

### К ВОПРОСУ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА СИСТЕМ МУС-Д С ППУ

В. А. СЕВАСТЬЯНОВ, А. П. ИНЕШИН

(Представлено научным семинаром кафедры электропривод и автоматизация  
промышленных установок УПИ)

В [1] было показано, что статические и динамические показатели глубоко регулируемых электроприводов по системе МУС-Д диапазона более 1 : 100 зависят, в частности, от их способа стабилизации. При этом было отмечено, что для стабилизации таких систем заслуживает внимания наиболее помехоустойчивый электромагнитный вариант коррекции, когда для снятия корректирующего сигнала используется свободная обмотка управления МУС. Ниже приводится сравнительный анализ возможных структурных решений координаты съема сигнала коррекции.

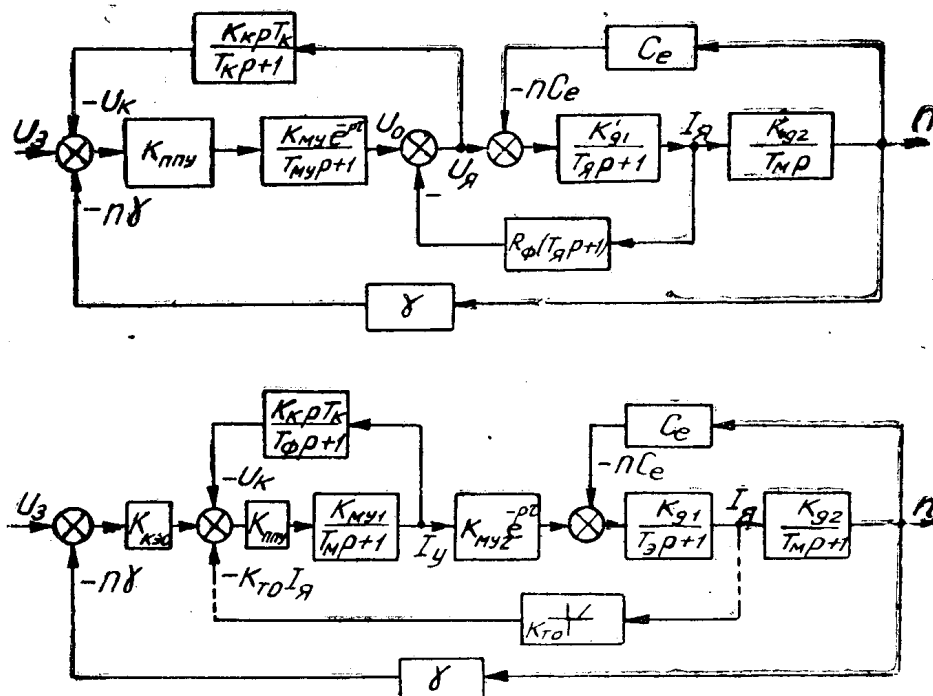


Рис. 1.

На рис. 1 приведены структурные схемы электроприводов МУС-Д:  
 а — для общепринятого способа снятия стабилизирующего сигнала в виде гибкой отрицательной обратной связи по напряжению якоря электродвигателя (цепи RC),

б — для электромагнитного варианта коррекции, примененного в [2].

Принципиально эти структуры отличаются координатой съема дифференцирующегося сигнала, что приводит, ввиду наличия у МУС постоянного запаздывания —  $\tau$ , к разной степени устойчивости внутреннего охвата САР, быстродействию и качеству переходных процессов. Выявим влияние  $\tau$  на динамические показатели САР для приведенных на рис. 1 структурных решений.

а) Влияние  $\tau$  на устойчивость работы внутреннего охвата.

Передаточная функция замкнутого внутреннего охвата САР, в соответствии со структурой рис. 1, а, может быть представлена в виде:

$$W(p) = \frac{K_{ппу} K_{му} (T_k p + 1) e^{-p\tau}}{(T_{му} p + 1) (T_k p + 1) + K_{ппу} K_{му} K_k T_k p e^{-p\tau}}. \quad (1)$$

Здесь:  $K_{му}$ ,  $K_{ппу}$  — коэффициент усиления силового магнитного (МУС) и промежуточного полупроводникового (ППУ) усилителей;

$T_{му}$ ,  $T_k$  — постоянная времени МУС и цепи коррекции;

$K_k$  — коэффициент передачи цепи коррекции;

$p$  — оператор дифференцирования;

$e$  — основание натуральных логарифмов.

Передаточная функция замкнутого внутреннего охвата САР рис. 1, б, приведенной к равноценным условиям стабилизации по сравнению со схемой рис. 1, а, (в цепь коррекции включен последовательно элемент с передаточным коэффициентом  $K_{му}$ ), отличается от (1) отсутствием множителя  $e^{-p\tau}$ .

Уравнение Д-разбиения по параметру  $K_{ппу}$  в соответствии с (1) будет:

$$K_{ппу}(j\omega) = -\frac{T_{му} + T_k}{K_{му} T_k} e^{j\omega\tau} - j \frac{T_{му} T_k \omega - \frac{1}{\omega}}{K_{му} T_k} e^{j\omega\tau}, \quad (2)$$

где по Эйлеру  $e^{j\omega\tau} = \cos \omega\tau + j \sin \omega\tau$ .

После подстановки  $e^{j\omega\tau}$  в (2) и преобразований окончательно получим:

$$K_{ппу}(j\omega) = \frac{\left(T_{му} T_k \omega - \frac{1}{\omega}\right) \sin \omega\tau - (T_{му} + T_k) \cos \omega\tau}{K_{му} K_k T_k} - j \frac{\left(T_{му} T_k - \frac{1}{\omega}\right) \cos \omega\tau + (T_{му} + T_k) \sin \omega\tau}{K_{му} K_k T_k}. \quad (3)$$

Для варианта «б» в (3) необходимо положить  $\tau=0$ , тогда

$$K_{ппу}(j\omega) = -\frac{T_{му} + T_k}{K_{му} K_k T_k} - j \frac{T_{му} T_k \omega - \frac{1}{\omega}}{K_{му} K_k T_k}. \quad (4)$$

На рис. 2 приведены кривые Д-разбиения рассчитанные по уравнениям (3) и (4) для принятых значений параметров:

$$T_{му} = 0,45 \text{ сек}; T_k = 0,1 \text{ сек}; K_k = 1; K_{му} = 20.$$

Из анализа уравнений (3), (4) и кривых следует, что при  $\omega=0$   $K_{ппу}$  не зависит от  $\tau$  кривые Д-разбиения выходят из одной характерной точки:

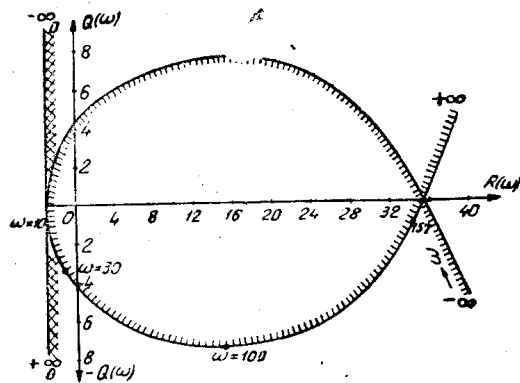


Рис. 2.

$$K_{ппу}(0) = -\frac{T_{му} + T_k}{K_{му} K_k T_k},$$

то есть на небольших частотах системы ведут себя примерно одинаково.

На средних и больших частотах внутренний охват САР варианта б ( $\tau=0$ ) не зависит от  $\tau$  и устойчив при любом  $K_{ппу}$ , в то время как в варианте а ( $\tau \neq 0$ ) область устойчивости ограничена значением  $K_{ппу} = 36,4$ , что снижает диапазон регулирования скорости.

Так как  $K_{ппу}$  представляет собой действительное число и  $K_{му} K_k T_k \neq \infty$ , то его значение принципиально можно было бы получить из соотношения (5):

$$R(\omega) = K_{ппу}(\omega) = \frac{(T_{му} T_k \omega - \frac{1}{\omega}) \sin \omega \tau - (T_{му} + T_k) \cos \omega \tau}{K_{му} K_k T_k} \quad (5)$$

после подстановки в него  $\omega$ , найденной из условия

$$(T_{му} T_k - \frac{1}{\omega}) \cos \omega \tau + (T_{му} + T_k) \sin \omega \tau = 0.$$

Однако найти  $\omega$  из последнего соотношения в явной форме нельзя, поэтому приходится ограничиваться графическим построением кривой Д-разбиения и нахождением из нее  $K_{ппу}(\omega) = R(\omega)$ .

На рис. 3 приведены частотные характеристики (кривые 1 и 2), рассчитанные согласно уравнению (6) для разомкнутого внутреннего охвата САР рис. 1 а, б для  $\tau=0$ ,  $\tau=0,01$  сек и тех же прочих условий.

$$W_p(j\omega) = \frac{K_{ппу} K_{му} e^{-j\omega\tau}}{T_{му} j\omega + 1} \cdot \frac{K_k T_k j\omega}{T_k j\omega + 1} \quad (6)$$

Из сопоставления характеристик следует, что внутренний охват САР, приведенный на рис. 1, б, имеет большой запас устойчивости по модулю и фазе, что объясняется отсутствием влияния запаздывания.

В общем случае промежуточный усилитель может обладать постоянной времени  $T_{пу}$ .

Тогда амплитудно-фазовые частотные характеристики для разомкнутого внутреннего охвата САР рис. 1, а будут:

$$W_p(j\omega) = \frac{K_{пу}}{T_{пу} j\omega + 1} \cdot \frac{K_{му} e^{-j\omega\tau}}{T_{му} j\omega + 1} \cdot \frac{K_k j\omega}{T_k j\omega + 1} \quad (7)$$

На рис. 3 приведены амплитудно-фазовые частотные характеристики, рассчитанные согласно уравнению (7) для  $\tau=0$  (кривая 3) и  $\tau=0,01$  сек (кривая 4).

Из сравнения этих характеристик следует, что при применении инерционного промежуточного усилителя САР рис. 1, б ввиду отсутствия в нем запаздывания  $\tau$ , имеет более устойчивый внутренний охват.

Это выгодно отличает ее от схемы рис. 1, а с точки зрения унификации схемы (попытки применения промежуточного магнитного усилителя).

б) Влияние запаздывания  $\tau$  на устойчивость замкнутой нескорректированной САР по внешнему охвату.

Уравнения Д-разбиения по параметру  $K_{ппу}$  для внешнего охвата нескорректированной замкнутой САР в соответствии со структурной схемой рис. 1, а может быть представлено в виде:

$$K_{ппу}(j\omega) = \frac{\omega(a_0\omega^2 - a_2) \sin \omega\tau + (a_1\omega^2 - 1) \cos \omega\tau}{K} - j \frac{\omega(a_0\omega^2 - a_2) \cos \omega\tau - (a_1\omega^2 - 1) \sin \omega\tau}{K}, \quad (8)$$

где:

$$\begin{aligned} a_0 &= T_{му} T_9 T_M; \\ a_1 &= T_{му} T_M + T_9 T_M; \\ a_2 &= T_{му} + T_M + T_9; \\ K &= K_{кэс} K_{му} K_d \gamma. \end{aligned}$$

На рис. 4 приведены кривые Д-разбиения, построенные по уравнению (8).

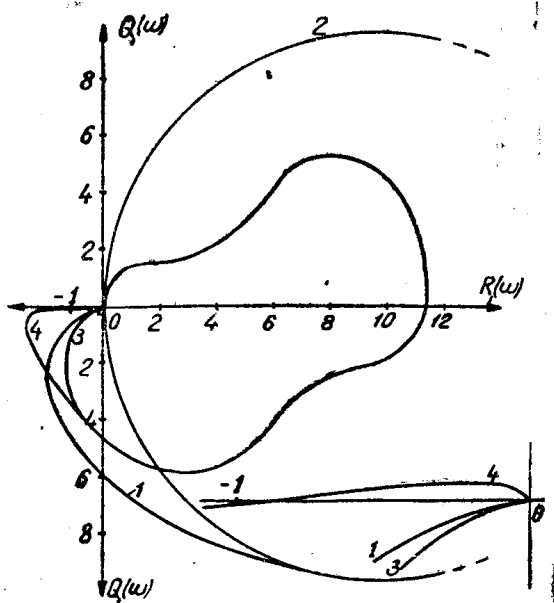


Рис. 3.

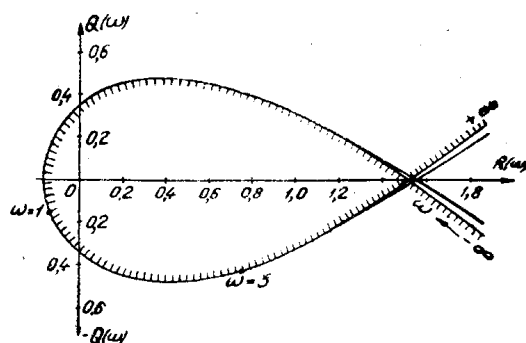


Рис. 4.

Из анализа кривых и выражения (8) следует, что при  $\omega = 0$   $K_{ппу}(0) = \frac{a_1\omega^2 - 1}{K} = \text{const}$  и от запаздывания  $\tau$  не зависит, то есть при небольших частотах поведение систем в динамике примерно одинаково. При  $\omega \neq 0$ , в связи с тем, что в замкнутой нескорректированной САР двигатель работает обычно при частоте близкой к резонансной

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{T_9 T_M}},$$

которая колеблется в пределах  $(15 \div 16) \frac{1}{\text{сек}}$ , запаздывание  $\tau$  на устойчивость работы САР практического влияния не оказывает, что подтверждается совпадением кривых Д-разбиения рис. 4. При этом область устойчивости ограничивается  $K_{ппу} = 1,8$ , что соответствует  $D \approx 12,7$ .

в) Влияние запаздывания  $\tau$  на устойчивость работы замкнутой по внешнему охвату скорректированной САР.

Уравнения Д-разбиения по параметру  $K_{ппу}$  для внешнего охвата скорректированной замкнутой САР в соответствии со структурой рис.

1, а с учетом запаздывания  $\tau$  может быть получено из характеристического уравнения (9) после подстановки в него  $p=j\omega$ , которое для варианта а может быть представлено в виде:

$$a_0' (j\omega)^4 + a_1' (j\omega)^3 + a_2' (j\omega)^2 + a_3' (j\omega) + a_4' = 0, \quad (9)$$

где

$$a_0' = T_{\text{МУ}} T_{\text{Э}} T_{\text{М}} T_{\text{К}},$$

$$a_1' = T_{\text{МУ}} T_{\text{К}} T_{\text{М}} + T_{\text{МУ}} T_{\text{Э}} T_{\text{М}} + T_{\text{К}} T_{\text{Э}} T_{\text{М}} + \frac{R_{\text{Я}}}{R_{\text{Э}}} K_{\text{ППУ}} K_{\text{МУ}} T_{\text{К}} T_{\text{Э}} T_{\text{М}} e^{-j\omega\tau},$$

$$a_2' = T_{\text{МУ}} T_{\text{М}} + T_{\text{Э}} T_{\text{М}} + T_{\text{К}} T_{\text{М}} + T_{\text{МУ}} T_{\text{К}} + \frac{R_{\text{Я}}}{R_{\text{Э}}} K_{\text{ППУ}} K_{\text{МУ}} K_{\text{К}} T_{\text{К}} T_{\text{М}} e^{-j\omega\tau},$$

$$a_3' = T_{\text{МУ}} + T_{\text{К}} + T_{\text{М}} + K_{\text{ППУ}} K_{\text{МУ}} K_{\text{К}} T_{\text{К}} e^{-j\omega\tau} + K_{\text{ППУ}} K_{\text{МУ}} K_{\text{Д}} K_{\text{КЭС}} T_{\text{Ф}} e^{-j\omega\tau},$$

$$a_4' = 1 + K_{\text{ППУ}} K_{\text{Д}} K_{\text{КЭС}} \gamma e^{-j\omega\tau}.$$

Уравнение для варианта б имеет аналогичный вид, но отличается отсутствием множителя  $e^{-j\omega\tau}$  в коэффициентах  $b_1$  и  $b_2$

$$b_0 (j\omega)^4 + b_1 (j\omega)^3 + b_2 (j\omega)^2 + b_3 (j\omega) + b_4 = 0. \quad (10)$$

После подстановки численных значений параметров и преобразований соответственно получим для варианта «а»:

$$K_{\text{ППУ}}(j\omega) = \frac{A(\omega)}{B(\omega)} - j \frac{C(\omega)}{B(\omega)}, \quad (11)$$

для варианта «б»:

$$K_{\text{ППУ}}(j\omega) = \frac{D(\omega)}{E(\omega)} + j \frac{G(\omega)}{E(\omega)}, \quad (12)$$

где  $A(\omega)$ ,  $B(\omega)$ ,  $C(\omega)$ ,  $D(\omega)$ ,  $G(\omega)$ ,  $E(\omega)$  — сложные функции частоты  $\omega$  и зависят от запаздывания  $\tau$ .

На рис. 5 приведены кривые Д-разбиения, рассчитанные и построенные по уравнениям (11) и (12) для принятых параметров:

$T_{\text{МУ}} = 0,45$  сек;  $T_{\text{Э}} = 0,02$  сек;  $T_{\text{М}} = 0,2$  сек;  $\tau = 0,01$  сек;  $T_{\text{К}} = 0,01$  сек;  
 $K_{\text{МУ}} = 20$ ;  $K_{\text{К}} = 1$ ;  $R_{\text{Я}} = 1,36$  ом;  
 $R_{\text{Э}} = 12$  ом;  $K_{\text{Д}} = 10$ ;  $\gamma = 0,067$ .

Из сравнения кривых видно, что зона устойчивости работы

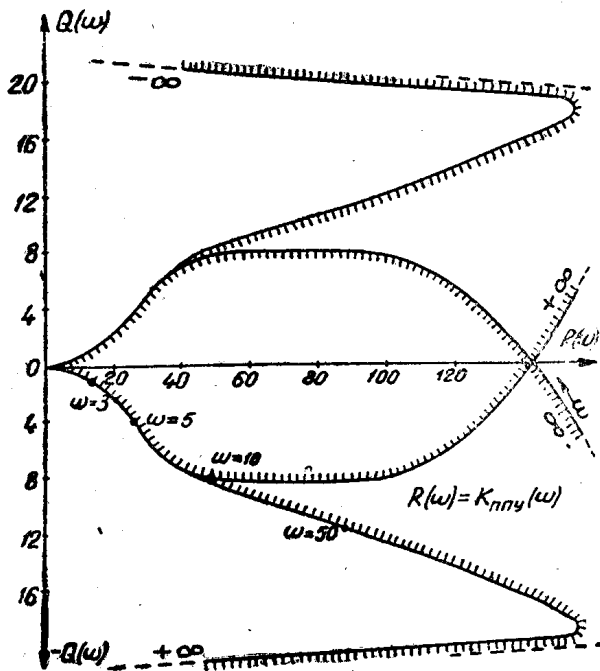


Рис. 5.

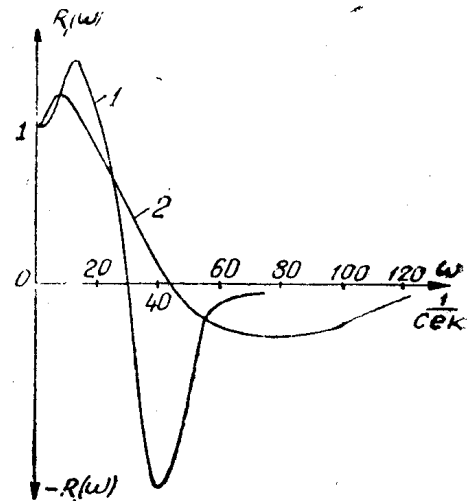


Рис. 6.

САР рис. 1, а ограничена значением  $K_{\text{ппу}} = 140$ , что соответствует диапазону регулирования скорости  $D \approx 75$ , в то время как в варианте САР, рис. 1, б он практически не ограничен, так как зона устойчивости определяется пересечением асимптот кривых  $D$ -разбиения в точке  $K_{\text{ппу}} = 560$  рис. 5 (пунктиром).

Быстродействие рассмотренных САР и качество регулирования можно оценить по вещественным частотным характеристикам, которые согласно методике [3] построены по полученным кривым  $D$ -разбиения и приведены на рис. 6.

Из сравнения характеристик  $R(\omega)$  для рассмотренных САР следует:

1. Переходные процессы рассматриваемых САР не монотонны и отличаются некоторой колебательностью, так как их  $R(\omega)$  имеют явно выраженные максимумы соответственно при частотах  $\omega = 12$  и  $38 \frac{1}{\text{сек}}$  (кривая 1), и  $\omega = 8$  и  $85 \frac{1}{\text{сек}}$  (кривая 2), что является характерным для систем МУС-Д. Однако отсутствие разрывов неравномерности и обращения  $R(\omega)$  в бесконечность свидетельствует о вполне удовлетворительном характере переходных процессов, отсутствии незатухающих гармонических колебаний, устойчивости работы и работоспособности привода в целом.

2. Характеристика  $R(\omega)$  варианта САР рис. 1, б (кривая 2) отличается более равномерным затуханием, что свидетельствует о меньшей колебательности и большей монотонности протекания переходного процесса.

3. В связи с тем, что интервал положительности  $\omega_{\text{пб}} = 45$  (варианта б) больше такового  $\omega_{\text{па}} = 30$  (вариант а) и  $R_b(\omega)$  «шире» чем  $R_a(\omega)$ , то время переходного процесса

$$t_{\text{ппб}} = \frac{\pi}{45} < t_{\text{ппа}} = \frac{\pi}{30},$$

то есть вариант (б), ввиду меньшего влияния запаздывания  $\tau$ , является более быстродействующим.

### Выводы

1. Постоянное запаздывание  $\tau$  влияет практически на диапазон регулирования, устойчивость работы привода и быстродействие только скорректированной САР, что зависит, в частности, от схемных решений: места съема сигнала коррекции и ее типа.

2. Нескорректированная система МУС-Д из-за низких статических и динамических свойств может применяться в электроприводе только с небольшим диапазоном регулирования скорости.

3. Реализация структуры с параллельной коррекцией цепью RC для диапазона регулирования более, чем 1 : 100, затруднительна ввиду плохой помехозащищенности и противоречия между условием устойчивости внутреннего охвата преобразователя и динамикой системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Севастьянов, А. П. Инешин. Системы электропривода с магнитно-полупроводниковыми преобразователями (МУС-Д с ППУ), Приволжское книжное изд-во 1966.
2. В. А. Севастьянов, А. П. Инешин, А. П. Рыбакова. Разработка и исследование электропривода МУС-Д с ППУ класса Д. Известия ТПИ, том 153, 1965.
3. М. В. Мееров. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности, Физматгиз, 1959.