Записки Ленинградского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LXVII, вып. 1, 1975 г.

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСКАВАТОРНЫМИ ПРИВОДАМИ

Доктор техн. наук *В. В. Рудаков*
(Ленинградский горный ин-т)

Снижение мощности управления, характерное для современных систем со статическими преобразователями, открыло широкие возможности для реализации оптимальных законов управления и повышения производительности и экономичности экскаваторов.

Одним из перспективных методов реализации оптимальных законов управления электроприводами является метод подчиненного регулирования. Принцип подчиненного регулирования предусматривает деление системы на группы звеньев с одной или двумя большими постоянными времени, каждая из которых охватывается контуром регулирования с интегрирующим регулятором. Применительно к приводу постоянного тока (рис. 1) система имеет два контура регулирования: по то-

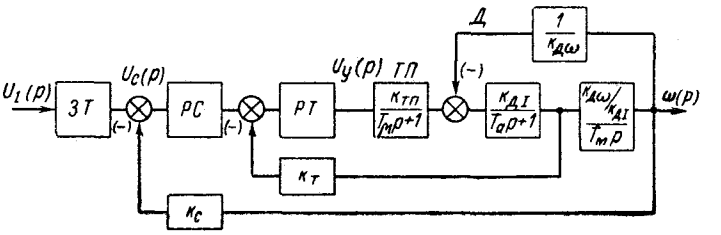


Рис. 1. Блок-схема тиристорного привода постоянного тока с последовательной коррекцией

ку якоря и по скорости двигателя. Передаточная функция силовой части привода *ТП—Д* может быть представлена в виде

$$W_{\text{т. п. д}}(p) = \frac{\omega(p)}{U_{\text{у}}(p)} = \frac{k_{\text{т. п}}\, k_{\text{д}\,\omega}}{(T_{\mu}p + 1)\,[(T_{\text{а}}p + 1)\,T_{\text{м}}p + 1]}, \qquad (1)$$

где ω — угловая скорость; $U_{\text{у}}$ — управляющее напряжение; $K_{\text{т. п}}$ — коэффициент усиления тиристорного преобразователя; $K_{\text{д}\,\omega}$ — коэффициент передачи двигателя по управляющему сигналу; $T_{\text{м}}$ — электромеханическая постоянная времени, привода, $T_{\text{м}} = \dfrac{I_{\Sigma} r_a}{C_e C_{\text{м}} \Phi_{\text{д}}^2}$; $T_{\text{а}} = \dfrac{L_c}{r_a}$ — электромагнитная постоянная времени; T_{μ} — эквивалентная постоянная времени тиристорного преобразователя с суммирующим усили-

телем на входе; I_Σ — общий момент инерции электровоза; r_a, L_a — соответственно, сопротивление и индуктивность цепи якоря двигателя постоянного тока; $C_e\Phi_д$ — коэффициент пропорциональности э.д.с. и скорости вращения якоря двигателя постоянного тока; $C_м\Phi_д$ — коэффициент пропорциональности момента и тока двигателя постоянного тока.

Внутренний контур регулирования по току якоря двигателя включает в себя большую постоянную времени T_a; внешний контур по скорости вращения двигателя — большую постоянную времени $T_м$.

В электроприводах с подчиненным регулированием наиболее распространены настройки контуров на так называемый технический оптимум * и на симметричный оптимум **.

При настройке контура регулирования с одной большой постоянной времени на технический оптимум параметры ПИ-регулятора устанавливаются такими, чтобы постоянная времени числителя передаточной функции регулятора τ равнялась большой постоянной времени передаточной функции звена объекта, входящего в контур регулирования T_0'.

Передаточная функция разомкнутого контура регулирования получается в виде

$$W_{ор}(p) = W_р(p)\, W_0'(p) = \frac{1}{\frac{T_и'}{k} p(1 + T_μ p)}, \qquad (2)$$

где

$$W_р(p) = \frac{(1 + \tau p)}{T_и' p} = \frac{(1 + T_0' p)}{T_и' p};$$

$$W_0'(p) = \frac{k}{(1 + T_0' p)(1 + T_μ p)}.$$

В замкнутом состоянии передаточная функция контура

$$\Phi'(p) = \frac{1}{\frac{T_и' T_μ}{k} p^2 + \frac{T_и'}{k} p + 1}.$$

Обозначим $p' = \sqrt{\frac{T_и' T_μ}{k}}\, p$; тогда получим $\Phi'(p)$ в нормализованной форме

$$\Phi'(p) = \frac{1}{p'^2 + Ap' + 1}. \qquad (3)$$

При настройке контура регулирования на технический оптимум принимают

$$A = \sqrt{2} = \sqrt{\frac{T_и'}{k T_μ}}. \qquad (4)$$

Откуда

$$T_и' = 2kT_μ.$$

---

* C. Kessler. Regelungstechnic, 1954, H. 12; 1955, H. 1, 2.
** C. Kessler. Regelungstechnic, 1958, H. 11, 12.

В этом случае процесс в контуре протекает достаточно быстро с перерегулированием, не превышающим 5%.

Контур с единичной обратной связью, удовлетворяющей критерию технического оптимума, аппроксимируется звеном первого порядка с передаточной функцией

$$\Phi'(p) \approx \frac{1}{1 + 2T_{\mu}p}. \tag{5}$$

При симметричном оптимуме форсировка и компенсация большой постоянной времени звеньев объекта осуществляется выбором времени интегрирования по соотношению

$$T_{и}' = \frac{8k\,T_{\mu}^2}{T_0'}. \tag{6}$$

В этом случае передаточная функция контура регулирования в разомкнутом состоянии получается в виде

$$W_{ор}'(p) = \frac{1 + \tau p}{8T_{\mu}^2 p^2 (1 + T_{\mu}p)}.$$

Применяя условия технического оптимума к характеристическому полиному, получаем следующее соотношение для постоянной времени ПИ-регулятора числителя:

$$\tau = 4T_{\mu}. \tag{7}$$

В этом случае передаточная функция контура в замкнутом состоянии может быть записана в нормализованном виде

$$\Phi'(p) = \frac{1 + 2p'}{1 + 2p' + 2p'^2 + p'^3}. \tag{8}$$

Настройка контура регулирования по условиям симметричного оптимума дает по сравнению с техническим оптимумом повышенное быстродействие системы при увеличении перерегулирования выходной величины до 45%.

Особенностью экскаваторных электроприводов является необходимость автономной оптимизации режимов работы привода: пуска, реверса, торможения, работы на упор, т. е. для этих электроприводов необходима автономная оптимизация режимов работы по управляющему и возмущающему воздействиям.

Рассмотренные выше системы электроприводов с подчиненным регулированием не дают автономности настроек регуляторов по управляющему и возмущающему воздействиям, поэтому для экскаваторных электроприводов большую перспективу имеют системы подчиненного регулирования с дифференциальными обратными связями (рис. 2).

В этой схеме генератор возбуждается от силового магнитного усилителя, который управляется промежуточным маломощным суммирующим усилителем. Промежуточный магнитный усилитель с коэффициентом усиления более 100 при наличии *RC*-обратной связи настраивается в режим ПИ-регулятора. Посредством такого регулятора форсируется возбуждение генератора, вся возбудительная цепь которого приводится к эквивалентному малоинерционному источнику.

Для коррекции характеристик привода по требованиям рационального управления используется дифференциальная обратная связь.

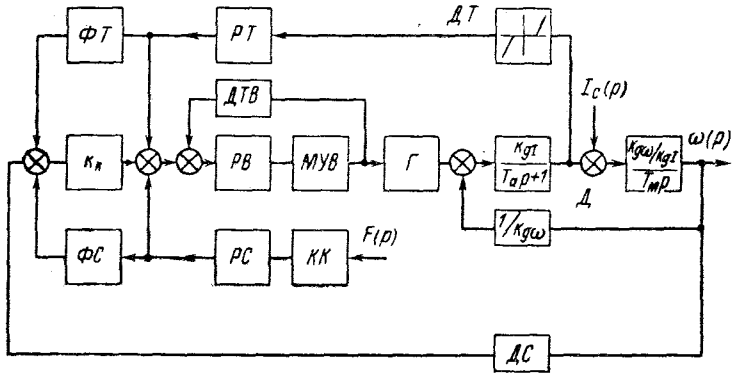


Рис. 2. Блок-схема экскаваторного электропривода по схеме СМУ—Г—Д с дифференциальной коррекцией

В суммирующий элемент этой связи через фильтр поступает задающий сигнал с требуемым темпом изменения и сигнал обратной связи по напряжению, приближенно отражающий фактическое изменение темпа нарастания и убывания скорости привода. Если эти сигналы различаются, то через звено корректора $k_к$ в возбудительную цепь генератора поступает дополнительный сигнал, корректирующий разницу в заданном и фактическом темпе изменения скорости привода до требуемой величины.

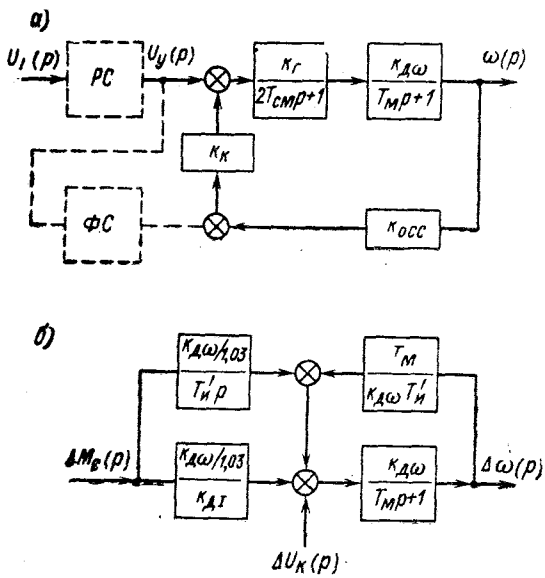


Рис. 3. Структурная схема системы СМУ—Г—Д с дифференциальной коррекцией при отработке управляющего *а* и возмущающего *б* воздействий

Ток в рассматриваемой схеме электропривода ограничивается посредством задержанной обратной связи по току нагрузки двигателя. Сигнал задержанной токовой обратной связи через вторую ПИ-ячейку подается на вход возбудительной цепи генератора привода. Параметры токовой ПИ-ячейки подбираются так, чтобы скорость привода при токоограничении снижалась с заданным темпом и, соответственно, с заданным динамическим током.

Для коррекции фактического темпа снижения скорости двигателя при токоограничении сигнал с выхода токовой ПИ-ячейки через отдельный фильтр первого порядка поступает на суммирующий элемент дифференциальной обратной связи.

Согласно преобразованной схеме СМУ-Г-Д с дифференциальной коррекцией (рис. 3, *а*) передаточная функция контура управляющего сигнала

$$W_{U1}(p) = \frac{U_у(p)}{U_1(p)} = \frac{(1 + k_{фс}\,k_к)\,(\tau_с p + 1)}{T_{ис}\,p}. \qquad (9)$$

Передаточная функция контура двигателя в этом случае

$$W_{\text{гдс}}(p)=\frac{\omega(p)}{U_{\text{у}}(p)}=\frac{\dfrac{k_{\text{г}}k_{\text{дω}}}{(1+k_{\text{г}}k_{\text{дω}}k_{\text{к}}k_{\text{осс}})}}{\dfrac{[2T_{\text{см}}T_{\text{м}}p^2+(2T_{\text{см}}+T_{\text{м}})p]}{(1+k_{\text{г}}k_{\text{дω}}k_{\text{к}}k_{\text{осс}})}+1}.$$

Передаточный коэффициент корректора $k_{\text{к}}$ выбирается из условия технического оптимума для контура двигателя. При этом он должен удовлетворять соотношению

$$\frac{2T_{\text{см}}+T_{\text{м}}}{1+k_{\Sigma}}=\sqrt{2\frac{2T_{\text{см}}T_{\text{м}}}{(1+k_{\Sigma})}}.$$

Отсюда

$$k_{\text{к}}=\frac{4T_{\text{см}}^2+T_{\text{м}}^2}{4T_{\text{см}}T_{\text{м}}k_{\text{г}}k_{\text{дω}}k_{\text{осс}}}. \tag{10}$$

Передаточная функция контура двигателя в этом случае упрощается и может быть записана в виде

$$W'_{\text{гдс}}(p)=\frac{\omega(p)}{U_{\text{у}}(p)}\approx\frac{\dfrac{k_{\text{г}}k_{\text{дω}}}{(1+k_{\Sigma})}}{2T_{\mu}p+1}, \tag{11}$$

где $T_{\mu}=\dfrac{2T_{\text{см}}T_{\text{м}}}{2T_{\text{см}}+T_{\text{м}}}$ — эквивалентная постоянная времени.

Реакция системы на наброс нагрузки в ходе токоограничения, согласно рис. 3, *б*, может быть оценена по передаточной функции

$$W_{\text{гдм}}(p)=\frac{\Delta\omega(p)}{\Delta M_{\text{с}}(p)}=\frac{1{,}03\dfrac{k_{\text{дω}}^2}{k_{\text{дт}}}}{pT'_{\text{и}}\left(\dfrac{T_{\text{м}}}{T'_{\text{и}}}+1\right)}\left(\frac{T'_{\text{и}}p+1}{\dfrac{T_{\text{м}}}{\left(1+\dfrac{T_{\text{м}}}{T'_{\text{и}}}\right)}p+1}\right), \tag{12}$$

где

$$T'_{\text{и}}=\frac{r_a}{k_{\text{г}}k_{\text{дт}}}T_{\text{ит}}.$$

Выбором величины постоянной времени интегрирования скоростной ПИ-ячейки можно установить требуемый динамический ток и темп изменения скорости привода в режимах пуска, реверса и остановки. Соответственно выбором величины постоянной времени интегрирования $T_{\text{ит}}$ токовой ПИ-ячейки можно установить требуемый динамический ток и темп снижения скорости при увеличении нагрузки на вал двигателя привода, вплоть до стопорного режима.