

СТАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИВодОВ МУС-Д  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ВВЕДЕНИЯ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ  
ПО ТОКУ

В. А. СЕВАСТЬЯНОВ, А. П. ИНЕШИН

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

В [1] показано, что статические показатели привода во многом зависят от схемных решений. Одним из требований, предъявляемых к приводу подачи, является постоянство статической ошибки по диапазону [2], которая не должна выходить за пределы допустимой  $\pm (5 \div 10)\%$ .

Аналитическое выражение статической ошибки ( $\Delta\%$ ) для типовой разомкнутой САР МУС-Д в соответствии со схемой рис. 1 [3] и блок схемой рис. 1, а может быть представлено в виде:

$$\Delta_p^{0/o} = \frac{I_{ян}(R_я + R_ф)}{\alpha U_п K_{му}} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $U_п$  — напряжение питания обмоток управления МУС;

$K_{му}$  — коэффициент усиления МУС по напряжению;

$\alpha$  — установка скорости;

$R_я, R_ф$  — соответственно, сопротивления якоря двигателя и фиктивное сопротивление МУС;

$I_{ян}$  — номинальное значение тока якоря двигателя.

Здесь в общем случае  $R_ф$  и  $K_{му}$  являются сложными функциями  $\alpha$ , а  $R_ф$  зависит, кроме того, от тока нагрузки  $I_я$ .

Полагая пока, для упрощения анализа, что  $K_{му}(\alpha) = \text{const}$ ,  $R_ф(\alpha) = R_{ф\text{ ср.}} = \text{const}$  и не зависит от  $I_я$ , можно считать, что

$$\Delta_p^{0/o} = \frac{A}{\alpha},$$

где

$$A = \frac{I_{ян}(R_я + R_ф)}{U_п K_{му}} \cdot 100 = \text{const}.$$

Видим, что  $\Delta_p^{0/o}(\alpha)$  изменяется примерно по гиперболическому закону. На рис. 2 построена зависимость  $\Delta_p^{0/o}(\alpha)$  для ПМУ9М. Из анализа этой кривой следует, что в разомкнутой САР, с учетом принятых допущений,  $\Delta_p^{0/o}(\alpha)$  изменяется по диапазону в больших пределах и выходит за рамки допустимых.



В реальном приводе  $R_{\phi}(\alpha) \neq \text{const}$ , а изменяется согласно проделанным расчетам от 23 до 2 ом, что приводит к перераспределению  $\Delta_p^{0/0}(\alpha)$  по диапазону (рис. 2, кривая 1 пунктиром): возрастанию ее при  $\alpha < 0,5$  и уменьшению при  $\alpha > 0,5$ . Причем при  $\alpha = 1$ ,  $\Delta_p^{0/0} = 40\%$ , при  $\alpha = 0,1$ ,  $\Delta_p^{0/0} = 400\%$ .

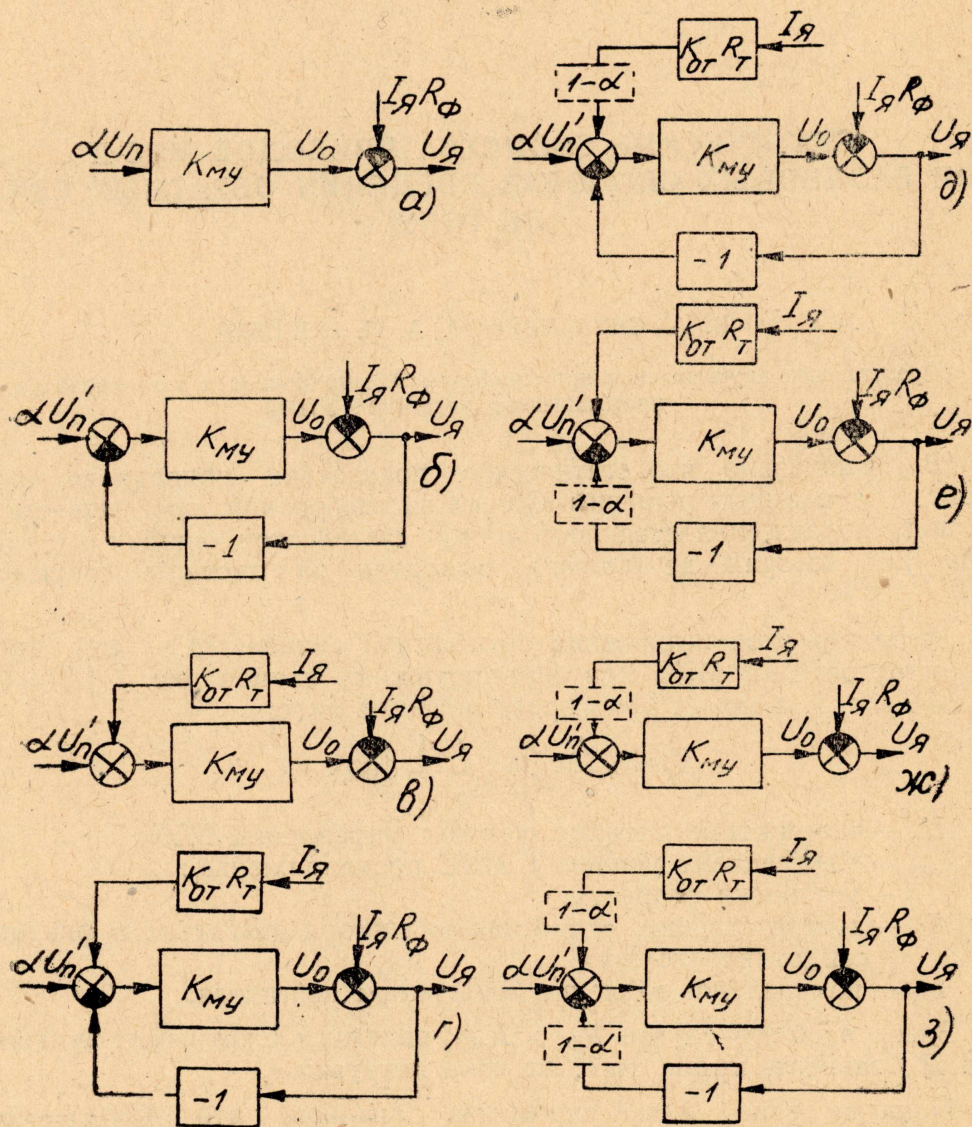


Рис. 1. Блок-схемы.

Очевидно такой привод не обеспечивает необходимого диапазона регулирования скорости и не удовлетворяет требованиям предъявляемым механизмом подачи станков.

Для повышения жесткости механических характеристик и расширения диапазона регулирования скорости в глубокорегулируемых приводах МУС-Д применяют обратные связи по напряжению, току якоря, скорости двигателя и др. Выявим влияние обратной связи по напряжению якоря  $U_{я}$  на статическую ошибку.



Статическая ошибка САР замкнутой единичной жесткой отрицательной обратной связью по напряжению якоря (ж. о. о. с. н.), в соответствии с блок-схемой рис. 1, б будет:

$$\Delta_{36}^{0/0} = \frac{I_{яв} \left( R_{я} + \frac{R_{\phi}}{1 + K_{му}} \right)}{\alpha U_{п} K_{му}} 100. \quad (2)$$

Здесь  $U_{п} = \frac{U'_{п}}{1 + K_{му}}$ , где  $U'_{п}$  — напряжение питания в замкнутой САР.

Из (2) следует, что ж. о. о. с. н. в системе МУС-Д уменьшает  $R_{\phi}$  в  $(1 + K_{му})$  раз, а следовательно и  $\Delta_{36}^{0/0}$ . Так как все величины входящие в (2) могут иметь только положительные значения,

то при всех значениях  $\alpha$  соблюдается условие  $\Delta_{36}^{0/0} > 0$ . Принимая те же допущения, на рис. 2 показана зависимость  $\Delta_{36}^{0/0}(\alpha)$  (кривая 2), рассчитанная согласно уравнению (2) для тех же прочих равных условий. Из них следует, что при введении ж. о. о. с. н. в закон регулирования  $\Delta_{36}^{0/0}$  также изменяется в функции  $\alpha$  по убывающему примерно гиперболическому закону, однако при одном и том же  $\alpha$ ,  $\Delta_{36}^{0/0}$  имеет меньшее значение, чем в разомкнутой САР. Здесь же для сравнения (пунктиром) приведена эта зависимость с учетом изменения  $R_{\phi}(\alpha)$  по диапазону. Из нее следует, что снижение  $\Delta_{36}^{0/0}$  существенно сказывается лишь на больших скоростях при  $\alpha = 1$ , то есть при небольших  $R_{\phi}$  (здесь  $\Delta = 20\%$ ), в то время как внизу диапазона, ввиду малого  $K_{му}$  и большого  $R_{\phi}(\alpha) \gg R_{я}$ , действие ж. о. о. с. н. оказывается недостаточным и  $\Delta_{36}^{0/0}$  остается недопустимо большой. Следовательно, в системах МУС-Д ввиду нелинейности  $R_{\phi}(\alpha)$  и  $K_{му}(\alpha)$ , ж. о. о. с. н. может обеспечивать необходимую жесткость механических характеристик лишь на больших скоростях, а ее действие внизу диапазона оказывается недостаточным.

Статическая ошибка САР при наличии жесткой положительной обратной связи по току (ж. п. о. с. т.) в соответствии с блок-схемой рис. 1, в имеет вид:

$$\Delta_{3В}^{0/0} = \frac{I_{яв} (R_{я} + R_{\phi} - K_{от} R_{т})}{\alpha U_{п} K_{му}} 100, \quad (3)$$

где  $K_{от} = 0,82 \frac{W_1}{W_2}$  — коэффициент обратной связи по току,

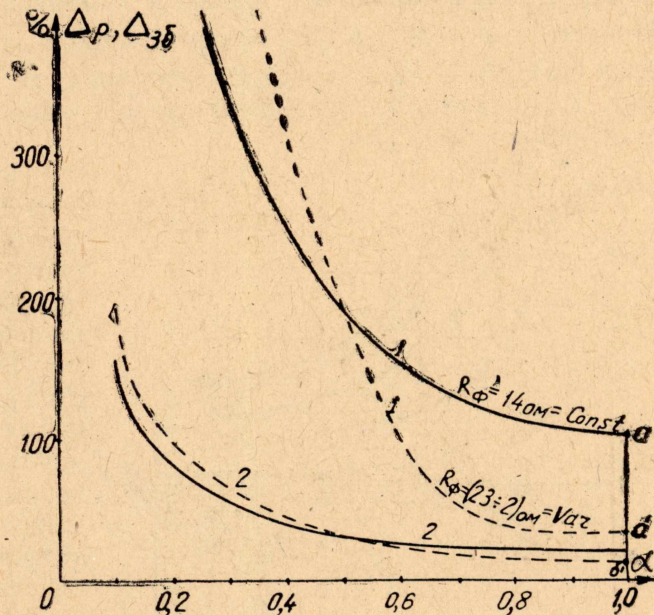


Рис. 2. Зависимость  $\Delta_{р}^{0/0} = f(\alpha)$  и  $\Delta_{36}^{0/0} = f(\alpha)$ :

1 — для разомкнутой САР,  
2 — для САР с обратной связью по напряжению.



$R_T$  — сопротивление выделения сигнала обратной связи по току.

Из анализа (3) следует, что здесь  $\Delta_{3B}^{0/0}$  может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Причем, при  $R_\phi = \text{const}$  знак  $\Delta_{3B}^{0/0}$  определяется величиной  $K_{от} R_T$  и не зависит от уставки скорости  $\alpha$ . Действительно, при  $K_{от} R_T > R_\phi$ ,  $\Delta_{3B}^{0/0}$  имеет положительное значение при всех значениях  $\alpha$  и наоборот, при  $K_{от} R_T < R_\phi$ ,  $\Delta_{3B}^{0/0}$  принимает отрицательное значение. Уменьшение  $\Delta_{3B}^{0/0}$  по диапазону происходит обратно пропорционально  $\alpha$ , поэтому существенное снижение  $\Delta_{3B}^{0/0}$  наблюдается на больших скоростях ( $\alpha \approx 1$ ).

В реальном приводе при  $\alpha \rightarrow 1$ ,  $R_\phi(\alpha)$  резко уменьшается. Это приводит к возрастанию  $\Delta_{3B}^{0/0}$  внизу и уменьшению ее вверху диапазона. Причем, так как  $K_{от} R_T = \text{const}$ ,  $\alpha U_n K_{му} \neq \infty$  и  $I_{ян} \neq 0$ ,  $\Delta_{3B}^{0/0}$  меняет знак при  $R_\phi + R_\phi(\alpha) = K_{от} R_T$ , что следует из семейства кривых  $\Delta_{3B}^{0/0}$ , рис. 3 (пунктиром), рассчитанных согласно уравнению (3) для различных значений  $K_{от}$ .

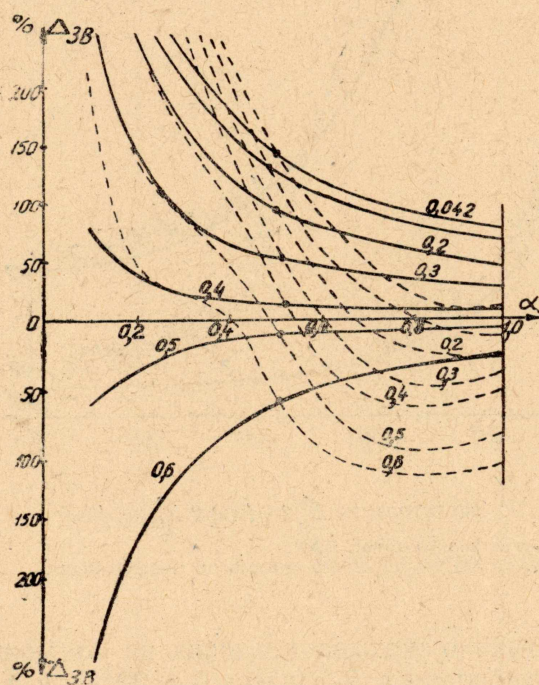


Рис. 3. Зависимость  $\Delta_{3B}^{0/0} = f(\alpha)$  для различных значений  $K_{от}$ : сплошные — для  $R_\phi = R_\phi \text{ ср}$ , штриховые — для  $R_\phi = f(\alpha)$ .

Из них также следует, что в системах МУС-Д ввиду нелинейности  $R_\phi(\alpha)$  введение ж.п.о.с.т. способствует существенному снижению статической ошибки лишь на верхнем пределе диапазона регулирования скорости (при  $\alpha \approx 1$ ). Причем при соответствующих значениях  $K_{от}$ , действие ж.п.о.с.т. может оказаться избыточным, что приводит к перекомпенсации на больших скоростях, недостаточной эффективности действия внизу диапазона при  $\alpha = 0,1$  и общей неравномерности распределения  $\Delta_{3B}^{0/0}$  по диапазону.

Следовательно, в системах МУС-Д, ж.п.о.с.т. дает положительный эффект внизу диапазона только при условии перекомпенсации на больших скоростях. Из сопоставления характеристик рис. 3 (пунктирных и сплошных) видно, что все они пересекаются в одной зоне ( $\alpha = 0,5 \div 0,6$ ), соответствующей среднему фиктивному сопротивлению, принятому при расчете постоянным и равным 14 ом.

Для устранения перекомпенсации на больших скоростях ( $\alpha = 1$ ) необходимо, чтобы действие ж.п.о.с.т. ослаблялось с ростом уставки скорости. Этого можно достигнуть схемным решением, как показано на рис. 1,б [3], когда ОТ вводится последовательно с потенциометром.

Уравнение статической ошибки в этом случае в соответствии с блок-схемой рис. 1,г имеет вид:



$$\Delta_{3ж}^{0/0} = \frac{\alpha U_{п} + I_{ян} [\frac{R_{ф}}{K_{от}} - K_{от} R_{т} (1-\alpha)]}{\alpha U_{п} K_{му}} 100. \quad (4)$$

Здесь при  $\alpha=0$  выражение (4) аналогично (3) и эффективность действия ж.п.о.с.т. постоянна и не зависит от уставки скорости  $\alpha$ . При  $\alpha=1$ ,  $\Delta_{3ж}^{0/0} = \Delta_{р}^{0/0}$ , что равносильно отсутствию обратной связи.

Знак ошибки по-прежнему определяется величиной  $K_{от}$ , но зависит от  $\alpha$ .

На рис. 4 приведено семейство кривых  $\Delta_{3ж}^{0/0}$ , рассчитанных по уравнению (4) для различных  $K_{от}$  и  $R_{ф} = R_{ф\text{ ср}}$ . Из них следует, что при  $\alpha < 0,5$  они ничем не отличаются от таковых, приведенных на рис. 3. При  $\alpha=1$  они все пересекаются в одной характерной точке «а», соответствующей разомкнутой САР (рис. 2 кривая 1):

$$\Delta_{3ж}^{0/0}(1) = \Delta_{р}^{0/0} = \frac{I_{ян}(R_{я} + R_{ф})}{\alpha U_{п} K_{му}} 100.$$

В реальном приводе ввиду нелинейности  $R_{ф}(\alpha)$  точка «а» сдвигается вниз (точка  $\alpha'$ ), что вызывает уменьшение ошибки при  $\alpha=1$  ввиду малости  $R_{ф}(\alpha)$ .

При  $\alpha < 0,5$ , ввиду большого  $R_{ф}$ , ошибка соответственно возрастает. Это приводит к ухудшению неравномерности распределения  $\Delta_{3ж}^{0/0}$  по диапазону.

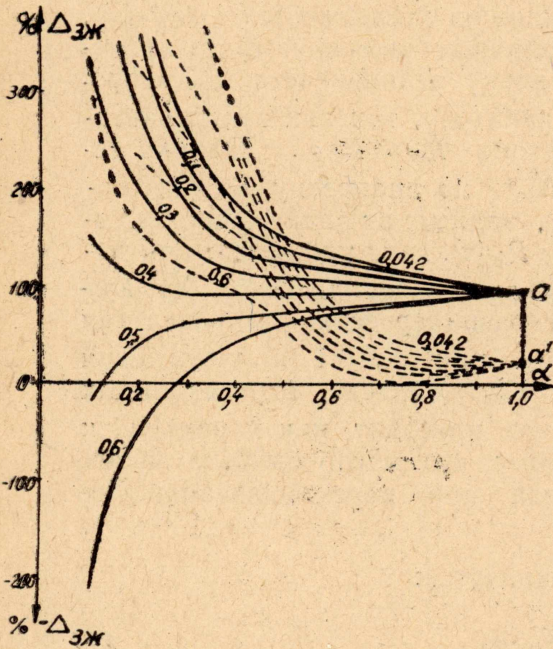


Рис. 4. Зависимость  $\Delta_{3ж}^{0/0} = f(\alpha)$  для различных значений  $K_{от}$ : сплошные — для  $R_{ф} = R_{ф\text{ ср}}$ , штриховые — для  $R_{ф} = f(\alpha)$ .

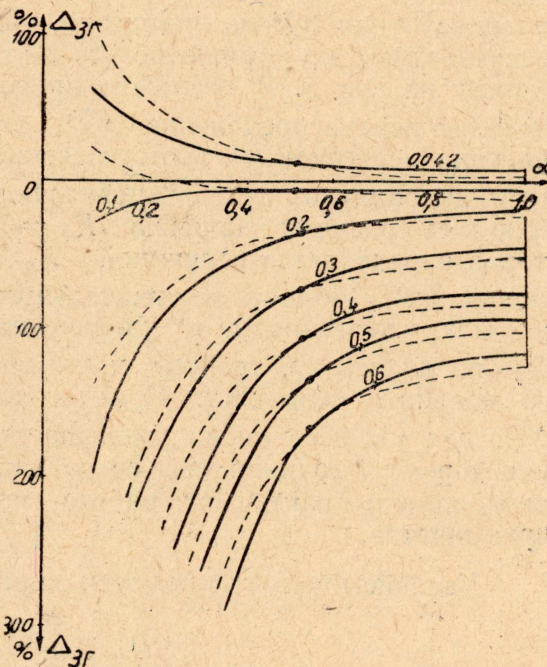


Рис. 5. Зависимость  $\Delta_{3г}^{0/0} = f(\alpha)$  для различных значений  $K_{от}$ : сплошные — для  $R_{ф} = R_{ф\text{ ср}}$ , штриховыми — для  $R_{ф} = f(\alpha)$ .

Знак  $\Delta_{3ж}^{0/0}$  определяется из условия:

$$R_{я} + R_{ф}(\alpha) \geq K_{от} R_{т} (1-\alpha) \quad (5)$$

и зависит от интенсивности изменения членов  $R_{ф}(\alpha)$  и  $K_{от} R_{т} (1-\alpha)$  неравенства (5) по диапазону. Причем, так как в реальном приводе при  $\alpha \rightarrow 1$ ,  $K_{от} R_{т} (1-\alpha)$  уменьшается, обычно, быстрее, чем  $R_{я} + R_{ф}(\alpha)$ , то



всегда соблюдается условие  $\Delta_{3\text{ж}}^{0/0} > 0$ . Из кривых рис. 4 также видно, что введение одной ж. п. о. с. т. с ослаблением при возрастании  $\alpha$  ввиду  $R_{\text{ф}} \gg R_{\text{я}}$  может обеспечить необходимое значение  $\Delta_{3\text{ж}}^{0/0}$  только вверху диапазона и оказывается обычно недостаточной при  $\alpha = 0,1$ . Поэтому применение в приводах МУС-Д одной ж. п. о. с. т. с ослаблением при изменении скорости не целесообразно.

Положительный эффект дает применение единичной ж.о.о.с.н. в сочетании с ж.п.о.с.т. В этом случае выражение статической ошибки в соответствии со схемой рис. 1,а [3] и блок-схемой рис. 1,з будет:

$$\Delta_{3\text{г}}^{0/0} = \frac{I_{\text{ян}} \left( R_{\text{я}} + \frac{R_{\text{ф}}}{1 + K_{\text{му}}} - \frac{K_{\text{от}} R_{\text{т}} K_{\text{му}}}{1 + K_{\text{му}}} \right)}{\alpha U_{\text{п}} K_{\text{му}}} 100. \quad (6)$$

Из (6) следует, что в замкнутой САР при наличии ж.о.о.с.н. и ж.п.о.с.т. знак ошибки определяется алгебраической суммой членов входящих в числитель и зависит от их величины. Причем, так как  $K_{\text{му}} \gg 1$ , то единицей в знаменателе можно пренебречь. Тогда при  $R_{\text{ф}} = \text{const}$  знак ошибки определяется также величиной  $K_{\text{от}} R_{\text{т}}$  и не зависит от установки скорости  $\alpha$ . Однако наличие ж.о.о.с.н. уменьшает член содержащий  $R_{\text{ф}}$  в  $K_{\text{му}}$  раз, поэтому снижение ошибки до допустимого значения достигается теперь при меньших значениях  $K_{\text{от}}$  по сравнению с предыдущим вариантом. Это снижает неравномерность распределения  $\Delta_{3\text{г}}^{0/0}$  по диапазону, что видно из зависимостей  $\Delta_{3\text{г}}^{0/0}(\alpha)$ , рассчитанных по уравнению (6) для различных значений  $K_{\text{от}}$  и приведенных на рис. 5. В реальном приводе ввиду нелинейности  $R_{\text{ф}}(\alpha)$  происходит перераспределение  $\Delta_{3\text{г}}^{0/0}$  по диапазону, так как эти характеристики пересекаются соответственно в зоне  $R_{\text{ф}} = R_{\text{ф ср}}$ . Однако теперь направление перераспределения  $\Delta_{3\text{г}}^{0/0}$  по диапазону, по отношению к ее среднему значению ( $R_{\text{ф}} = 14_{\text{ом}}$ ), зависит от знака ошибки, которая определяется величиной  $K_{\text{от}}$  и  $R_{\text{ф}}(\alpha)$ . Так, например, при небольших  $K_{\text{от}}$  (область положительных  $\Delta_{3\text{г}}^{0/0}$ ) для значений  $\alpha > 0,5$ ,  $\Delta_{3\text{г}}^{0/0}$  возрастает, что приводит к увеличению неравномерности распределения  $\Delta_{3\text{г}}^{0/0}$  по диапазону, требует уменьшения ее при  $\alpha = 0,1$  и увеличения на больших скоростях. При больших  $K_{\text{от}}$  (область отрицательных  $\Delta_{3\text{г}}^{0/0}$ ) для  $\alpha < 0,5$  ошибка уменьшается, что приводит, как и раньше, к некоторому выравниванию ее по диапазону, что могло бы быть полезным, однако практически работа привода при перекompенсации не применяется.

Условием положительности ошибки является:

$$R_{\text{я}} + \frac{R_{\text{ф}}}{K_{\text{му}}} > K_{\text{от}} R_{\text{т}}. \quad (7)$$

Сравнивая (5) и (7) видим, что при прочих равных условиях перекompенсация получается теперь при меньших значениях  $K_{\text{от}} R_{\text{т}}$ , так как  $\frac{R_{\text{ф}}}{K_{\text{му}}} < R_{\text{ф}}$ .

Из кривых рис. 6 также следует, что при небольших значениях  $K_{\text{от}}$  ( $K_{\text{от}} \approx 0,5$ ) можно получить достаточно равномерное распределение ошибки и, следовательно, жесткие механические характеристики в большом диапазоне (5 ÷ 8). При этом  $\Delta_{3\text{г}}^{0/0}$  не выходит за пределы допустимой ( $\Delta = \pm 10$ ). Для получения более широкого диапазона необходимо увеличивать  $K_{\text{от}}$ . Однако при больших  $K_{\text{от}}$  (0,1 и выше) наблю-



дается перекомпенсация вверху диапазона, что приводит к возрастающему характеру механических характеристик ( $-\Delta_{3\Gamma}^{0/0}$ ).

Более равномерное распределение ошибки по диапазону может быть получено для блок-схемы рис. 1, д, составленной в соответствии со схемой рис. 1, б [3] и уравнением (8), когда ж.п.о.с.т. с ростом уставки скорости ослабляется за счет множителя  $(1-\alpha)$ , а действие ж.о.о.с.н. остается постоянным. В этом случае статическая ошибка при принятых допущениях может быть представлена в виде:

$$\Delta_{3\Gamma}^{0/0} = \frac{I_{\text{ян}} \left[ R_{\text{я}} + \frac{R_{\text{ф}}}{1 + K_{\text{му}}} - \frac{K_{\text{от}} R_{\text{т}} K_{\text{му}}}{1 + K_{\text{му}}} (1 - \alpha) \right]}{\alpha U_{\text{п}} K_{\text{му}}} 100. \quad (8)$$

Здесь при  $\alpha=1$  выражение (8) ничем не отличается от (2), что равносильно отсутствию ж.п.о.с.т., а при  $\alpha=0$  приобретает вид уравнения (6), со всеми вытекающими из него особенностями.

Поэтому структура такой САР, в смысле изменения ее параметров, является переменной по диапазону и занимает промежуточное значение между вариантами рис. 1 а и б [3]. Знак ошибки при фиксированном значении  $R_{\text{ф}}$  по-прежнему определяется величиной  $K_{\text{от}}$  и зависит, кроме того, от  $\alpha$ .

На рис. 6 приведено семейство кривых  $\Delta_{3\Gamma}^{0/0}(\alpha)$ , рассчитанных согласно уравнению (8) для различных значений  $K_{\text{от}}$  и  $R_{\text{ф}} = \text{const}$ . При малых значениях  $\alpha$  они ничем не отличаются от таковых, приведенных на рис. 5 и знак ошибки определяется величиной  $K_{\text{от}}$ . Однако при  $\alpha=1$ , они пересекаются все в одной характерной точке «б», независимо от величины  $K_{\text{от}}$ , соответствующей:

$$\begin{aligned} \Delta_{3\Gamma}^{0/0}(1) &= \Delta_{3\Gamma}^{0/0} = \\ &= \frac{I_{\text{ян}} \left( R_{\text{я}} + \frac{R_{\text{ф}}}{1 + K_{\text{му}}} \right)}{\alpha U_{\text{п}} K_{\text{му}}} 100, \end{aligned}$$

что имело место при отсутствии ж. п. о. с. т. рис. 2 (кривая 2).

В реальном приводе ввиду нелинейности  $R_{\text{ф}}(\alpha)$  точка «б» смещается вниз (точка б'), то есть  $\Delta_{3\Gamma}^{0/0}$  уменьшается, а при  $\alpha < 0,5$  ввиду большего  $R_{\text{ф}} \gg R_{\text{я}}$  возрастает. По-прежнему характеристики пересекаются, соответственно, в зоне  $R_{\text{ф}} = R_{\text{ф ср}} = 14 \text{ ом}$ , что вызывает увеличение неравномерности распределения  $\Delta_{3\Gamma}^{0/0}$  по диапазону ввиду нелинейности  $R_{\text{ф}}(\alpha)$ . Однако в этом случае введение ж. о. о. с. н. приводит к уменьшению  $R_{\text{ф}}$  в  $(1 + K_{\text{му}})$  раз, что обеспечивает при соответствующем выборе  $K_{\text{от}}$  вполне допустимую ошибку при  $\alpha=1$ , а ж. п. о. с. т. ввиду эффективности действия при  $\alpha=0,1$  компенсирует несколько возрастание  $\Delta_{3\Gamma}^{0/0}$  внизу диапазона (где ввиду малости  $\alpha$  в знаменателе (8) и  $R_{\text{ф}} \gg R_{\text{я}}$ ,

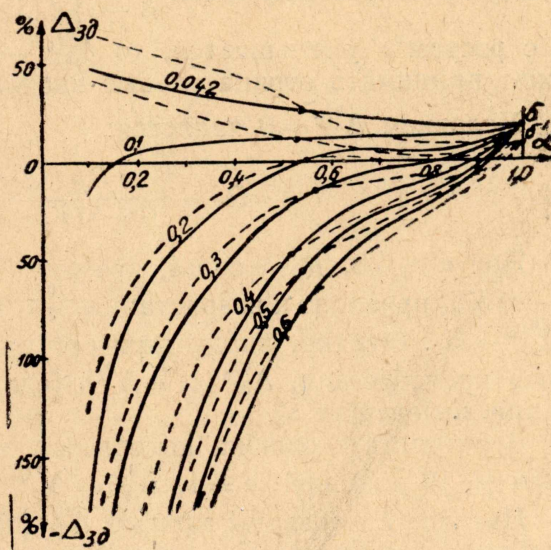


Рис. 6. Зависимость  $\Delta_{3\Gamma}^{0/0} = f(\alpha)$ , для различных значений  $K_{\text{от}}$ : сплошными — для  $R_{\text{ф}} = R_{\text{ф ср}}$ , штриховыми — для  $R_{\text{ф}} = f(\alpha)$ .



$\Delta_{3д}^{0/0}$  имеет большие значения) не оказывая практического воздействия при  $\alpha = 1$ . В результате происходит некоторое выравнивание  $\Delta_{3д}^{0/0}$  в диапазоне 1:10, что является вполне приемлемым для приводов подачи тяжелых станков.

Вполне удовлетворительное распределение ошибки в диапазоне 1:30 дает вариант схемного решения рис. 1, з [3]. Статическая ошибка для этого случая согласно блок-схеме рис. 1, з может быть представлена в виде:

$$\Delta_{33}^{0/0} = \frac{I_{ян} \left[ R_я + \frac{R_ф}{1 + (1-\alpha) K_{му}} - \frac{K_{от} R_т (1-\alpha) K_{му}}{1 + (1-\alpha) K_{му}} \right]}{\alpha U_{п} K_{му}} 100. \quad (9)$$

Пренебрегая единицей в знаменателе ввиду  $K_{му} \gg 1$  получим:

$$\Delta_{33}^{0/0} = \frac{I_{ян} \left[ R_я + \frac{R_ф}{(1-\alpha) K_{му}} - K_{от} R_т \right]}{\alpha U_{п} K_{му}} 100.$$

Здесь при  $\alpha \rightarrow 1$  ввиду  $R_ф \gg R_я$  слагаемое  $\frac{R_ф}{(1-\alpha) K_{му}}$  принимает большое численное значение, которое, однако, при выборе  $K_{от}$  из условий нижнего предела диапазона, может быть скомпенсировано до желаемого величиной  $K_{от} R_т$ .

В связи с тем, что при принятых допущениях вычитаемое  $K_{от} R_т = \text{const}$ , а слагаемое  $\frac{R_ф}{(1-\alpha) K_{му}}$  при  $\alpha \rightarrow 0$  ввиду нелинейности  $R_ф$  с ростом  $\alpha$  уменьшается, то  $\Delta_{33}^{0/0} \rightarrow 0$  и при соответствующем  $K_{от}$  может принимать отрицательные значения.

Условием  $\Delta_{33}^{0/0} = 0$  является:

$$R_я + \frac{R_ф}{(1-\alpha) K_{му}} = K_{от} R_т.$$

При  $\alpha > 0,8$ ,  $R_ф \approx \text{const}$ , поэтому дальнейшее уменьшение члена  $(1-\alpha) K_{му}$  приводит к возрастанию  $\Delta_{33}^{0/0}$ . Наконец, при  $\alpha = 1$ ,  $(1-\alpha) K_{му} \rightarrow 0$ , а  $\Delta_{33}^{0/0} \rightarrow \infty$ . Однако, ввиду наличия единицы в знаменателе, которой ранее пренебрегали,  $\Delta_{33}^{0/0}(1) = \Delta_p^{0/0}$ , (единицей можно пренебрегать только при небольших  $\alpha$ ).

В результате ошибка колеблется по диапазону в допустимых пределах  $\pm 10\%$ , а при  $\alpha = 1$ ,  $\Delta_{33}^{0/0} = \Delta_p^{0/0}$ .

На рис. 7 показаны кривые  $\Delta_{33}^{0/0}(\alpha)$ , построенные согласно (9) для различных значений  $K_{от}$ : сплошная для  $R_ф = \text{const}$ , пунктиром для  $R_ф(\alpha) = \text{Var}$ . Все кривые пересекаются в точках «а» и «а'» при  $\alpha = 1$ , соответствующих разомкнутой САР.

$$\Delta_{33}^{0/0}(1) = \Delta_p^{0/0} = \frac{I_{ян} (R_я + R_ф)}{\alpha U_{п} K_{му}} 100.$$

Пунктирные и сплошные характеристики пересекаются по-прежнему, соответственно, в зоне  $R_ф = R_{ф\text{ ср}} = 14 \text{ ом}$ . При небольших значениях  $K_{от}$  (0,05 ÷ 0,1) — положительна. При  $K_{от} > 0,1$ ,  $\Delta_{33}^{0/0}$  в основном диапазоне отрицательна и положительное значение приобретает только на больших скоростях. Соответствующим подбором  $K_{от}$  можно подобрать вполне допустимое значение  $\Delta_{33}^{0/0}$  по диапазону.



Статическая ошибка для варианта схемного решения рис. 1, в [3] в соответствии с блок-схемой рис. 1, е имеет вид:

$$\Delta_{3e}^{0/0} = \frac{I_{ян} \left[ R_{я} + \frac{R_{\phi}}{1 + (1-\alpha) K_{му}} - \frac{K_{от} R_{т} K_{му}}{1 + (1-\alpha) K_{му}} \right]}{\alpha U_{п} K_{му}} 100. \quad (10)$$

Пренебрегая единицей ввиду  $K_{му} \gg 1$  получим:

$$\Delta_{3e}^{0/0} = \frac{I_{ян} \left[ R_{я} + \frac{R_{\phi} - K_{от} R_{т} K_{му}}{(1-\alpha) K_{му}} \right]}{\alpha U_{п} K_{му}} 100.$$

Здесь при небольших  $\alpha$  ввиду большого  $K_{му} \gg 1$  и соизмеримого с ним внизу диапазона  $K_{му}(1-\alpha)$  знак ошибки определяется величиной  $K_{от}$  и в зависимости от его величины может принимать как положительное, так и отрицательное значения. При  $\alpha \rightarrow 1$ ,  $R_{\phi}(\alpha)$  резко уменьшается, а  $K_{от} R_{т} K_{му} = \text{const}$ , поэтому  $\Delta_{3e}^{0/0}$  принимает положительное значение, которое ввиду одновременного уменьшения  $K_{му}(1-\alpha) \rightarrow 0$  может достигать большой величины. Поэтому такое решение практического применения не нашло.

Распределение  $\Delta$  по диапазону в варианте рис. 1, г [3] может быть улучшено при комбинированном введении ж. о. с. т., как показано на рис. 1, г (пунктиром) [3]. Статическая ошибка в этом случае в соответствии с блок-схемой рис. 1, з [3] будет:

$$\Delta_{3зк}^{0/0} = \frac{I_{ян} \left\{ R_{я} + \frac{R_{\phi}}{1 + (1-\alpha) K_{му}} - \frac{K_{от} [R_{т}'' + R_{т}'(1-\alpha)] K_{му}}{1 + (1-\alpha) K_{му}} \right\}}{\alpha U_{п} K_{му}} 100. \quad (11)$$

Пренебрегая по-прежнему единицей (внизу диапазона) получим:

$$\Delta_{3зк}^{0/0} = \frac{I_{ян} \left[ R_{я} + \frac{R_{\phi} - K_{от} R_{т}'(1-\alpha) K_{му}}{(1-\alpha) K_{му}} - K_{от} R_{т}'' \right]}{\alpha U_{п} K_{му}} 100. \quad (12)$$

Из (12) следует, что в этом случае имеет место постоянно действующая составляющая  $K_{от} R_{т}''$ , не зависящая от  $\alpha$ . Это приводит к сдвигу кривых в область отрицательных  $\Delta_{3з}^{0/0}$  пропорционально значению величины  $R_{т}''$ .

На рис. 8 приведены кривые  $\Delta_{3}^{0/0}$ , построенные по уравнениям (8 и 9) для  $K_{от} = 0,115$  вариантов схем рис. 1, б и г [3]. Здесь же показаны (пунктиром) для комбинированного варианта для значений  $R_{т}'' = 1, 2, 3$  ом. Из сравнения кривых следует, что вариант комбинированного введения ж. п. о. с. т. способствует выравниванию  $\Delta_{3}^{0/0}$  при  $\alpha = 1$  по диапазону в схеме рис. 1, г [3] (кривая 2) и ухудшает в варианте рис. 1, б [3] (кривая 1). При остальных значениях  $\alpha$  схемы примерно эквивалентны.

На рис. 9 (пунктиром) показаны кривые  $\Delta_{3}^{0/0}(\alpha)$  для всех рассмотренных случаев введения обратных связей, рассчитанных для  $K_{от} = 0,1$  и прочих равных условий. Из них следует, что наиболее благоприятное распределение ошибки по диапазону наблюдается в схеме рис. 1 б и рис. 1 г [3]. Здесь же для сравнения (сплошными линиями) нанесены кривые  $\Delta_{3}^{0/0}(\alpha)$  для вариантов рис. 1, г [3] (кривая 9) и рис. 1, б [3] (кривая 7), рассчитанных при  $K_{от} = 0,115$  и  $0,125$ . Из сопоставления кривых



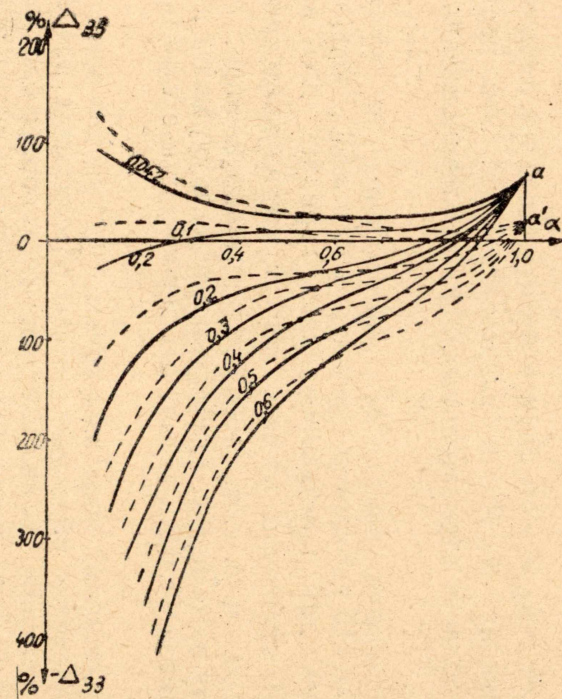


Рис. 7. Зависимости  $\Delta_{33}^{0/0} = f(\alpha)$ , для различных значений  $K_{от}$ : сплошные — для  $R_{\phi} = R_{\phi \text{ ср}}$ , штриховыми — для  $R_{\phi} = f(\alpha)$ .

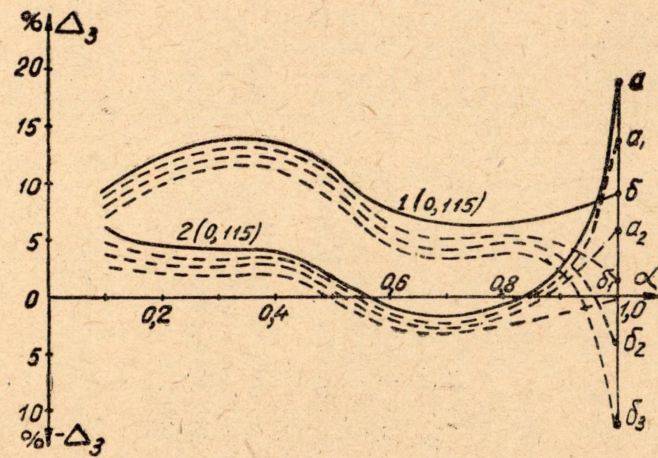


Рис. 8. Зависимость  $\Delta_3^{0/0} = f(\alpha)$ , для различных значений  $K_{от}$ : сплошные — для  $R_{\tau} = 0$ , штриховыми — для  $R_{\tau} = 1; 2; 3 \text{ Ом}$ .



видно, что вариант (7) при обеспечивании более равномерного распределения ошибки по скоростям ( $\Delta_{3д}^{0/0}$  имеет положительное значение в заданных пределах) неизбежно сопровождается перекомпенсацией на низких

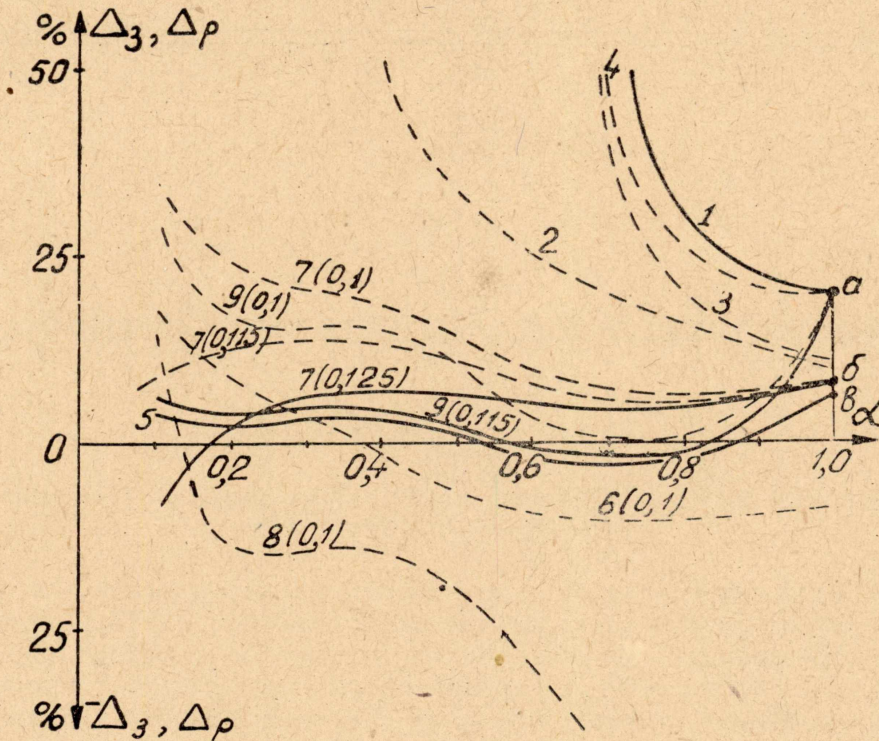


Рис. 9. Зависимости  $\Delta_{3д}^{0/0} = f(\alpha)$ , для различных схемных решений.

скоростях ( $\alpha \approx 0,1$ ). Вариант (9) освобожден от этого недостатка, однако в середине диапазона ( $\alpha = 0,5 \div 0,8$ ) в варианте (9)  $\Delta_{33}^{0/0}$  меняет знак, а при  $\alpha = 1$ ,  $\Delta_{33}^{0/0} = \Delta_p^{0/0}$ , что нельзя отнести к недостаткам, но в чем нет необходимости.

Здесь же для сравнения кривой (5) представлена зависимость  $\Delta_{33к}^{0/0}$  для варианта рис. 1, с [3] скомбинированным введением ж. п. о. с. т. для  $K_{от} = 0,115$ ,  $R_T = 32$  ом и  $R_T^* = 3$  ом. Из нее видно, что  $\Delta_{33к}^{0/0}$  не выходит за пределы  $\pm 7\%$  с незначительной перекомпенсацией при  $0,8 > \alpha > 0,5$ .

Итак, схемным решением и соответствующим подбором параметров в вариантах (7), (9) и (комбинированном) можно добиться вполне удовлетворительного распределения ошибки по диапазону. Причем, по нашему мнению, предпочтение следует отдать варианту (9) с комбинированным введением ж. п. о. с. т.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Севастьянов, А. П. Инешин. Системы электропривода с магнитно-полупроводниковыми преобразователями (МУС-Д с ППУ), Приволжское книжное из-во, 1966 г.
2. М. Е. Верхолат, Ю. Я. Морговский. Усовершенствованный электропривод подачи металлорежущих станков с диапазоном изменения скорости Д-2000, Ленинград, ЛДНТИ, 1964.
3. В. А. Севастьянов, А. П. Инешин, А. П. Рыбакова. К вопросу улучшения стабилизации электропривода МУС-Д, Известия ТПИ, том. 161, 1966.