

УДК 621.3.049

Л.Н. Канов, доц., канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: Root@sevgtu.sebastopol.ua

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ МЕТОДА СХЕМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Использован метод схемного моделирования для анализа электромеханических процессов в электродвигателе постоянного тока. Описана методика построения схемных моделей, а также схем в производных для вычисления коэффициентов чувствительности. Приведен пример оптимизации электропривода постоянного тока.

Оптимизация управления электроприводом позволяет при минимальных затратах электроэнергии повышать производительность и быстродействие электродвигателей, поэтому проблеме оптимального управления уделяется большое внимание [1, 2]. Существуют общепризнанные методы оптимизации управления, позволяющие минимизировать как время действия привода, так и ресурсы, им используемые. Одним из эффективных методов является параметрическая оптимизация, достаточно полно изложенная в [2]. Достоинством этой работы является детальное исследование плохо обусловленных задач. В [3] изложен новый подход к оптимизации электроприводов с позиций метода конечного состояния.

Общим затруднением при решении оптимизационных задач существующими методами является трудность их реализации для сложных электромеханических систем, когда математическое описание таких систем представляет совокупность нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений, неразрешенных относительно производных. Метод конечного состояния [3], например, требует представления математического описания в виде системы дифференциальных уравнений в нормальной форме. Аналогичные требования предъявляются и другими методами оптимального управления. Между тем, многие реальные электротехнические системы, в частности, электроприводы постоянного тока, имеют сложное математическое описание, не позволяющее непосредственно применять существующие методы. Целью статьи является разработка методики оптимизации сложных электротехнических систем на основе метода схемного моделирования, позволяющей с общих позиций решать подобные задачи параметрической оптимизации.

Схемное моделирование предполагает построение схемной модели исследуемого устройства и ее анализ. Схемная модель представляет собой совокупность линейных и нелинейных проводимостей, сопротивлений, емкостей, индуктивностей, управляемых и независимых источников тока и наприя-

жения. Схемная модель строится на основании имеющегося математического описания и рассчитывается затем с помощью существующих программных средств. Электрические процессы в схемной модели отражают электромагнитные, механические, тепловые и иные процессы в исследуемом объекте с той степенью точности, какую обуславливает математическое описание. Схемное моделирование, таким образом, выгодно сочетает в себе наглядность и удобство аналогового моделирования с точностью цифрового.

Рассмотрим построение схемной модели электропривода постоянного тока на основе электродвигателя независимого возбуждения. Динамика такого двигателя описывается системой дифференциальных уравнений в относительных единицах для тока якоря i_a , тока возбуждения i_B , магнитного потока Φ и угловой скорости ω :

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_{\text{щ}}(i_a) + i_a r_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M_a \frac{di_B}{dt} + c_a \Phi \omega + w_1 \frac{d\Phi}{dt} &= u_a; \\ r_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + M_B \frac{di_a}{dt} + w_2 \frac{d\Phi}{dt} &= u_B; \\ J \frac{d\omega}{dt} + M_H + M_C + M_{TP} &= c_M \Phi i_a; \quad \Phi = \Phi(F) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Здесь $\Delta u_{\text{щ}}(i_a) = a \cdot \arctg(b i_a)$ – аппроксимация зависимости падения напряжения под щетками от тока якоря; $r_a = r_{a20}(1 + D\omega^2)$ – сопротивление якоря с учетом потерь мощности на вихревые токи в коммутируемых секциях, D – коэффициент Дрейфуса; L_a, L_B – индуктивности рассеивания обмоток якоря и возбуждения; r_B – сопротивление обмотки возбуждения; M_a, M_B – коэффициенты взаимной индукции между обмотками; c_a, c_M – постоянные коэффициенты машины; w_1, w_2 – числа витков последовательной и параллельной обмоток возбуждения; J – момент инерции ротора; M_H – момент нагрузки; M_T – момент трения в подшипниках и о воздух; $M_T = k_{TP}\omega$. Момент сопротивления M_C , вызванный механическими и электромагнитными потерями, определяется выражением

$$M_C = M_{\text{щ}} + k_{BT}(\Phi + \Phi_0)^2 \omega + k_M(\omega + \omega_M)\Phi^2,$$

где $M_{\text{щ}}$ – момент сопротивления щеток; k_{BT} – коэффициент влияния вихревых токов в пазовой части проводников якоря; k_M – коэффициент магнитных потерь; Φ_0, ω_M – постоянные коэффициенты [4]. Кроме того, в состав выражения (1) входят: намагничивающая сила $F = k_a i_a + k_B i_B$, где k_a, k_B – коэффициенты пропорциональности; аппроксимация кривой намагничивания машины $\Phi(F) = a_F \cdot \arctg(b_F F) + c_F F$; u_a, u_B – напряжения на якоре и на обмотке возбуждения.

Будем трактовать первое уравнение в системе (1) на основании первого закона Кирхгофа. Ток якоря имитируется напряжением i_a , сопротивление r_a представляет нелинейную проводимость g_1 ; L_a – емкость C_1 ; слагаемое $\Delta u_{и}(i_a)$ – нелинейный источник тока J_1 , управляемый напряжением i_a ; $M_a \frac{di_B}{dt}$ – линейный источник тока J_2 , управляемый производной тока i_B с коэффициентом управления M_a ; $w_1 \frac{d\Phi}{dt}$ – линейный источник тока J_3 , управляемый производной потока с коэффициентом w_1 ; $c_a \Phi^0$ – нелинейный источник тока J_4 , управляемый произведением потока и угловой скорости; u_a – постоянный источник тока J_5 . Все эти элементы образуют параллельный контур якорной цепи, рисунок 1, а. Проводимость g_1 является нелинейной, поскольку она зависит от скорости ω .

Аналогично во втором уравнении системы (1) ток возбуждения представим также некоторым напряжением i_B , тогда сопротивление r_B представляет линейную проводимость g_2 ; L_B – емкость C_2 ; $M_B \frac{di_a}{dt}$ – линейный источник тока J_6 , управляемый производной тока якоря с коэффициентом управления M_B ; $w_2 \frac{d\Phi}{dt}$ – линейный источник тока J_7 , – управляемый производной потока с коэффициентом w_2 ; u_B – постоянный источник тока J_8 . Эти элементы образуют параллельный контур цепи обмотки возбуждения, рисунок 1, б.

В третьем уравнении системы (1) угловая скорость имитируется напряжением ω , тогда момент инерции J представляет емкость C_3 ; $M_H = M_H(\omega)$ – ток в нелинейной проводимости g_4 ; M_{TP} – ток в линейной проводимости $g_3 = k_{TP}$; M_C – нелинейный источник тока J_9 ; $c_M \Phi i_a$ – нелинейный источник тока J_{10} , управляемый произведением потока и тока якоря. Эти элементы образуют параллельный контур скорости, рисунок 1, в.

На рисунке 1, г изображен также контур формирования магнитного потока Φ , который численно равен напряжению на единичной проводимости g_5 , подключенной к нелинейному источнику тока $J_{11} = a_F \cdot \arctg(b_F F) + c_F F$. Единичная индуктивность $L = 1$ предназначена для получения на ней производной магнитного потока $\frac{d\Phi}{dt}$, необходимой для формирования источников тока J_3, J_7 . Таким образом, схемная

модель электропривода представляет собой нелинейную цепь постоянного тока, имитирующую электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе с учетом потерь мощности.

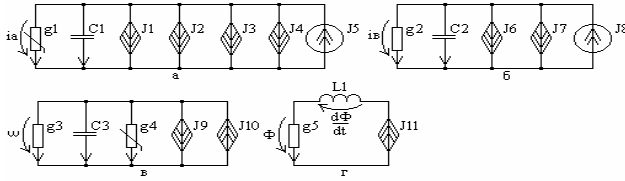


Рисунок 1 – Схемная модель двигателя постоянного тока

Рассмотрим переходный процесс пуска двигателя постоянного тока с независимым возбуждением под полным потоком. В [4] показано, что, снижая скорость нарастания и увеличивая плавность изменения напряжения якоря, можно значительно уменьшить потери энергии при пуске. Без учета потерь энергии в обмотке возбуждения потери за время пуска T можно оценить интегралом

$\int_0^T u_a i_a dt$. Предположим, что напряжение на якоре имеет вид

$u_a = \frac{2}{\pi} \arctg(k_1 t + k_2)$, где $\frac{2}{\pi}$ – нормировочный коэффициент, а коэффициенты k_1, k_2 подлежат определению с целью минимизации величины потерь энергии.

Для того, чтобы пуск был успешно завершен, в критерий оптимальности кроме потерь энергии включена с весовым коэффициентом k разность между текущим значением скорости двигателя и ее номинальным значением. Окончательно критерий оптимальности выглядит следующим образом:

$$J = \int_0^T \left[u_a i_a + k(1 - \omega)^2 \right] dt. \quad (2)$$

Градиент критерия (2) по параметрам k_1, k_2 определяется выражениями

$$\frac{dJ}{dk_i} = \int_0^T \left[\frac{du_a}{dk_i} i_a + u_a \frac{di_a}{dk_i} - 2k(1 - \omega) \frac{d\omega}{dk_i} \right] dt; \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Как следует из последнего выражения, в компоненты градиента входят функции чувствительности $\frac{di_a}{dk_i}, \frac{d\omega}{dk_i}$, $i = 1, 2$, которые являются функциями времени и подлежат определению при заданных значениях $k_i, i = 1, 2$. Для определения функций чувствительности также удобно применить

схемные модели – схемы в производных, в которых напряжения и токи представляют производные соответствующих напряжений и токов схемной модели двигателя по параметрам k_i , $i = 1, 2$.

Схемы в производных получаются дифференцированием компонентных уравнений для элементов исходной схемной модели по оптимизируемым параметрам. Рассмотрим построение схемы в производных для схемной модели двигателя на рисунке 1. Ток i_1 в проводимости g_1 определяется из выражения $i_1 = r_{a20}(1 + D\omega^2)i_a$. Дифференцируя по k_1 , получаем

$$\frac{di_a}{dk_1} = 2r_{a20}D\omega \frac{d\omega}{dk_1} i_a + r_{a20}(1 + D\omega^2) \frac{di_a}{dk_1}.$$

Таким образом, нелинейная проводимость g_1 в схеме в производных заменяется снова проводимостью $r_{a20}(1 + D\omega^2)$ и параллельно подсоединенным источником тока $J_{g1} = 2r_{a20}D\omega i_a \frac{d\omega}{dk_1}$, зависящим от произведения трех переменных: ω , i_a и $\frac{d\omega}{dk_1}$. Аналогично для нелинейной проводимости g_4 получаем ток $i_4 = M_H = \omega g_4(\omega)$ и $\frac{di_4}{dk_1} = \left(g_4(\omega) + \omega \frac{\partial g_4}{\partial \omega} \right) \frac{d\omega}{dk_1}$. Таким образом, нелинейная проводимость $g_4(\omega)$ в схеме в производных определяется суммой $g_4(\omega) + \omega \frac{\partial g_4(\omega)}{\partial \omega}$. Дифференцируя по k_1 соотношения для линейных проводимостей, управляемых источников тока, емкостей и индуктивностей, убеждаемся в том, что в схеме в производных эти элементы сохраняют свой вид, а независимый источник тока J_8 исчезает совсем. Выражения для остальных источников тока заменяются производными по k_1 :

$$\begin{aligned} \frac{dJ_1}{dk_1} &= \frac{ab}{1 + (bi_a)^2} \frac{di_a}{dk_1}; \quad \frac{dJ_4}{dk_1} = c_a \left(\frac{d\Phi}{dk_1} \omega + \Phi \frac{d\omega}{dk_1} \right); \quad \frac{dJ_5}{dk_1} = \frac{2}{\pi} \frac{t}{1 + (k_1 t + k_2)^2}; \\ \frac{dJ_9}{dk_1} &= k_{BT}(\Phi - \Phi_0) \left(2 \frac{d\Phi}{dk_1} \omega + (\Phi - \Phi_0) \frac{d\omega}{dk_1} \right) + k_M \Phi \left(\frac{d\omega}{dk_1} \Phi + 2(\omega + \omega_M) \frac{d\Phi}{dk_1} \right); \\ \frac{dJ_{10}}{dk_1} &= c_M \left(\frac{d\Phi}{dk_1} i_a + \Phi \frac{di_a}{dk_1} \right); \quad \frac{dJ_{11}}{dk_1} = \left(\frac{a_F b_F}{1 + (b_F F)^2} + c_F \right) \left(k_a \frac{di_a}{dk_1} + k_B \frac{di_B}{dk_1} \right). \end{aligned}$$

Построенная таким образом схема в производных изображена на рисунке 2. Нетрудно заметить, что схема в производных по k_2 имеет аналогичный вид с очевидной заменой k_1 на k_2 и $\frac{dJ_5}{dk_2} = \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 + (k_1 t + k_2)^2}$.

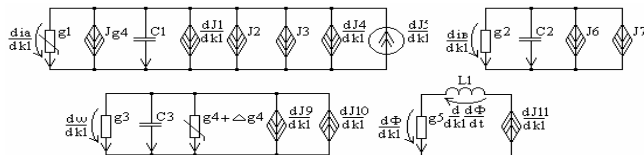


Рисунок 2 – Схема в производных по k_1

Для вычисления критерия и градиента применяется схемная модель, изображенная на рисунке 3, где критерий и компоненты градиента имитируются напряжениями на единичных емкостях, а источники тока $J_1 \dots J_3$ определяются подынтегральными выражениями в правых частях (2) и (3). Схемные модели на рисунках 1 – 3 рассчитываются одновременно с помощью существующего программного обеспечения. Начальные условия на емкостях и индуктивностях полагаются нулевыми, кроме $u_{C2}(0) = 1$ и $i_{L1}(0) = 1$ на рисунках 1, б и 1, г. К моменту окончания расчета процесса в схемной модели

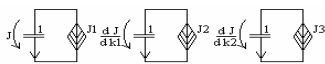


Рисунок 3 – Схемная модель вычисления критерия и градиента

напряжения на емкостях в схеме на рисунке 3 дадут величину критерия и его градиента при заданных значениях k_1, k_2 , а зависимости напряжений от времени на емкостях C_1, C_2, C_3 на рисунке 1 – переходный процесс. Полученные значения критерия и градиента используются оптимизирующими алгоритмами для определения направления поиска оптимума критерия в пространстве параметров коэффициентов k_1, k_2 .

Для иллюстрации была выполнена оптимизация переходного процесса пуска двигателя постоянного тока независимого возбуждения ДП62, имеющего мощность 46 кВт, напряжение 220 В, ток 233 А, номинальную скорость вращения $62,8 \text{ с}^{-1}$, сопротивление обмотки якоря $r_{a20} = 0,0332 \text{ Ом}$, сопротивление обмотки возбуждения $r_B = 44,4 \text{ Ом}$, момент нагрузки $M_H = 0,01 \text{ о.е.}$ В критерии оптимальности (2) весовой коэффициент $k = 1$. В качестве начальных значений оптимизируемых параметров выбраны $k_1 = 0,05; k_2 = 0,1$. При этих условиях значение критерия составило 49 о.е., градиент – $[-1000 \quad -39]^T$. После завершения процесса оптимизации зна-

чения параметров установились следующими: $k_1 = 0,022$; $k_2 = 0,102$ при величине критерия 35,3 о.е. и градиента $[0,77 - 6,6]^T$. Оптимальный переходный процесс при найденных k_1, k_2 , рассчитанный по схемной модели, изображен на рисунке 4.

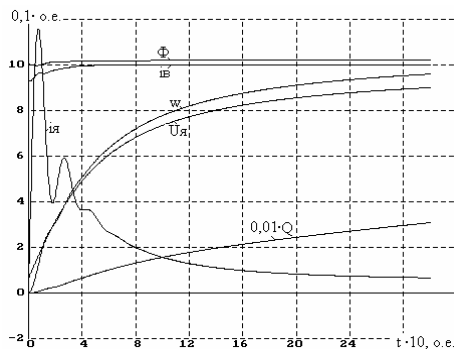


Рисунок 4 – Оптимальный процесс пуска двигателя

Из рисунка следует, что ток возбуждения и магнитный поток в процессе разгона двигателя остаются на неизменном уровне; лишь в течение первых 0,1 с ток возбуждения уменьшается на 7 % из-за первоначального всплеска тока якоря и наличия магнитной связи между обмотками якоря и возбуждения. Увеличение потока на 3 % объясняется уменьшением реакции якоря при спаде тока i_a . Оптимальный график тока при найденной, оптимальной форме напряжения u_a имеет максимум (1,15 о.е.) в момент $t = 10$ о.е. ($\approx 0,03$ с), а затем после нескольких колебаний падает до уровня 0,056 о.е., обусловленного поддержанием единичной скорости, преодолению момента нагрузки $M_H = 0,01$ о.е. и покрытию потерь. Разгон двигателя происходит за 320 о.е. (≈ 1 с); при этом напряжение на якоре достигает номинального значения.

График текущего значения потерь энергии двигателя в соответствии с интегралом $\int_0^t u_a i_a dt$ показывает, что потери монотонно растут и достигают к концу процесса пуска величины 29 о.е. Сопоставляя эту цифру с оптимальным значением критерия (35,3 о.е.), заключаем, что на долю второго слагаемого в выражении (2) приходится 6,3 о.е., т.е. найденные значения параметров k_1, k_2 действительно существенно уменьшают потери энергии при пуске.

Найденное оптимальное напряжение на якоре при пуске может быть наиболее эффективно реализовано с помощью тиристорного преобразователя

при условии, что угол отпирания тиристорov изменяется в соответствии с найденным законом оптимального напряжения:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \arctg(k_1 t + k_2).$$

С течением времени угол отпирания снижается до нуля, и на якорь подается полное напряжение. Тем самым реализуется квазиоптимальное управление, так как среднее значение напряжения приближенно соответствует его оптимальному уровню во все время пуска.

Весьма перспективным представляется оптимизация процесса пуска при других заданных формах напряжения якоря и под нагрузкой, зависящей от частоты вращения, что составит предмет дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Петров Ю.П. Новые главы теории управления и компьютерных вычислений / Ю.П. Петров. — СПб.: Изд-во «БХВ — Петербург», 2004. — 192 с.
2. Черноуцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления / И.Г. Черноуцкий. — СПб.: Изд-во «Питер», 2004. — 256 с.
3. Шушляпин Е.А. Синтез терминального управления электромеханическими системами методом конечного состояния / Е.А. Шушляпин, Л.Н. Канов // Известия вузов. Сер. Электромеханика. — 2000. — №1. — С. 72 – 75.
4. Толвинский В.А. Электрические машины постоянного тока / В.А. Толвинский. — М.;Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 468 с.

Поступила в редакцию 04.11.2004 г.