

ISSN 0136—3603

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

2
1982

ИЗДАНИЕ НОВОЧЕРКАССКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ

УДК 62-83:62-523.8

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ АНАЛИЗЕ И СИНТЕЗЕ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ СКОРОСТИ

С. Н. Радимов

Рассмотрены соотношения, связывающие статические и динамические характеристики аналоговой системы регулирования скорости, которые следует учитывать при разработке цифровых регуляторов скорости. Разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров системы, позволяющих простым путем определять по заданным требованиям к системе с цифровым регулятором скорости ее характеристики.

НАЗНАЧЕНИЕ регулятора скорости двигателя состоит в поддержании заданного ее значения или программном изменении. Функциональная схема электропривода при цифровом регулировании изображена на рис. 1. Цифровое значение заданной скорости Ω^*_3 в регуляторе скорости (РС) сравнивается с измеренным значением скорости Ω^* и, в соответствии с алгоритмом управления, рассчитывается задание контуру тока U^*_{3T} . Вычисление этого задания осуществляется один раз за интервал квантования T_0 . В блоке ЗУ оно запоминается до выработки задания на следующем интервале, преобразуется в блоке ЦАП из цифровой формы в аналоговую и поступает к контуру регулирования тока (КРТ). Для измерения скорости на валу двигателя устанавливается импульсный датчик, частота импульсов которого пропорциональна угловой скорости, а количество импульсов — пройденному пути. Сигналы от датчика поступают к измерителю скорости (ИС), преобразующему информацию в цифровую форму Ω^* . Рассматриваемая функциональная схема соответствует системе комбинированного управления, в которой, помимо цифрового управляющего устройства, есть подчиненный аналоговый контур тока, обрабатывающий сигналы, поступающие от внешнего цифрового регулятора.

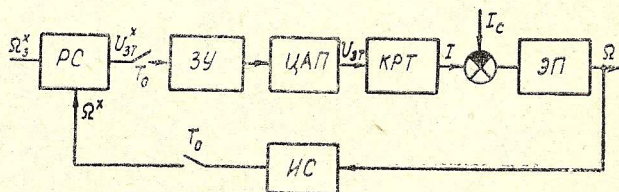


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с цифровым регулятором скорости: ЗУ — запоминающее устройство; ЦАП — цифро-аналоговый преобразователь; ЭП — электромеханическая часть привода

Для разработки алгоритма регулятора скорости необходимо располагать в качестве исходных следующими параметрами и зависимостями: величинами интервала квантования по времени и дискрет по скорости и току, моментом статического сопротивления и максимально допустимым током, а также расчетным соотношением, по которо-

му вычисляется задание контуру тока, исходя из замеренной ошибки по скорости.

Обычно для разработки алгоритмов цифровых регуляторов применяют частотные методы. Так, в [1] рассмотрен основной путь синтеза цифровых регуляторов, предусматривающий использование метода логарифмических частотных характеристик для получения дискретной передаточной функции $D(z)$ регулятора. В зависимости от вида желаемой логарифмической частотной характеристики системы синтезированный регулятор реализует пропорциональный (П) или пропорционально-интегральный (ПИ) закон [2]. В аналоговых системах с подчиненным регулированием при настройке их в соответствии с модульным или симметричным оптимумом получаются такие же законы. Ряд авторов, например [3], приводит результаты исследования динамических характеристик цифровых систем и сопоставление их со свойствами аналоговых. Эти характеристики при цифровом управлении приближаются к характеристикам аналоговых систем, причем, чем меньше интервал квантования по времени, тем ближе их свойства.

Конкретные рекомендации по выбору величины интервала квантования по времени в литературе отсутствуют. В [1] рекомендуется ограничение, базирующееся на теореме Котельникова:

$$T_0 \omega_c \ll 2, \quad (1)$$

где ω_c — частота среза системы.

В [4] аналитическим методом (по критерию Шур-Кона) показано, что система с цифровым регулятором скорости устойчива при периоде квантования

$$T_0 < 6T, \quad (2)$$

где T — постоянная интегрирования контура тока.

Рассмотрим отличающийся от известных подход к разработке алгоритма цифрового регулятора, реализующего как типовые (пропорциональный, пропорционально-интегральный), так и другие законы. Он позволяет наиболее полно учитывать свойства объекта регулирования при выборе величины периода квантования, обеспечивать взаимную увязку требований по точности измерения и регулирования подчиненных координат, а алгоритму функционирования регулятора отвечать требованию минимальной сложности.

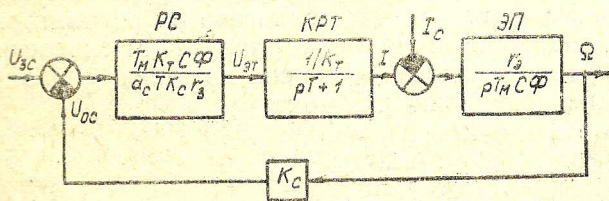


Рис. 2. Структурная схема аналоговой системы регулирования скорости: РС — регулятор скорости; КРТ — замкнутый контур регулирования тока; ЭП — электромеханическая часть привода; U_{3c} , U_{0c} — сигналы задания и обратной связи по скорости; U_{3T} — сигнал задания по току; I , I_c — ток двигателя и его статическая составляющая; Ω — скорость двигателя

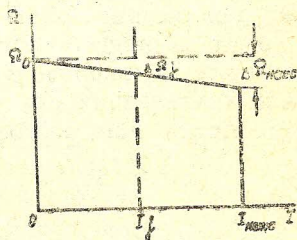


Рис. 3. Статическая характеристика аналоговой системы регулирования скорости

Электромехан.
x-Ka

Проанализируем основные соотношения, присущие аналоговым системам подчиненного регулирования электропривода, на которые будем опираться при выборе основных параметров цифровой системы управления. Полагаем, что система управления выполнена двухконтурной, с контурами тока якорной цепи и скорости двигателя (рис. 2);

контур скорости настроен на модульный оптимум [5], а влияние обратной связи по ЭДС двигателя не существенно.

Известно, что в такой системе регулятор скорости является пропорциональным, а электромеханическая характеристика привода $\Omega = I(I)$ соответствует представленной на рис. 3. Эту характеристику можно рассматривать с двух позиций. Во-первых, как изменение скорости в установившемся режиме при изменении нагрузки, приложенной к валу двигателя, и, во-вторых, как зависимость задания контуру тока от величины рассогласования между заданным и фактическим значениями скорости. Наклон рабочего участка характеристики однозначно определяется коэффициентом регулятора скорости

$$k_{pc} = \frac{\Gamma_m k_T c\Phi}{a_c T k_c r_a}. \quad (3)$$

В (3), помимо статических параметров привода и системы управления (k_T , k_c —соответственно коэффициенты обратных связей по току и скорости; $c\Phi$ —постоянная двигателя; r_a —эквивалентное активное сопротивление якорной цепи), входят также и динамические параметры (Γ_m —электромеханическая постоянная времени привода; T —постоянная интегрирования контура тока; a_c —коэффициент, обычно принимаемый равным 2, $a_c T = T_c$ —постоянная интегрирования контура скорости). Поэтому наклон характеристики жестко связан со свойствами системы не только в установившемся режиме (со статизмом), но и в переходных режимах (например, с перерегулированием). Если увеличить коэффициент k_{pc} , то наклон характеристики (статизм) уменьшится при одновременном росте перерегулирования.

Ограничение выходного напряжения регулятора скорости, являющегося сигналом задания контуру тока, определяется предельно допустимым значением тока якорной цепи $I_{\max}$.

Установим связь между величиной рассогласования по скорости $\Delta\Omega$ (разность заданной и замеренной скорости) и сигналом задания контуру тока. Например, при рассогласовании $\Delta\Omega \geq \Delta\Omega_{\max}$ заданный ток будет равен току упора $I_{\max}$. При рассогласовании $\Delta\Omega_j < \Delta\Omega_{\max}$ задание контуру тока будет соответствовать величине I_j

$$I_j = \frac{\Delta\Omega_j}{\Delta\Omega_{\max}} I_{\max}. \quad (4)$$

Таким образом, изменение рассогласования по скорости от 0 до $\Delta\Omega_{\max}$ вызывает рост задания контуру тока от 0 до $I_{\max}$. Отсюда следует вывод, справедливый при замене аналогового регулятора скорости на цифровой: по заданной точности регулирования скорости (шаг квантования по уровню) δ_Ω на основании соотношения (4) определяется шаг квантования по уровню для тока

$$\delta_I = \frac{\delta_\Omega}{\Delta\Omega_{\max}} I_{\max}. \quad (5)$$

Опираясь на (4) и (5), можно утверждать, что если в цифро-аналоговой системе при рассогласовании по скорости на величину $\Delta\Omega_j$ контуру тока на очередной интервал квантования поступает задание I_j , то при этом условии цифро-аналоговая и аналоговая системы обладают одинаковой жесткостью рабочих участков электромеханических характеристик.

Зная величины шагов квантования по уровню δ_Ω и δ_I , находим количество двоичных разрядов цифрового регулятора скорости и цифро-аналогового преобразователя. Для представления максимальной скорости Ω_0 необходимо

$$m_\Omega = \left\lceil \frac{\Omega_0}{\delta_\Omega} \right\rceil + 1 \text{ дискрет}. \quad (6)$$

а для максимального тока

$$m_I = \left\lceil \frac{I_{\max}}{\delta_I} \right\rceil + 1 \text{ дискрет.} \quad (7)$$

Следовательно, число двоичных разрядов цифрового регулятора скорости составляет

$$M_2 = \lceil \log_2 m_2 \rceil + 1. \quad (8)$$

По аналогичной (8) зависимости определяется разрядность ЦАП

$$M_I = \lceil \log_2 m_I \rceil + 1. \quad (9)$$

Для характеристики динамических свойств объекта найдем временной интервал, в течение которого привод, по якорной цепи которого протекает неизменный динамический ток $I_{\text{дин}} = I_j$, вызванный в соответствии с (4) рассогласованием по скорости $\Delta\Omega_j$, полностью устранил это рассогласование. Воспользуемся уравнением движения, записанным в конечных разностях

$$c\Phi I_j = J \frac{\Delta\Omega_j}{\Delta t}, \quad (10)$$

где J — момент инерции привода; Δt — искомый временной интервал.

Применяя (4), решаем (10) относительно Δt

$$\Delta t = \frac{J\Delta\Omega_j}{c\Phi I_j} = \frac{J\Delta\Omega_{\max}}{c\Phi I_{\max}}. \quad (11)$$

Анализируя (11), можно отметить, что время устранения рассогласования $\Delta\Omega_j$ при неизменном динамическом токе I_j будет таким же, как и для устранения рассогласования $\Delta\Omega_{\max}$ при динамическом токе $I_{\max}$. Таким образом, устранение любого рассогласования, не выходящего за пределы рабочего участка электромеханической характеристики, при постоянном динамическом токе, определяемом соотношением (4), происходит за одно и то же время.

Воспользуемся выражением для установившейся величины максимального статического падения скорости $\Delta\Omega_{\max}$ в функции тока, аналогичным приведенному в [5].

$$\Delta\Omega_{\max} = \frac{I_{\max} r_{\Sigma}}{c\Phi} \cdot \frac{a_c T}{T_m}. \quad (12)$$

Подставляя это выражение в (11), находим, что величина интервала времени равна постоянной интегрирования аналогового контура скорости

$$\Delta t = a_c T. \quad (13)$$

Отсюда следует, что в течение интервала времени $a_c T$ происходит устранение рассогласования по скорости величиной $\Delta\Omega_j \leq \Delta\Omega_{\max}$, если обусловленный этим рассогласованием динамический ток $I_j \leq I_{\max}$ поддерживать постоянным в течение указанного интервала. На основании этого свойства можно оценивать минимальное время перехода от одного значения скорости к другому. Например, минимальное время разгона привода вхолостую из неподвижного состояния до скорости Ω_0 равно

$$t_{\text{рмин}} = \frac{\Omega_0}{\Delta\Omega_{\max}} a_c T = k_{\text{рс}} a_c T. \quad (14)$$

Соотношения (4) — (9), (13) и (14), ввиду их простоты, удобно применять при расчетах систем с цифровым управлением.

Установим связь между изменениями тока якорной цепи и скорости двигателя во времени. Для этого воспользуемся структурной схемой прямого канала регулирования скорости (рис. 4). Прираще-

ние скорости за некоторый интервал времени определяется интегралом динамического тока

$$\Delta\Omega(t) = \frac{r_3}{c\Phi T_m} \int_0^t I_{\text{дин}} dt = \frac{r_3}{c\Phi T_m} \int_0^t (I - I_c) dt, \quad (15)$$

где I_c — статический ток.

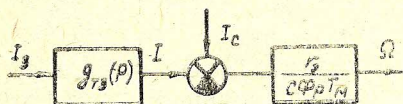


Рис. 4. Структурная схема прямого канала регулирования скорости: $g_{T3}(p)$ — передаточная функция замкнутого контура регулирования тока

Если контур регулирования тока описывается звеном первого порядка, при котором его выходная координата изменяется по закону

$$I = I_3 - e^{-t/T}(I_3 - I_{\text{нач}}), \quad (16)$$

где $I_3 = U_{3T}/k_T$, $I_{\text{нач}}$ — соответственно заданное и начальное значения тока, то приращение скорости записывается

$$\begin{aligned} \Delta\Omega(t) &= \frac{r_3}{c\Phi T_m} \int_0^t [I_3 - e^{-t/T}(I_3 - I_{\text{нач}}) - I_c] dt = \\ &= \frac{r_3 t}{c\Phi T_m} \left[I_3 - \frac{1}{t}(1 - e^{-t/T})(I_3 - I_{\text{нач}}) - I_c \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

При выборе интервала квантования по времени $T_0 = a_c T$, приращение скорости за интервал составляет

$$\Delta\Omega[T_0] = \frac{r_3 a_c T}{c\Phi T_m} \left[I_3 - \frac{1}{a_c}(1 - e^{-a_c})(I_3 - I_{\text{нач}}) - I_c \right]. \quad (18)$$

Условимся в качестве единичной скорости принимать дискрету δ_Ω , которая равна приращению скорости, происходящему за единичное время — интервал квантования по времени $T_0 = a_c T$ при неизменном единичном динамическом токе — дискрете δ_I .

Единичные величины дают возможность перейти к относительным значениям скорости $\omega = \Omega/\delta_\Omega$ и тока $i = I/\delta_I$, измеряемым числом дискрет. Такое представление удобно, так как соответствует переходу к числам, которыми оперируют цифровые регуляторы. Их применение позволяет упростить выражение для приращения скорости (18), записав его для n -го интервала

$$\Delta\omega[n] = i_3[n] - \frac{1}{a_c}(1 - e^{-a_c})(i_3[n] - i[n-1]) - i_c[n]. \quad (19)$$

Это соотношение определяет алгоритм функционирования объекта управления контура скорости, в котором учтены статические и динамические свойства объекта; соотношение является исходным при разработке алгоритма цифрового регулятора скорости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров С. М., Литвинов А. П. Автоматические системы с цифровыми управляющими машинами. — М.: Энергия, 1965, с. 224.
2. Перельмутер В. М. Анализ цифровых регуляторов частоты вращения с кодовым представлением информации. — Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод, 1979, вып. 7 (78), с. 20—25.
3. Силаев Э. Ф., Неймарк В. Е., Рахинштейн И. Х. и др. Система регулирования частоты вращения тиристорного электропривода постоянного тока с ЭВМ. — Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод, 1979, вып. 9 (80).
4. Слежановский О. В., Хуторецкий В. М. Устойчивость систем цифрово-аналогового регулирования скорости с циклической и спорадической дискретизацией сигналов. — Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод, 1977, вып. 6 (59).
5. Лебедев Е. Д., Неймарк В. Е., Пистрак М. Я. и др. Управление вентилями электроприводами постоянного тока. — М.: Энергия, 1970, с. 200.