

УДК 681.513 : 620.1

В.И.НОСКОВ, канд. техн. наук
ГП «Электротяжмаш», г.Харьков

ЗАДАЧА СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Освещается вопрос разработки математической модели и синтеза на ее основе законов управления, которые дают возможность формирования силы тяги транспортного средства согласно заданному критерию качества. Приведены модели объекта управления и соотношение для проведения расчетов закона изменения силы тяги дизель-поезда. Даны рекомендации по технической реализации системы управления.

Задача синтеза системы управления движением является составной частью общей задачи создания оптимальной системы управления локомотивом, обеспечивающей четкое выполнение графика движения в соответствии с заданным критерием оптимальности, в частности, толи минимума энергетических затрат, толи разгона локомотива до определённой скорости за минимальное время. В последние годы решение этих задач предлагается выполнять с использованием современных технологий, в основе которых лежат методы анализа и синтеза сложных технических систем.

Решению подобного рода задач посвящено значительное число публикаций [1-7]. До последнего времени в связи с недостаточным развитием средств микропроцессорной техники, микроконтроллеров и микроЭВМ возможность решения подобного рода задач с использованием современных методов и оптимизации систем управления было проблематичным. Однако, создание первых украинских дизель-поездов с системами управления и диагностики на основе микроконтроллеров и бортовых ПЭВМ открыли перспективы создания и внедрения систем, в основе которых заложены современные методы анализа и синтеза.

Хотя проблемам построения систем управления с использованием современных методов оптимизации посвящено большое число публикаций, но видимо, только в работе [8] рассмотрен подход к синтезу оптимальной системы управления движением на основе метода терминального управления и здесь впервые рассматриваются вопросы создания автоматических систем управления, обеспечивающих при этом оптимизацию энергетических затрат.

Целью настоящей работы является адаптация известных математических моделей и разработка новой для синтеза системы управления движением (СУД) локомотива, обеспечивающей наилучшее распределение скоростей внутри перегона и позволяющей осуществлять пере-

вод объекта с минимальными энергетическими затратами из начального фазового состояния в конечное, за время не превышающее заданное, с соблюдением ограничений на фазовые координаты.

Выполним решение поставленной задачи – синтез СУД, оптимизирующей энергетические затраты при движении локомотива, с помощью метода терминальных управлений [8].

Для решения поставленной задачи используем уравнения динамики движения поезда и опытные характеристики дизеля и электропередачи локомотива. Окончательно математическая модель для оптимизации процесса движения исследуемого объекта представлена следующим образом:

$$m \frac{dV_T}{dt} = F_T - \varphi(x) - F_C, \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_T, \quad (2)$$

где m – масса локомотива и состава, кг; V_T – скорость локомотива, м/с; F_T – сила тяги локомотива, H ; $\varphi(x)$ – сила сопротивления, зависящая от величины уклона, H ; F_C – сила вязкого трения и сопротивления воздуха, H ; x – расстояние, отсчитываемое от станции отправления, м.

Сила $\varphi(x)$ определяется весом состава и величиной уклона соответствующего участка пути:

$$\varphi(x) = P_C i(x), \quad (3)$$

где P_C – вес локомотива и состава, H ; $i(x)$ – величина уклона.

Сила сопротивления F_C описывается известной зависимостью:

$$F_C = P_L W_0' + Q W_0'', \quad (4)$$

где P_L , Q – соответственно вес локомотива и вагонов; W_0' , W_0'' – удельные сопротивления движению локомотива и вагонов.

Согласно правилам тяговых расчетов удельные сопротивления движению локомотива определяются соотношениями:

$$W_0' = c_0 + c_1 V_T + c_2 V_T^2, \quad (5)$$

$$W_0'' = d_0 + d_1 V_T, \quad (6)$$

где c_0 , c_1 , c_2 , d_0 , d_1 – постоянные коэффициенты.

С учетом (5), (6) сила сопротивления F_C определяется следующим образом:

$$F_C = F_{C0} + a_0 V_T + a_1 V_T^2, \quad (7)$$

где $F_{C0} = P_{Л} c_0 + Q d_0$, $a_0 = P_{Л} c_1 + Q d_1$, $a_1 = P_{Л} c_2$.

Для оценки качества управляемого процесса возьмем в качестве критерия оптимальности затраты энергии. Для локомотива и дизель-поезда – это расход топлива, для электровоза – электроэнергия.

Расход топлива на прохождение перегона длиной x_0 за время T пропорционален интегралу:

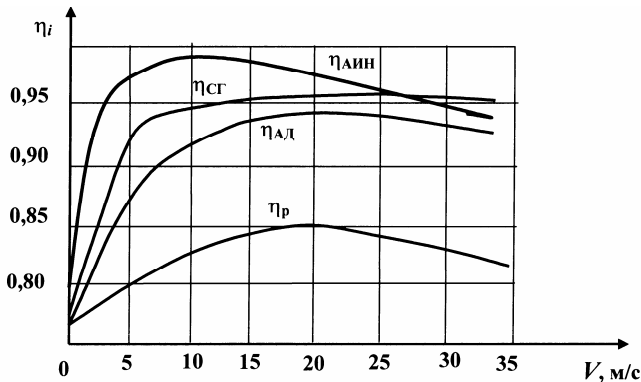
$$G = \int_0^T (F_T \frac{dx}{dt} + b_0) dt, \quad (8)$$

где b_0 – постоянная, определяемая из соотношения

$$\eta_q \eta_p = 1 / (1 + b_0 p). \quad (9)$$

Здесь η_q, η_p – коэффициенты полезного действия дизеля и электропередачи; p – мощность дизеля.

На рисунке приведены опытные характеристики электропередачи локомотива. Здесь: $\eta_{АИН}$, $\eta_{СГ}$, $\eta_{АД}$, η_p – соответственно коэффициенты полезного действия автономного инвертора напряжения, синхронного генератора, тягового асинхронного двигателя, электропередачи (результатирующей).



Опытные характеристики электропередачи локомотива

Другим критерием оптимальности может служить время прохождения перегона локомотивом. При этом ставится задача перевода объекта из начального фазового состояния в конечное за минимально возможное время.

Ограничения, наложенные на фазовые координаты, их производные и управления, определяются предельно допустимыми значениями скорости, ускорения и силы тяги.

Используя уравнения (1)-(2), описывающие динамику движения поезда, и уравнения (8)-(9), устанавливающие зависимость между силой тяги локомотива, его скоростью, мощностью дизеля, коэффициентами полезного действия дизеля и электропередачи, а также учитывая ограничения и применяя машинно-ориентированный метод терминальных управлений [8], можно осуществить синтез управлений движением объекта.

Система уравнений (1), (2) имеет только одно управление (силу тяги локомотива) и может быть представлена как частный случай объекта, описываемого уравнением вида:

$$f(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^S, u(t)) = 0$$

или $u(t) = f_1(x, \dot{x}, \ddot{x}, \dots, x^S),$ (10)

где фазовыми координатами является функция $x(t)$ и ее производные.

Определим функцию $x(t)$ и управление $u(t)$ с помощью метода терминальных управлений. Если известно начальное (A_1) и конечное (B_1) состояния объекта управления в многомерном пространстве, то существует множество фазовых траекторий, соединяющих эти точки. Причем все фазовые траектории удовлетворяют системе дифференциальных уравнений, описывающей движение объекта. О близости фазовой траектории X_j к экстремали предлагается судить по скорости изменения функционала, которая вблизи экстремума стремится к нулю. Экстремаль может быть аппроксимирована полиномом вида:

$$X_M = \sum_{i=0}^{r+n-1} C_i t^i, \quad (11)$$

где r – число начальных условий; n – число конечных условий; C_i – коэффициенты полинома; t – время. Задача оптимизации сводится к нахождению коэффициентов C_i полинома (11).

Первые r неизвестных коэффициентов для фазовой траектории, аппроксимируемой полиномом (11), определяются следующим образом [8]:

$$C_i = \frac{x_0^{(i)}}{i!}, \quad i = 0, 1, \dots, r-1, \quad (12)$$

где $x_0^{(i)}$ – начальные значения функции $x(t)$ и ее производных. Остальные n коэффициентов находятся согласно формуле:

$$C_i = \sum_{v=0}^{i-1} \frac{(r+n-v-1)!}{(r+n-i-1)!(i-v)!T^{i-v}} C_v + \sum_{v=0}^{r+n-i-1} (-1)^v \frac{(r+n-v-1)!}{i!(r+n-i-v-1)!v!T^{i-v}} x_k^{(v)},$$

$$i = r, r+1, \dots, r+n-1,$$
(13)

где $x_k^{(v)}$ – конечные значения функции $x(t)$ и ее производных при $t=T$.

Минимизация функционала может осуществляться как с помощью подбора свободных конечных условий $x_k^{(n+1)}$, $x_k^{(n+2)}$, ..., $x_k^{(n+m)}$, так и подбором коэффициентов C_i .

Для рассматриваемого объекта управления (1)-(2) искомое управляющее воздействие (10) (сила тяги) с учетом соотношений (7) и (11) вычисляется следующим образом:

$$F_T = m \frac{d^2}{dt^2} \left(\sum_{i=0}^{r+n-1} C_i t^i \right) + a_0 \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=0}^{r+n-1} C_i t^i \right) + a_1 \left(\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=0}^{r+n-1} C_i t^i \right) \right)^2 + \varphi(x) + F_{C0}.$$
(14)

Здесь коэффициенты C_i определяются по начальным x_{i0} и граничным x_{ik} ($i = \overline{1, r}$) значениям фазовых координат.

Таким образом, предложенные модели могут быть использованы для синтеза оптимальных управлений согласно заданного критерия качества и определения программного закона управления движением. В условиях эксплуатации целесообразно коэффициенты, входящие в управления, вычислять с помощью ПЭВМ с использованием программы синтеза оптимальных управлений. Для хранения данных оптимальных траекторий определенных участков пути и вычисления текущих значений управляющих воздействий целесообразно использовать бортовую ПЭВМ. Эксперименты на математических моделях показали эффективность применения предложенного алгоритма для исследования и синтеза систем управления локомотивов и дизель-поездов.

1. Костромин А.М. Об оптимальном управлении тепловозом. // Оптимизация управления и повышение эффективности работы локомотивов // Труды Белорус. ин-та инж. ж.-д. трансп. – Гомель, 1984. – С. 42–49.
2. Костромин А.М. Оптимизация управления локомотивом. – М.: Транспорт, 1979. – 119 с.
3. Streit K., Partzsch L. Telematik-Schlüsselfaktor für die moderne Bahnen // ETR - Eisenbahntechnische Rundschau. – 1997. – № 7-8. – С. 93 – 99.
4. Луков Н.М. Автоматизация тепловозов, газотурбовозов и дизель-поездов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
5. Фоминский Г.В. Автомашинист: назначение, область применения, перспективы совершенствования // Электрическая и тепловозная тяга. – 1975. – №1. – С.40-42.
6. Ерофеев Е.В., Мостов И.С. Оптимизация программ движения поездов // Труды Москов. ин-та инж. ж.-д. трансп. – 1977. – №550. – С.121-125.
7. Носков В.И., Колыбин Ю.Н., Липчанский М.В. Оптимизационная модель для синтеза терминальных управлением движением электропоезда. // Вісник НТУ "ХПІ": 36. наук. праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – №4. – С.15-19.
8. Батенко А.П. Системы терминального управления. – М.: Радио и связь, 1984. – 160 с.

Получено 12.02.2004

УДК 658.152 : 504 : 656.2

А.Б.БАБАНИН, д-р техн. наук, В.В.АРТЕМЕНКО

Українська державна академія залізничного транспорту, г.Харьків

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Приводится методика определения температуры нагрева тяговых электродвигателей локомотивов пирометром при проведении испытаний. Предложен коэффициент оценки ускорения проведения испытаний на стенде.

Тяговый электродвигатель является лимитирующим элементом оборудования вследствие наиболее жестких габаритных и весовых ограничений, а также тяжелых условий эксплуатации. Поэтому, с учетом старения парка, нагревание именно этого узла представляет особый интерес и важно достаточно точно оценить его тепловые свойства.

В процессе ремонта или модернизации тяговые двигатели подвергаются различным видам испытаний, одним из которых является проверка на нагревание на специальном стенде, где предусматривается их работа по методу взаимной нагрузки без охлаждения в часовом режиме. Сложившаяся система испытаний тяговых двигателей была создана в первые годы освоения эксплуатации тягового подвижного состава. За этот период значительно изменились конструкции, а также применяемые материалы при изготовлении и ремонте двигателей. В значительной мере стала другой и сама технология ремонта. В то же вре-