

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:

$$\Delta_p^{\circ/\circ} = \frac{I_{ян}(R_{я} + R_{\phi})}{\alpha U_{п} K_{му}} 100, \quad (1)$$

где $U_{п}$ — напряжение питания обмоток управления МУС;

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

α — установка скорости;

$R_{я}$, R_{ϕ} — соответственно, сопротивления якоря двигателя и фиктивное сопротивление МУС;

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

Здесь в общем случае R_{ϕ} и $K_{му}$ являются сложными функциями α , а R_{ϕ} зависит, кроме того, от тока нагрузки $I_{я}$.

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

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

где

$$A = \frac{I_{ян}(R_{я} + R_{\phi})}{U_{п} K_{му}} 100 = \text{const}.$$

Видим, что $\Delta_p^{\circ/\circ}(\alpha)$ изменяется примерно по гиперболическому закону. На рис. 2 построена зависимость $\Delta_p^{\circ/\circ}(\alpha)$ для ПМУ9М. Из анализа этой кривой следует, что в разомкнутой САР, с учетом принятых допущений, $\Delta_p^{\circ/\circ}(\alpha)$ 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 $\alpha = 0,1$, $\Delta_p^{0/0} = 400\%$.

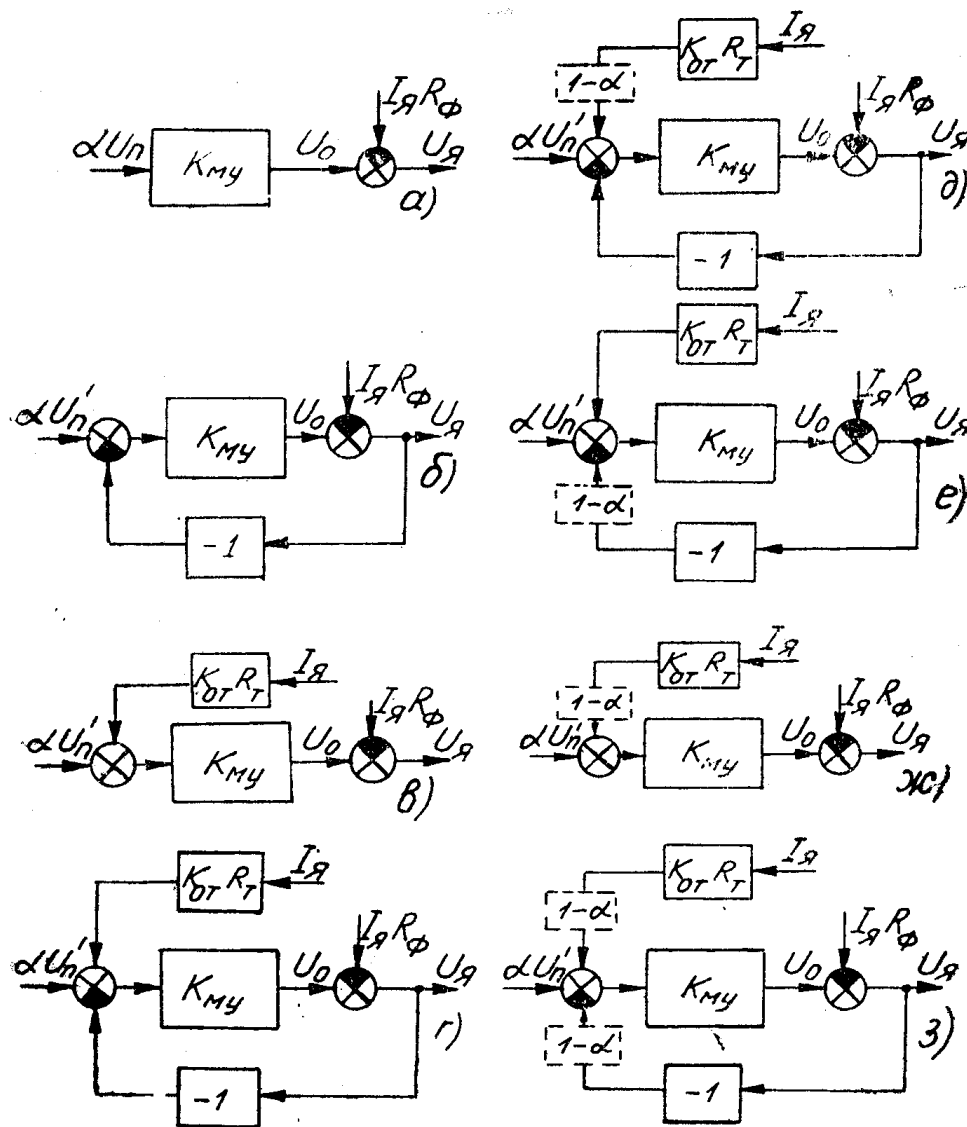


Рис. 1. Блок-схемы.

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 $U_\text{я}$ 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:

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

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_{ϕ} в $(1 + K_{му})$ раз, а следовательно и $\Delta_{36}^{o/o}$. Так как все величины входящие в (2) могут иметь только

положительные значения, то при всех значениях α соблюдается условие

$\Delta_{36}^{o/o} > 0$. Принимая те же

допущения, на рис. 2 по-

казана зависимость $\Delta_{36}^{o/o}(\alpha)$

(кривая 2), рассчитанная

согласно уравнению (2)

для тех же прочих рав-

ных условий. Из них сле-

дует, что при введении

ж. о. о. с. н. в закон ре-

гулирования $\Delta_{36}^{o/o}$ также

изменяется в функции α

по убывающему примерно

гиперболическому закону,

однако при одном и том

же α , $\Delta_{36}^{o/o}$ имеет меньшее

значение, чем в разомкну-

той САР. Здесь же для

сравнения (пунктиром)

приведена эта зависимость

с учетом изменения $R_{\phi}(\alpha)$

по диапазону. Из нее

следует, что снижение $\Delta_{36}^{o/o}$

существенно сказывается

лишь на больших

скоростях при $\alpha = 1$, то

есть при небольших R_{ϕ}

(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 $\Delta_{36}^{o/o}$

остается недо-

пустимо большой. Следова-

тельно, в системах МУС-Д

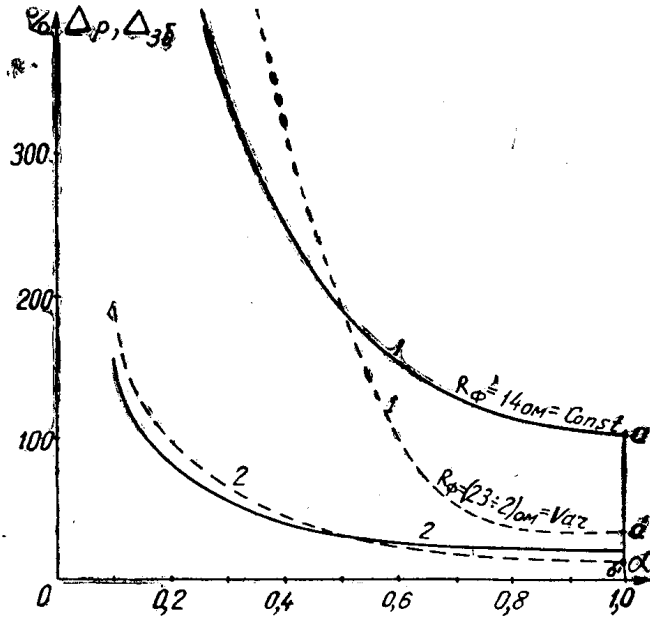


Рис. 2. Зависимость $\Delta_p^{o/o} = f(\alpha)$ и $\Delta_{36}^{o/o} = f(\alpha)$:

1 — для разомкнутой САР.

2 — для САР с обратной связью по напряжению.

следует, что снижение $\Delta_{36}^{o/o}$ существенно сказывается лишь на больших скоростях при $\alpha = 1$, то есть при небольших R_{ϕ} (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 $\Delta_{36}^{o/o}$ 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:

$$\Delta_{36}^{o/o} = \frac{I_{яв} (R_{я} + R_{\phi} - K_{от} R_{т})}{\alpha U_{п} K_{му}} 100, \quad (3)$$

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

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 α . Действительно, при $K_{от} R_T > R_\Phi$, $\Delta_{3B}^{0/0}$ имеет положительное значение при всех значениях α 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 α , 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 ееверху 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 $K_{от}$.

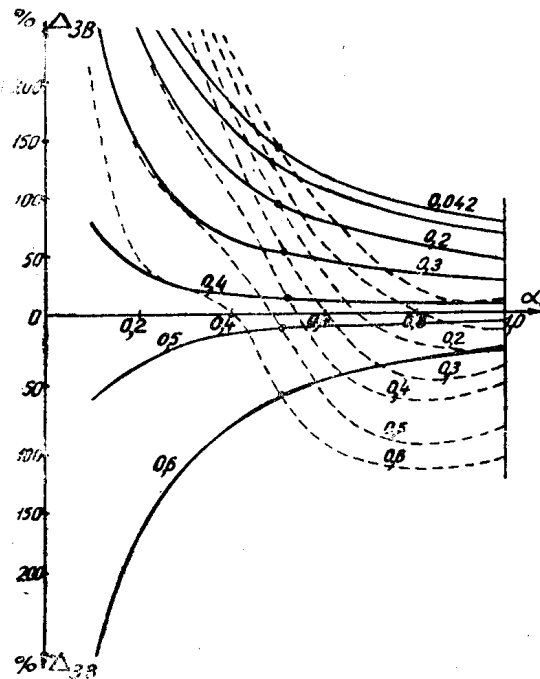


Рис. 3. Зависимость $\Delta_{3B}^{0/0} = f(\alpha)$ для различных значений $K_{от}$: сплошные — для $R_\Phi = R_{\Phi \text{ ср}}$, штриховые — для $R_\Phi = f(\alpha)$.

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 ($\alpha = 0,5 \div 0,6$), соот-

ветствующей 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:

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

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

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

На рис. 4 приведено семейство кривых $\Delta_{3ж}^{0/0}$, рассчитанных по уравнению (4) для различных $K_{от}$ и $R_{\phi} = R_{\phi \text{ ср}}$. 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):

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

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

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

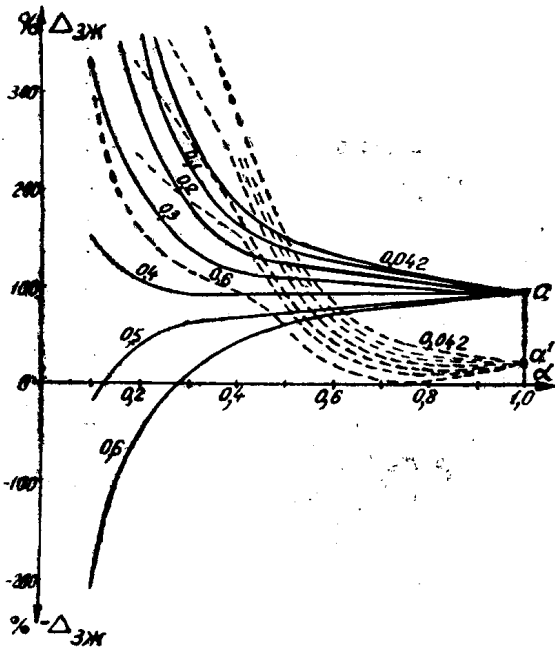


Рис. 4. Зависимость $\Delta_{3ж}^{0/0} = f(\alpha)$ для различных значений $K_{от}$: сплошные — для $R_{\phi} = R_{\phi \text{ ср}}$, штриховые — для $R_{\phi} = f(\alpha)$.

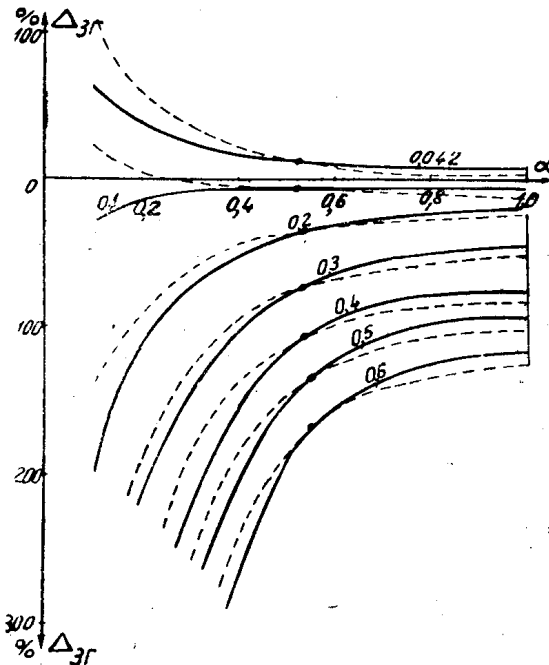


Рис. 5. Зависимость $\Delta_{3г}^{0/0} = f(\alpha)$ для различных значений $K_{от}$: сплошные — для $R_{\phi} = R_{\phi \text{ ср}}$, штриховыми — для $R_{\phi} = f(\alpha)$.

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

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

и зависит от интенсивности изменения членов $R_{\phi}(\alpha)$ 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 $R_{я} + R_{\phi}(\alpha)$, 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 α 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 α . 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 небольшом диапазоне ($5 \div 8$). 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 ($-\Delta_{3r}^{0/0}$).

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:

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

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_{ϕ} по-прежнему определяется величиной $K_{от}$ и зависит, кроме того, от α .

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

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

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

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

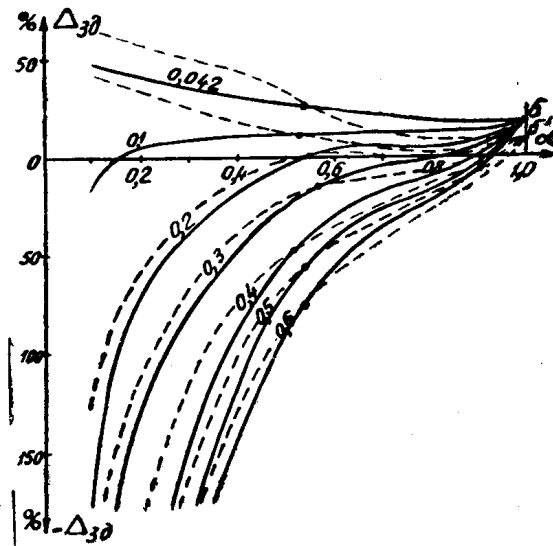


Рис. 6. Зависимость $\Delta_{3d}^{0/0} = f(\alpha)$, для различных значений $K_{от}$: сплошные — для $R_{\phi} = R_{\phi \text{ ср}}$, штриховыми — для $R_{\phi} = f(\alpha)$.

$\Delta_{3д}^{0/0}$ 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:

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

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

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

Здесь при $\alpha \rightarrow 1$ ввиду $R_{\phi} \gg R_{я}$ слагаемое $\frac{R_{\phi}}{(1-\alpha) K_{му}}$ 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 $\frac{R_{\phi}}{(1-\alpha) K_{му}}$ при $\alpha \rightarrow 0$ ввиду нелинейности R_{ϕ} с ростом α уменьшается, то $\Delta_{33}^{0/0} \rightarrow 0$ и при соответствующем $K_{от}$ может принимать отрицательные значения.

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

$$R_{я} + \frac{R_{\phi}}{(1-\alpha) K_{му}} = K_{от} R_{т}.$$

При $\alpha > 0,8$, $R_{\phi} \approx \text{const}$, 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 α).

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 $R_{\phi} = \text{const}$, пунктиром для $R_{\phi}(\alpha) = \text{Var}$. Все кривые пересекаются в точках «а» и «а'» при $\alpha = 1$, соответствующих разомкнутой САР.

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

Пунктирные и сплошные характеристики пересекаются по-прежнему, соответственно, в зоне $R_{\phi} = R_{\phi \text{ ср}} = 14 \text{ ом}$. 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:

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

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

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

Здесь при небольших α 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 $\Delta_{3e}^{0/o}$ 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 Δ по диапазону в варианте рис. 1, з [3] может быть улучшено при комбинированном введении ж. о. с. т., как показано на рис. 1, з (пунктиром) [3]. Статическая ошибка в этом случае в соответствии с блок-схемой рис. 1, з [3] будет:

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

Пренебрегая по-прежнему единицей (внизу диапазона) получим:

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

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

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

На рис. 9 (пунктиром) показаны кривые $\Delta_{3}^{0/o}(\alpha)$ 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 з [3]. Здесь же для сравнения (сплошными линиями) нанесены кривые $\Delta_{3}^{0/o}(\alpha)$ для вариантов рис. 1, з [3] (кривая 9) и рис. 1, б [3] (кривая 7), рассчитанных при $K_{от} = 0,115$ и $0,125$. Из сопоставления кривых

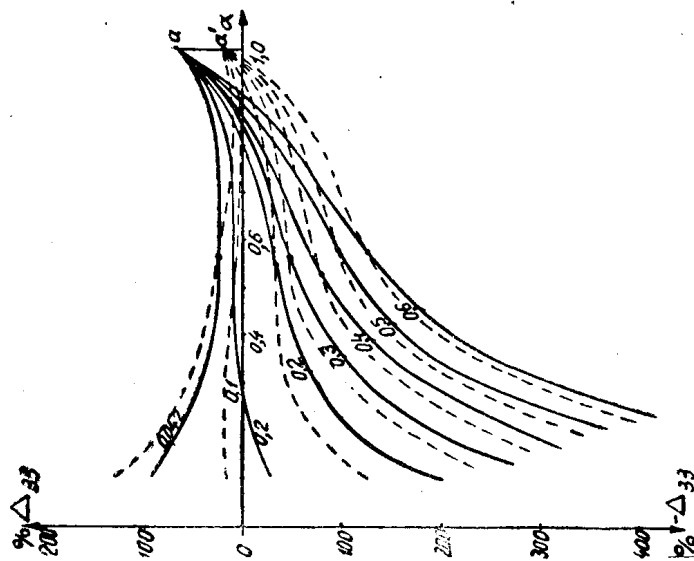


Рис. 7. Зависимости $\Delta_{33}^{0/0} = f(\cdot)$, для различных значений K_{0r} : сплошные — для $R_{\phi} = R_{\phi \text{ ср}}$, штриховыми — для $R_{\phi} = f(\cdot)$.

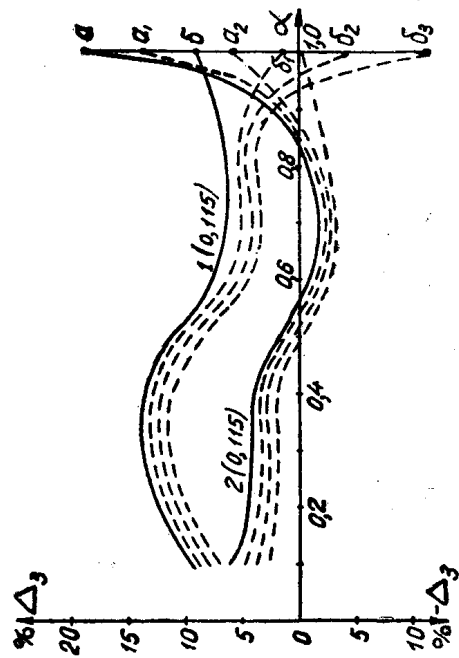


Рис. 8. Зависимости $\Delta_3^{0/0} = f(\cdot)$, для различных значений K_{0r} : сплошные — для $R_r = 0$, штриховыми — для $R_r = 1; 2; 3$ ом.

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

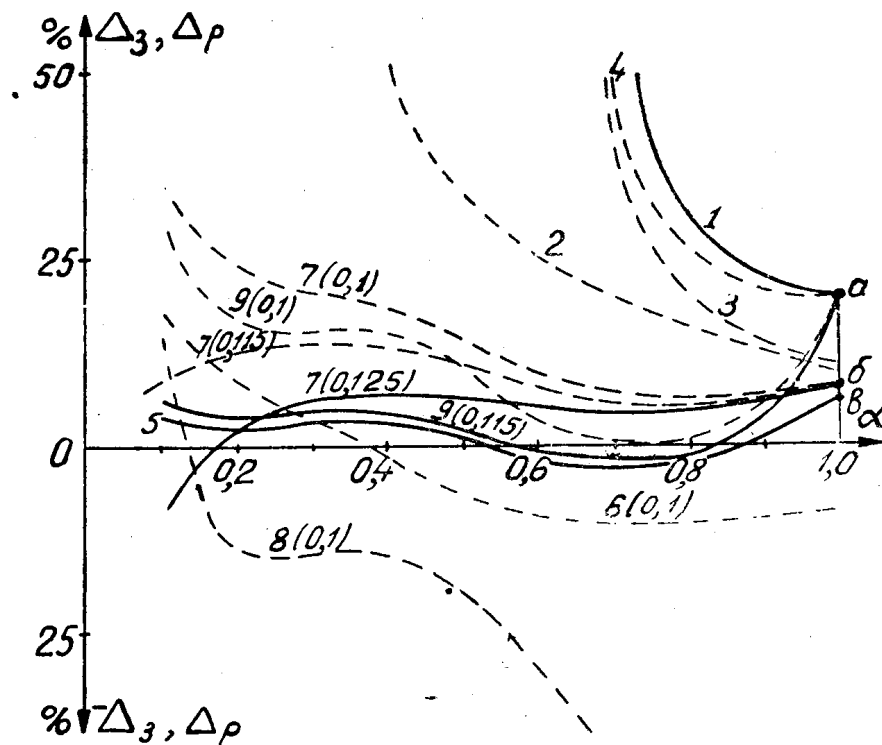


Рис. 9. Зависимости $\Delta_{3д}^{0/0} = f(\alpha)$, для различных схемных решений.

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 $\Delta_{33}^{0/0}$ 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 $\Delta_{33}^{0/0}$ 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.