

СИНТЕЗ ТЕРМИНАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА

М.В. Липчанский
(представил проф. А.В. Королев)

Рассмотрены вопросы синтеза системы управления электроприводом постоянного тока электропоезда с использованием машинно - ориентированного метода терминальных управлений. Приведено описание алгоритма расчета вектора-функции управления, обеспечивающего оптимальный режим в соответствии с заданным критерием качества. Предложена структура программной реализации описанного алгоритма.

Одним из основных требований к системам управления электроприводом является обеспечение вывода электропоезда на заданную скорость при минимальном расходе энергии или за минимальное время при соблюдении ограничений, предусмотренных графиком движения и конструктивными и эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к системам управления, энергетическому оборудованию и др.

Практический интерес представляет задача синтеза закона управления, обеспечивающего оптимизацию энергетических затрат из начального фазового состояния в конечное с соблюдением ограничений на фазовые координаты (скорость, ускорение) и управления.

Решение данной задачи может быть осуществлено с использованием машинно - ориентированного метода терминальных управлений [1]. Основой для нахождения терминальных управлений является система дифференциальных уравнений, описывающая объект управления, величины ограничений на фазовые координаты и функции от них, оптимизирующий функционал и граничные условия на левом (при $t = 0$) и правом (при $t = T$) концах фазовой траектории. Результатом решения является вектор-функция управления $u(u_1, u_2, \dots, u_m)$, минимизирующая на отрезке времени $[0, T]$ функционал и обеспечивающая выполнение наложенных ограничений и соблюдение граничных условий.

Математическая модель электропоезда может быть представлена совокупностью моделей электропривода, состоящего из последовательно соединенных четырех тяговых электродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением и состава.

Структурная схема одного электродвигателя приведена на рис. 1, где U_{Π} – источник постоянного напряжения; E – э.д.с. якоря; $L_{\text{я}} (R_{\text{я}})$, $L_{\text{в}} (R_{\text{в}})$ – соответственно индуктивность (сопротивление) якорной цепи

и цепи возбуждения; $R_{Ш}$ – сопротивление шунтировочного резистора; $R_{Д}$ – сопротивление дополнительного (пускового) резистора.

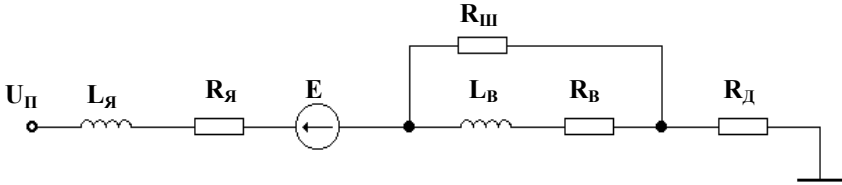


Рис. 1. Структурная схема электродвигателя

Э.д.с. якоря и поток двигателя рассчитываются по формулам:

$$E = C_e \cdot \Phi_D \cdot n; \quad (1)$$

$$\Phi_D = K \cdot W \cdot i_{LВ}, \quad (2)$$

где C_e – постоянная величина; Φ_D – поток двигателя; n – обороты двигателя; K – нелинейный коэффициент пропорциональности кривой намагничивания; W – число витков обмотки возбуждения; $i_{LВ}$ – ток цепи возбуждения.

Здесь в качестве формирователя управляющих воздействий выступает дополнительный резистор $R_{Д}$, величину сопротивления которого можно изменить путем шунтирования его отдельных составных частей и тем самым, изменяя величину тока, протекающего в якорной цепи и цепи возбуждения, поддерживать тяговый момент электропоезда, обеспечивая заданный режим движения.

Согласно [1], для нахождения терминального управления выразим величину дополнительного резистора $R_{Д}$ через фазовые координаты объекта управления, т.е. через скорость V и путь S , которые определяются уравнением движения, представленным в виде системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{R}{j} (M_T - M_H); \\ \frac{dS}{dt} = V, \end{cases} \quad (3)$$

где M_T – тяговый момент электропоезда; M_H – момент нагрузки; R – радиус колеса; j – приведенный к колесной паре момент инерции электропоезда.

До режима ослабления поля величину сопротивления шунта $R_{Ш}$ обмотки возбуждения можно не учитывать. Величинами активных сопротивлений обмоток якорной цепи и цепи возбуждения так же можно пренебречь из-за их незначительной величины. Индуктивности $L_я$ и $L_в$ заменим одной эквивалентной индуктивностью L . С учетом принятых до-

пущений величина сопротивления дополнительного резистора R_d , как функция времени $R_d(t)$, будет определяться выражением

$$R_d(t) = \frac{U_{II} - U_L(t) - E(t)}{i_{я}(t)}, \quad (4)$$

где $U_L(t)$, $E(t)$, $i_{я}(t)$ – соответственно значения в определенные моменты времени t падения напряжения U_L на индуктивности L , э.д.с. двигателя и тока якорной цепи. Величина $U_L(t)$ определяется выражением

$$U_L(t) = L \frac{di_{я}(t)}{dt}. \quad (5)$$

Как следует из (1), (2), (4), (5) $R_d(t)$ определяется током якоря $i_{я}(t)$ и скоростью движения V , которая при отсутствии буксования пропорциональна оборотам двигателя n . Если выразить ток якоря $i_{я}$ как функцию фазовых координат V и S , как того требует метод [1], то тогда, используя (4), величина сопротивления $R_d(t)$ будет определена как функция фазовых координат. Для определения величины тока $i_{я}(t)$ как функции фазовых координат воспользуемся системой дифференциальных уравнений (1), составляющими которой являются тяговый момент M_T и момент нагрузки M_H . С учетом передаточного числа μ редуктора тяговый момент M_T электропоезда определяется как

$$M_T = 4 \cdot C_M \cdot \mu \cdot \Phi_d \cdot i_{я}, \quad (6)$$

а момент нагрузки M_H :

$$M_H = a_0 + a_1 V + a_2 V^2, \quad (7)$$

где a_0 , a_1 , a_2 – постоянные коэффициенты.

Подставив (6) и (7) в (1) и разрешив ее относительно $i_{я}(t)$, найдем соотношение, определяющее зависимость тока $i_{я}(t)$ как функции фазовых координат V и S (скорости и пути), а следовательно, используя (4), и управляющее воздействие в виде функции $R_d(t)$. Тогда

$$i_{я}(t) = \sqrt{\frac{1}{K_1} \left[\frac{dV}{dt} + K_2 (a_0 + a_1 V + a_2 V^2) \right]}, \quad (8)$$

где $K_1 = \frac{R}{j} \cdot \mu \cdot C_M \cdot K \cdot W$; $K_2 = \frac{R}{j}$.

Поскольку фазовой траекторией является скорость, то согласно [1], она может быть определена формулой

$$v(t) = \sum_{i=0}^{r+m-1} C_i \cdot t^i, \quad (9)$$

где r – число начальных условий; m – число конечных условий; C_i – коэффициенты полинома.

Составляющая $\frac{dV}{dt}$, входящая в (8), легко определяется из (9), т.е.

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^{r+m-1} i \cdot C_i \cdot t^{i-1}. \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) коэффициенты C_i определяются по начальным (X_0^i) и конечным (X_0^m) условиям фазовых координат. Первые r неизвестных параметров C_i определяются по выражению

$$C_i = \frac{x_0^{(i)}}{i!}, \quad i = 0, 1, \dots, r-1. \quad (11)$$

Остальные m -параметров находятся согласно формуле

$$C_i = \sum_{\vartheta=0}^{i-1} \frac{(r+m-\vartheta-1)!}{(r+m-i-1)! \cdot (i-\vartheta)! \cdot T^{i-\vartheta}} C_{\vartheta} + \sum_{\vartheta=0}^{r-m-i-1} (-1)^{\vartheta} \frac{(r+m-\vartheta-1)!}{i! \cdot (r+m-i-\vartheta-1)! \cdot \vartheta! \cdot T^{i-\vartheta}} V_K^{\vartheta}. \quad (12)$$

Расход электроэнергии на разгон электропоезда до заданной скорости за время T пропорционален интегралу

$$F = \int_0^t i_{\text{Я}}^2(t) dt, \quad (13)$$

где t – время разгона.

Минимизация функционала (13) может быть осуществлена как с помощью подбора свободных конечных условий V_K^{m+1} , V_K^{m+2} , ..., V_K^{m+l} , так и с помощью подбора коэффициентов C_i .

Исходя из уравнений, описывающих динамику объекта и выбранного метода решения, для синтеза оптимальных управлений необходимы подпрограммы генерации случайных чисел, вычисления определенного интеграла, вычисления коэффициентов C_i , поиска безусловного экстремума функции многих переменных.

На основе приведенной математической модели разработана программа синтеза оптимальных терминальных управлений. Программа, структурная схема иерархии классов которой приведена на рис. 2, разработана на языке C++ для системы программирования MS Visual C++.

Представленные классы имеют следующее назначение. Класс **CModel** является отображением модели объекта и содержит саму модель и процедуры, независимые от типа объекта, и позволяющие выполнить оптимизацию согласно описанному алгоритму. Класс **CEngineModel** является отображением модели тягового электродвигателя объекта и

содержит методы вычисляющие значения характеристик объекта. Класс **CCurrentOptimization** вычисляет значение функционала (13), используется при оптимизации модели по расходу энергии. Класс **CTimeOptimization** вычисляет значение функционала при оптимизации модели по времени разгона; класс **CIntegral** вычисляет определенный интеграл путем дробления всего участка интегрирования на малые участки. Класс **CIntegralUnderShuntVoltage** вычисляет значение напряжения на шунте. Класс **CIntegralRotorCurrent** вычисляет значение функционала при оптимизации по расходу энергии, т. е. вычисляет определенный интеграл от квадрата тока якоря.

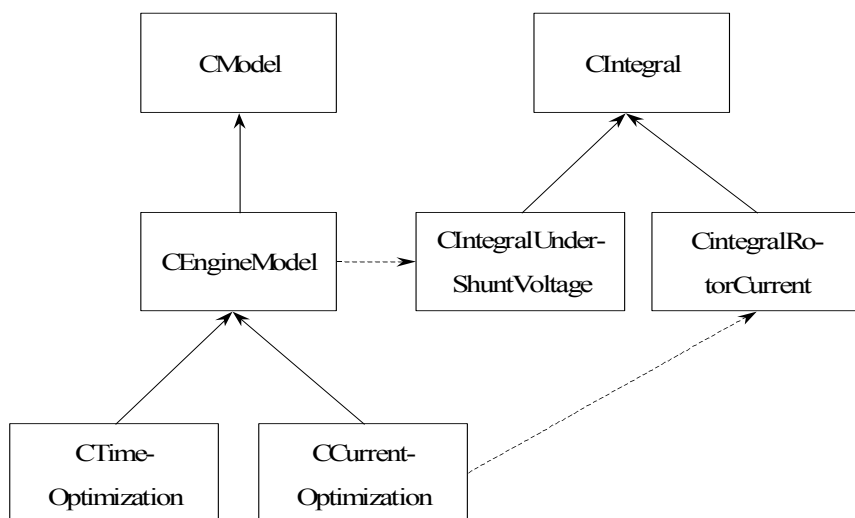


Рис. 2. Структурная схема иерархии классов программы

Программа, реализующая алгоритм, описанный выше, позволяет за конечное число итераций находить оптимальные терминальные управления, соответствующие заданному критерию качества. Как при оптимизации расхода энергии, так и для оптимизации времени движения, алгоритм и программа поиска оптимальных управлений одинаковы, отличие состоит только в уравнении функционала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батенко А.П. Системы терминального управления. – М.: Радио и связь, 1984. –160 с.

Поступила в редколлегию 22.10.2001