34) следует, что применение оптимальных тяговых диаграмм позволяет на 10% уменьшить время движения при одинаковой длине рейса по сравнению с рациональным управлением [3].

Для оптимальной тяговой диаграммы при $t = \frac{T_0}{2}$ получим значение максимальной скорости:

$$v_{mo} = \frac{F_{mo} T_0}{4} \quad (35)$$

Для рациональной тяговой диаграммы максимальная скорость:

$$v_{mp} = \frac{F_{mp} T_p}{2}. \quad (36)$$

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

$$\frac{v_{mp}}{v_{mo}} = 2 \frac{F_{mp} T_p}{F_{mo} T_0} = \left(\frac{4}{3}\right)^{\frac{2}{3}} \approx 1,2 \quad (37)$$

Таким образом, при оптимальном управлении максимальная скорость на 20% меньше скорости, соответствующего рационального управления. С учетом выражения (33), величину потерь в цепи тяговых двигателей выразим как

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

Величина потерь в цепи тяговых двигателей при оптимальном управлении будет следующей:

$$Q_o = \frac{12S_p^2}{T_p^3}. \quad (39)$$

Отношение потерь в цепи тяговых двигателей при оптимальном и рациональном управлении определяется из выражений (28) и (29).

При одной и той же длине рейса и времени движения это соотношение составит:

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

т. е. при оптимальном управлении потери в цепи тяговых двигателей уменьшаются на 33% по сравнению с потерями электроэнергии, которые имеют место в обычных динамических режимах работы.

Время же переходных процессов при оптимальном управлении уменьшается, что позволяет повысить производительность работы электротранспорта и уменьшить потребление электроэнергии [4].

Выводы. В результате проведенных расчетов получено, что применение оптимального управления троллейбусом позволяет уменьшить на 10% время движения. При этом максимальная скорость на 20% меньше скорости, соответствующего рациональному управлению, а непроизводительные потери в цепи тяговых двигателей уменьшаются на 33%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. – 384 с.
2. Безрученко В.М., Варченко В.К., Чумак В.В. Тягові електричні машини електрорухомого складу: Навчальний посібник.—Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 248 с.
4. Мокін Б.І. Оптимізація електроприводів: Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 250 с.

Стаття надійшла 21.11.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Черным А.П.