

УДК 62.83.52

**В. А. Селиванов, канд. техн. наук, доц.****КРИТЕРИИ ОПТИМИЗАЦИИ И НЕОБХОДИМОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Рассмотрены инерционности, входящие в системы электропривода постоянного тока, существенно влияющие на их поведение. Приведена целесообразность использования систем подчиненного регулирования при их настройке на оптимум по модулю и симметричный оптимум. Установлены требования к регуляторам тока и скорости, выполнение которых обеспечит получение оптимальной структуры и параметров электропривода.

Решена задача определения момента переключения в регуляторах тока и скорости, при котором наблюдается оптимальное соотношение между перерегулированием и временем переходного процесса при пуске машины по исходной информации и при возмущающих воздействиях. Это позволит решить задачу применения адаптивных регуляторов тока и скорости. Структура и параметры адаптивных регуляторов тока и скорости должны приспосабливаться к изменяющимся режимам электропривода.

Наличие инерционностей, входящих в САУ электроприводов постоянного тока, существенным образом влияет на их поведение. В большинстве случаев включение в систему инерционных звеньев понижает критический коэффициент усиления системы, что, как правило, ухудшает условия устойчивости и увеличивает ошибку системы. В связи с этим для большинства систем электропривода является целесообразным и необходимым уменьшение постоянных времени звеньев, входящих в систему. Непосредственное уменьшение постоянной времени инерционного звена, как правило, невозможно, т. к. она обусловлена в основном конструктивными параметрами звена: наличием индуктивностей, емкостей и других, сходных по физическим явлениям элементов, в которых может накапливаться энергия. Поэтому практически всегда прибегают к косвенным способам компенсации инерционностей элементов систем.

Наибольшее распространение при оптимальных настройках получил способ подчиненного регулирования [1, 2].

За оптимальный процесс обычно принимают такой, при котором максимальное перерегулирование  $\sigma \leq 5\%$  и время регулирования достаточно мало.

При более строгом подходе к этому вопросу необходимо рассмотреть условия минимума интеграла:

$$\int_0^{\infty} [1 + (\tau \cdot p)^2] \cdot x^2 dt, \quad (1)$$

где  $\tau$  — относительное безразмерное время;  $x = h_{\infty} - h(t)$ ;  $h(t)$  — переходная функция.

Преобразовав выражение (1), получим

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} [1 + (\tau \cdot p)^2] \cdot x^2 dt - 2 \cdot \int_0^{\infty} \tau \cdot x \cdot p \cdot x dt = \\ = \int_0^{\infty} (1 + \tau \cdot p)^2 \cdot x^2 dt + \tau \cdot x_0^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь и далее полагаем, что  $x, x', \dots = 0$  при  $t = \infty$ .

Таким образом, при заданных  $\tau$  и  $x_0$  полученный интеграл имеет минимум, если  $(1 + \tau \cdot p) \cdot x = 0$ , т. е.

$$x = x_0 \cdot e^{-t/\tau}. \quad (3)$$

Экспонента (3) является экстремалью, минимизирующей интеграл (1). Для некоторого объекта регулирования с передаточной функцией

$$W_{OP}(p) = \frac{K}{\prod_{i=1}^N (1 + p \cdot T_i) \cdot \prod_{k=1}^m (1 + p \cdot t_{\mu k})}, \quad (4)$$

содержащей  $N$  больших постоянных времени  $T_i$ ,  $m$  малых постоянных времени  $t_{\mu}$  и допущение малости  $\sum t_{\mu}$  по сравнению с каждой  $T_i$  (где  $\sum t_{\mu} \ll T_i$ ), оптимизация переходных процессов может быть достигнута применением некоторого регулятора, включенного последовательно с объектом регулирования в замкнутой системе и имеющего передаточную функцию

$$W_{OP}(p) = \frac{\prod_{i=1}^N (1 + p \cdot \tau_i)}{T_{\mu} p}, \quad (5)$$

где  $\tau$  – постоянная времени регулятора,  $\tau = T_i$ .

Из выражения (4) следует, что для получения оптимальной структуры и параметров регулятора необходимо следующее:

- порядок регулятора должен быть равен числу больших постоянных времени регулирования объекта;
- каждой большой постоянной времени объекта регулирования должна соответствовать равная ей постоянная регулятора;
- время интегрирования должно быть равно  $2K \sum t_{\mu}$ .

Требуемый регулятор можно реализовать в виде специального интегрирующего регулятора, в виде нескольких типовых пропорционально-интегральных (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД), включаемых последовательно в контуры объекта регулирования с большими постоянными времени.

Передаточная функция объекта регулирования (4) с регулятором (5), оптимизированным по условиям оптимума по модулю в замкнутой системе, имеет

вид:

$$W_3(p) = \frac{1}{1 + p \cdot 2 \prod_{\mu=1}^m (1 + p \cdot t_{\mu})}, \quad (6)$$

и быстродействие системы определяется коэффициентом  $2 \sum t_{\mu}$ .

Процесс характеризуется следующими параметрами:  $\sigma_{\max} = 4,3 \%$ , время первого достижения заданного значения  $t_{p1} = 3,3 \cdot t_{\mu\Sigma}$ , время регулирования  $t_{p2} = 7 \cdot t_{\mu\Sigma}$ .

Настройка систем с последовательной коррекцией по условиям оптимума по модулю дает хорошие результаты, но в ряде случаев, когда требуется повышенное быстродействие системы при возмущающих воздействиях (изменение напряжения питающей сети, наброс нагрузки), используются настройки по симметричному оптимуму.

При настройке регулятора на симметричный оптимум выражение передаточной функции замкнутой системы имеет вид:

$$W_3(p) = \frac{1 + p \cdot 2 \cdot T_i}{1 + p \cdot 2 \cdot T_i + p^2 \cdot 2 \cdot T_i^2 (1 + p \cdot T_i / 2)}. \quad (7)$$

Пренебрегая членом в скобке  $p \cdot \frac{T_i}{2}$ ,

приходим к  $W_3(p)$  (уравнение (6)), выполняющей условия оптимума по модулю. В числителе появится форсирующий член  $(1 + p \cdot 2 \cdot T)$ . В связи с этим переходные процессы по заданию будут иметь значительное перерегулирование. Процесс характеризуется следующими параметрами:  $\sigma_{\max} = 43 \%$ , время первого достижения заданного значения  $t_{p1} = 3,1 \cdot t_{\mu\Sigma}$ , время регулирования  $t_{p2} = 16,5 \cdot t_{\mu\Sigma}$ .

Значительное перерегулирование, где оно не желательно, можно исключить установкой в цепи задающего сигнала сглаживающего фильтра с передаточной функцией

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{1 + \tau \cdot p}. \quad (8)$$

В этом случае переходные процессы получаются оптимальными по модулю. С другой стороны можно ожидать повышенного качества переходных процессов при набросе нагрузки.

Рассмотренные критерии применимы к линейным (линеаризованным) системам с тиристорными преобразователями при выполнении следующих условий:

- получение линейного непрерывного эквивалента схемы;
- определение, с достаточной степенью точности, параметров системы;
- неизменность значений параметров системы во времени при изменяющихся характеристиках входных и выходных сигналов.

Кроме вышеизложенного, применяются настройки на скорректированный оптимум, являющийся некоторым промежуточным подобием двух вышеизложенных методов.

Следующим способом косвенной компенсации инерционностей является применение регуляторов с дифференциальной коррекцией. Регулятор в этой системе находится как в контуре обратной связи по скорости, так и в контуре задающего сигнала.

Его параметры рассчитываются и настраиваются по возмущающему воздействию, а корректировка по управлению осуществляется подбором фильтра  $K_{\phi}/A_{\phi}p$  в звене датчика задающего сигнала. Передаточная функция системы по управляющему воздействию имеет вид:

$$W_y(p) = \frac{\omega_0(p)}{u_3(p)} = \left( 1 + \frac{K_{\phi} K_{\Pi} B_{\Pi}(p)}{A_{\phi}(p) T_p(p)} \right) \times \left( \frac{K_M K_D T_p p}{T_{\mu} p + 1} \right),$$

где

$$T_p' = \frac{T_p}{K_{\omega} K_p K_{\Pi} K_D};$$

$$A_{\phi}(p) = B_p(p);$$

$$T_{\mu} = T_p / (K_{\phi} K_p).$$

Получим

$$W_y(p) = \frac{\omega_0(p)}{u_3(p)} = K_M K_D \frac{T_p'}{T_{\mu}}.$$

Оптимизация процессов при данном способе достигается также выбором параметров регулятора, и процессы в системе определяются малой постоянной времени  $T_{\mu}$ .

В зависимости от требований к электроприводу, системы подчиненного регулирования выполняются с пропорциональным (П) или с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором скорости.

Пропорциональный регулятор скорости используется в том случае, когда от электропривода требуются быстрый разгон и торможение и не требуется точного поддержания скорости при изменениях нагрузки.

Если требуется точное поддержание скорости при изменениях момента нагрузки на валу машины, применяется ПИ-регулятор. В связи с этим контур скорости настраивается чаще всего на оптимум по модулю или симметричный оптимум. Перерегулирование при настройке на симметричный оптимум значительно больше, чем при настройке на оптимум по модулю.

При пуске электропривода с ПИ-регулятором скорости интегральный канал сильно форсирует контур тока, а следовательно, и скорость, что приводит к большому перерегулированию.

Для уменьшения перерегулирования и времени переходного процесса целесообразно применять систему тиристорного электропривода с регулятором скорости переменной структуры.

Задача состоит в определении мо-

мента переключения, при котором наблюдается оптимальное соотношение между перерегулированием и временем переходного процесса при пуске машины при исходной информации.

Имеются три подхода к решению данной задачи. Аналитическое определение переходного процесса для двух тактов работы в соответствии со структурной схемой: первый такт описывается системой четвертого, а второй такт системой уравнений пятого порядка. Результаты работы системы в первом такте по переменным состояниям являются начальными условиями для второго такта. На этом пути встречаются три основные трудности: а) громоздкость преобразования матриц, элементы которых выражены в аналитической форме; б) усложнение аналитического решения системы дифференциальных уравнений при ненулевых начальных условиях; в) трансцендентность аналитического решения уравнений относительно времени.

С учетом вышеизложенных трудностей решение поставленной задачи первым способом возможно только методом многократного построения переходного процесса и подбором момента переключения.

Второй подход состоит в численном интегрировании системы уравнений на ЦВМ с помощью соответствующего математического обеспечения. Основная методика аналогична первому подходу.

Третий подход состоит в моделировании, который можно осуществить достаточно просто, т. к. имеется удобная для моделирования структурная схема. Такой подход достаточно прост и вполне приемлем для инженерных расчетов. В случае необходимости уточнение можно провести, используя первый или второй подход.

Высокие динамические качества контура регулирования тока и электропривода в целом как при непрерывных, так и при прерывистых токах можно обеспечить применением адаптивного регулятора тока [1...4].

В этом режиме уменьшается коэффициент усиления тиристорного преобразователя, возрастает эквивалентное сопротивление якорной цепи, изменение среднего значения тока якоря происходит без задержки. Поэтому электромагнитную постоянную времени якорной цепи в соответствующей передаточной функции принимают равной нулю.

Структура и параметры адаптивного регулятора тока связаны с режимом выпрямленного тока тиристорного преобразователя. Принципиально необходимо менять в зоне прерывистых токов ПИ-регулятор тока на пропорциональный, соответствующим образом изменяя при этом коэффициент усиления регулятора скорости. Практическое применение нашел другой способ адаптации, при котором регулятор тока, имеющий ПИ-характеристику в области непрерывных токов, в зоне прерывистых токов работает в режиме широтно-импульсного модулированного переключения (при наличии тока – ПИ-регулятор, во время паузы – И-регулятор).

Учитывая возможность получения высоких динамических показателей электропривода, в дальнейшем целесообразно рассматривать два способа: систему с переменной структурой в регуляторе скорости и адаптивный регулятор тока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский, В. А. Теория автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. Н. Попов. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с. : ил.

2. **Перельмутер, В. М.** Системы управления тиристорными электроприводами постоянного тока / В. М. Перельмутер, В. А. Сидоренко. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 304 с. : ил.

3. Синтез САУ тиристорным электроприводом с учетом зоны прерывистых токов / В. А. Селиванов [и др.] // Научные и прикладные проблемы энергетики: Респ. межведомственный сб. –

Минск, 1984. – Вып. 11. – С. 15–19.

4. **Селиванов, В. А.** Улучшение переходных процессов электропривода с переменной структурой регулятора скорости / В. А. Селиванов, В. Н. Башаримова // Автоматический контроль и управление производственными процессами : тр. респ. науч.-техн. конф. – Минск : БПИ, 1982. – С. 165–166.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 24.11.2010

**V. A. Selivanov**

**The criteria for the optimization and the necessity for the construction of electric drive parametric systems**

The lag effects inherent in the DC electric drive systems and significantly affecting their behavior are considered. It proves the expediency of using systems of subordinated regulation when making their modulus optimum and symmetric optimum adjustment. The requirements to current and speed controllers are set, the fulfillment of which will ensure getting the optimal structure and parameters of the electric drive.

The problem of determining the moment of switching in current and speed controllers is solved at which the optimal balance between the overshoot and the time of the transient process is observed when starting the machine according to the basic information and with exciting influences. It will allow solving the problem of using adaptive controllers of current and speed. The structure and parameters of the adaptive current and speed controllers must adjust to the changing operation of the electric drive.