ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 161 1967

К ВОПРОСУ УЛУЧШЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МУС-Д

В. А. СЕВАСТЬЯНОВ, А. П. ИНЕШИН, А. П. РЫБАКОВА

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

В [1] показано, что динамика МУС-Д зависит от принятых схемных решений при введении обратной положительной связи по току ОТ в контур сравнения САР (рис. 1).

Особенностью этих схемных решений при принятых параметрах является несоблюдение условия соответствующего наиболее благоприятному протеканию переходного процесса, которое применительно к схеме рис. 1, *г* запишется в виде:

$$\frac{T_{\text{му}} + T_{\text{м}} + K_{\text{му}} T_{\text{м}} + (R_{\text{я}} \sigma - K_{\text{от}} R_{\text{т}})(1-\alpha) \frac{K_{\text{му}}}{R_{\text{э}}} T_{\text{м}}}{2\sqrt{K_{\text{му}} \sigma (1-\alpha) + 1}} \approx 0{,}6 \div 0{,}7, \tag{1}$$

то есть коэффициент затухания находится в пределах $0{,}6 \div 0{,}7$.

Здесь: $T_{\text{му}}$, $T_{\text{м}}$ — соответственно, постоянная МУС и электромеханическая постоянная времени электродвигателя;
$K_{\text{му}}$ — коэффициент усиления МУС по напряжению;
$K_{\text{от}}$ — коэффициент усиления обратной связи по току;
$R_{\text{э}}$ — фиктивное сопротивление МУС;
$R_{\text{я}}$, $R_{\text{т}}$ — соответственно сопротивления якоря электродвигателя и выделения сигнала ОТ;
α, σ — коэффициент уставки скорости и единичной обратной связи по напряжению (ОН).

На рис. 2 показаны кривые Д-разбиения по параметру $K_{\text{от}}$, рассчитанные согласно уравнению (2), плученному для схемы рис. 1, *г*

$$K_{\text{от}}(j\omega) = \frac{-\left\{T_{\text{му}} T_{\text{э}} T_{\text{м}} \omega^2 - \left[T_{\text{му}} + T_{\text{м}} + \frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{э}}} K_{\text{му}} \sigma (1-\alpha) T_{\text{м}}\right]\right\}}{(1-\alpha) \frac{R_{\text{т}}}{R_{\text{э}}} K_{\text{му}} T_{\text{м}}} +$$

$$+ j \frac{\left\{T_{\text{му}} T_{\text{м}} + \left[1 + \frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{э}}} K_{\text{му}} \sigma (1-\alpha)\right] T_{\text{э}} T_{\text{м}}\right\} \omega^2 - \left[K_{\text{му}} \sigma (1-\alpha) + 1\right]}{(1-\alpha) \frac{R_{\text{т}}}{R_{\text{э}}} K_{\text{му}} T_{\text{и}}}. \tag{2}$$

Уравнение Д-разбиения для варианта «*а*» отличается от сутствием множителя $(1-\alpha)$. Для варианта «*б*» этот множитель сохраняется перед $\frac{R_{т}}{R_{э}} K_{му} T_{м}$.

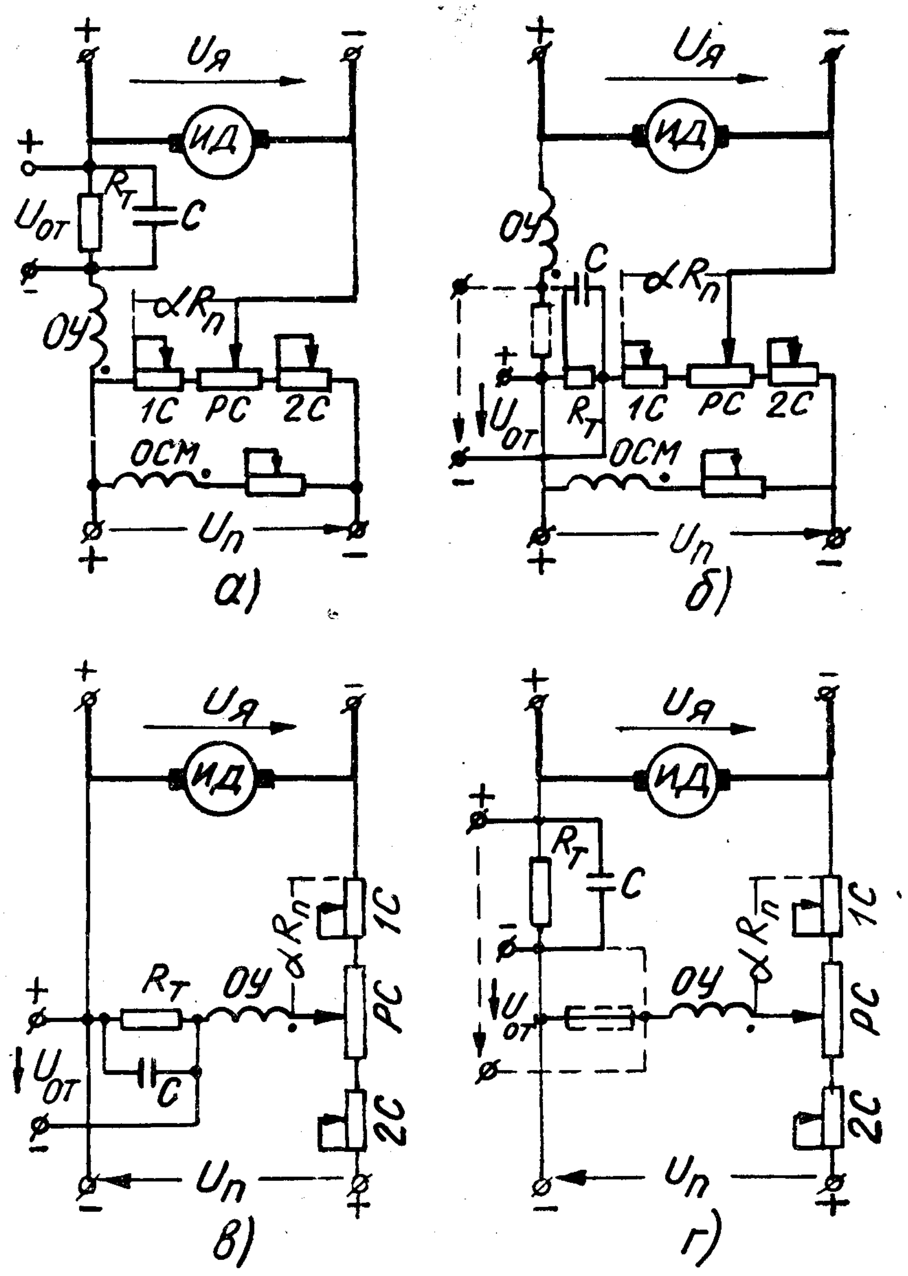

Рис. 1. Возможные схемные решения введения ОТ в контур сравнения для ПМУ9М1 и схемы с дифференциальным включением потенциометра $R_{п}$.

Из кривых следует, что внизу диапазона при всех схемных решениях САР устойчива лишь при $K_{от} \approx 0{,}03$, в то время как по условиям жесткости механических характеристик должно быть $K_{от} \geq 0{,}042$. Таким образом, не говоря о качестве переходного процесса, рассматриваемые схемные решения без специальных мер стабилизации не могут обеспечить устойчивую работу привода внизу диапазона 1 : 10.

На рис. 5, *а* приведена осциллограмма переходного процесса $n(t)$ и $I_я(t)$, снятая для варианта рис. 1, *г*. Из нее следует, что переходный процесс в этом случае отличается колебательностью, большим перерегулированием и плохим коэффициентом затухания.

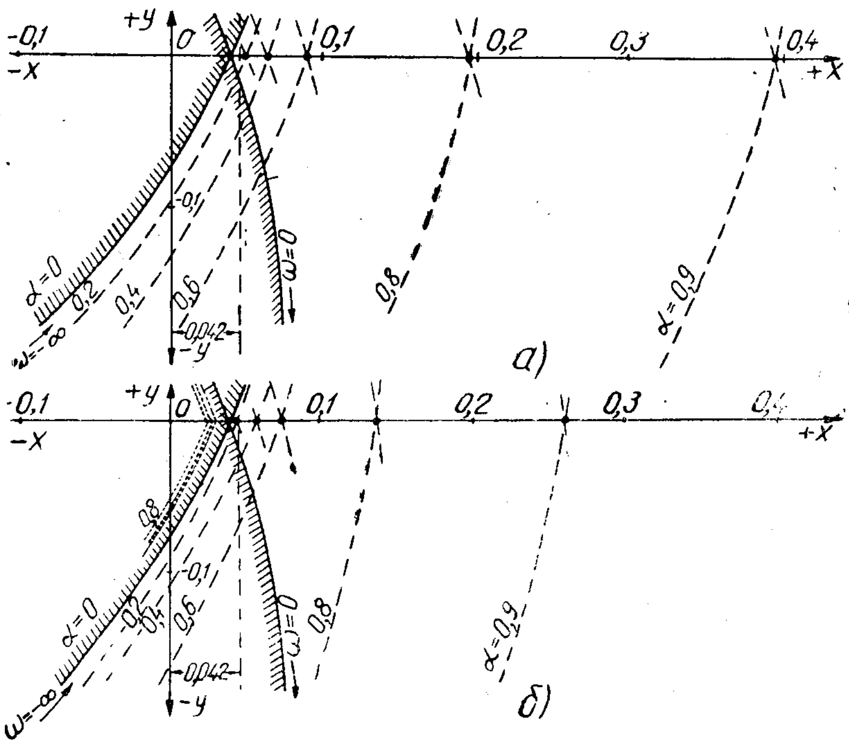

Рис. 2. Кривые Д-разбиения по параметру $K_{от}$ для разных уставок скорости α при $T_с = 0$:

а, б — сплошными для варианта схемы — *а*,
а — штриховыми — для варианта схемы — *б*,
б — пунктирными для варианта схемы — *в*.
б — штриховыми для варианта схемы — *г*.

Повышение устойчивости работы привода и улучшение качества переходных процессов может быть достигнуто, в частности, интегрированием напряжения $U_{от}$, что равносильно введению постоянной $T_с$ времени в цепь жесткой положительной обратной связи и осуществляется практически шунтированием сопротивления $R_т$ емкостью $C = 2000$ мкф, [1]. Постоянная времени ОТ при этом будет: $T_с = R_т C = 35 \cdot 2000 \cdot 10^{-6} = 0{,}07$ *сек*, что незначительно ухудшает быстродействие.

Передаточная функция для ОТ в этом случае запишется в виде:

$$W_{от}(p) = \frac{K_{от} R_т}{T_с p + 1}(1 - \alpha). \tag{3}$$

Передаточная функция САР по возмущающему воздействию при тех же прочих условиях [1] будет:

$$W_в(p) = \frac{\Delta n(p)}{\Delta M_с(p)} = \frac{\dfrac{R_э}{C_с C_м}(b_0 p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3)}{a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4}. \tag{4}$$

Здесь:

$$a_0 = T_{му} T_э T_м T_с,$$

$$a_1 = T_{му} T_э T_м + T_{му} T_м T_с + \left[1 + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha)\right] T_э T_м T_с,$$

$$a_2 = T_{му} T_м + T_{му} T_с + \left[1 + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha)\right] T_э T_м + \left[1 + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha)\right] T_с T_м.$$

$$a_3 = T_{му} + T_м + [1 + K_{му} \sigma (1-\alpha)] T_с + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha) T_м,$$

$$a_4 = K_{му} \sigma (1-\alpha) + 1,$$

$$b_0 = T_{му} T_э T_м,$$

$$b_1 = T_{му} T_э + T_{му} T_с + \left[1 + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha)\right] T_э T_с,$$

$$b_2 = T_{му} + \left[1 + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha)\right] T_э + \left[1 + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha)\right] T_с,$$

$$b_3 = (R_я \sigma - K_{от} R_т)(1-\alpha) \frac{K_{му}}{R_э} + 1.$$

Условие устойчивости по Гурвицу для САР третьего порядка ($T_э = 0$) при $a_1 > 0$, $a_2 > 0$, $a_3 > 0$ и $a_4 > 0$ запишется в виде:

$$a_2 a_3 > a_1 a_4. \qquad (5)$$

Анализируя последнее неравенство видим, что введение постоянной $T_с$ увеличивает коэффициенты при средних членах характеристического уравнения и уменьшает a_1 ($T_с < 1$), независимо от α, то есть способствует улучшению устойчивости работы САР по всему диапазону. Кроме того в зависимости от схемного решения меняются коэффициенты, содержащие $R_э$ за счет множителя $(1-\alpha)$, что приводит к дополнительному улучшению устойчивости работы привода.

Уравнение кривой Д-разбиения по параметру $K_{от}$ для варианта рис. 1, *г* будет:

$$K_{от}(j\omega) = \frac{\left(a_1\omega^2 - a_3 - \frac{a_4}{\omega}\right)}{(1-\alpha)\frac{R_т}{R_э} K_{му} T_м} - j\,\frac{\omega(a_0\omega^2 - a_2)}{(1-\alpha)\frac{R_т}{R_э} K_{му} T_м}. \qquad (5)$$

Для варианта «*а*» множитель $(1-\alpha)$, в уравнении (5) отсутствует, а для варианта «*б*» имеет место в знаменателе. Из (5) следует, что $K_{от}$ есть сложная функция α.

На рис. 3 показаны кривые Д-разбиения, построенные в соответствии с уравнением (5) для уставок скорости $\alpha = 0$; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 0,9; а в табл. 1 сведены сравнительные данные значения $K_{от}(\omega)$ по вариантам. Из сравнения кривых рис. 2, рис. 3 и табл. 1 видно, что при шунтировании сопротивления $R_т$ емкостью С зона устойчивости расширяется, т. е. введение емкости С способствует улучшению динамики привода внизу диапазона (осциллограмма *б* рис. 5) регулирования скорости.

Таблица 1

α / $K_{от}(\omega)$	Вариант «а»					Вариант «б»					Вариант «г»				
	0	0,2	0,4	0,6	0,9	0	0,2	0,4	0,6	0,9	0	0,2	0,4	0,6	0,9
$T_c = 0$	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,048	0,064	0,088	0,4	0,04	0,041	0,056	0,07	0,26
$T_c = 0,07$	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,23	0,3	0,45	1,7	0,17	0,21	0,25	0,22	0,4

На больших скоростях, ввиду ослабления ОТ стабилизирующее действие емкостью С, в вариантах схем рис. 1, *б* и *г*, оказывается избыточной (САР устойчива при $K_{от} > 0,042$) и приводит лишь к затя-

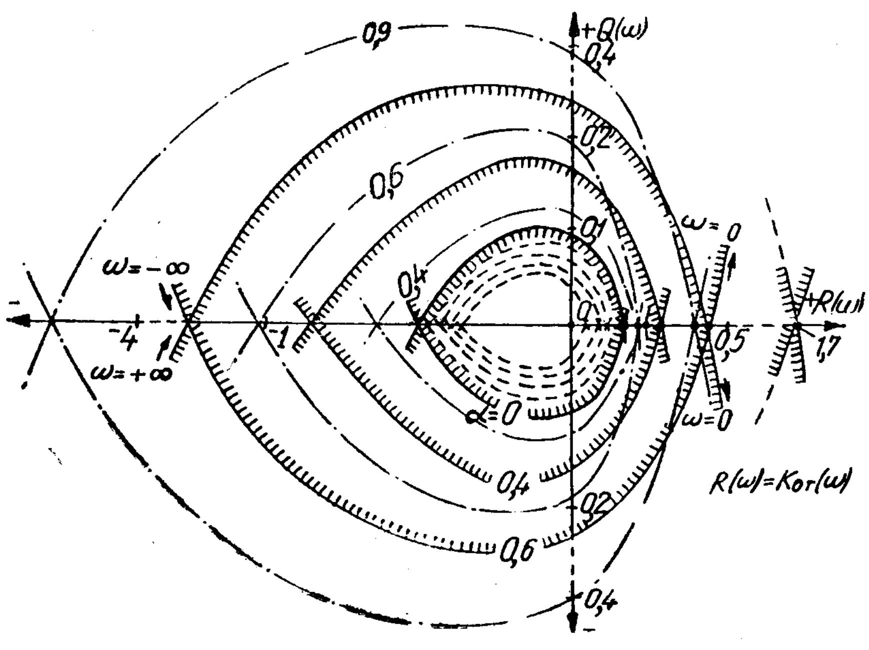

Рис. 3. Кривые Д-разбиения по параметру $K_{от}$ для разных уставок скорости α при $T_c = 0,7$ *сек*:

сплошными (жирно) — для варианта схемы — *а*,
сплошными (тонко) — для варианта схемы — *б*,
штриховыми — для варианта схемы — *в*,
штрих-пунктирными — для варианта схемы — *г*.

гиванию переходного процесса. Причем в этом вопросе надо отдать предпочтение схеме рис. 1, *г*, так как следует из рис. 3 для нее запас устойчивости по диапазону меньше и емкость *С* используется лучше.

На рис. 4 приведены кривые Д-разбиения по параметру T_c построенные по уравнению (6) для различных значений α.

$$T_c(j\omega) = \frac{T_{му} T_э T_м (j\omega)^3 + \left\{ T_{му} T_м + \left[1 + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha) \right] T_э T_м \right\} (j\omega)^2 + \left\{ T_{му} + T_м + (R_я \sigma - K_{от} R_т)(1-\alpha) \frac{K_{му}}{R_э} T_м \right\} (j\omega) + K_{му} \sigma (1-\alpha) + 1}{T_{му} T_э T_м (j\omega)^4 + \left\{ T_{му} T_м + \left[1 + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha) \right] T_э T_м \right\} (j\omega)^3 + \left[T_{му} + T_м + \frac{R_я}{R_э} K_{му} \sigma (1-\alpha) T_м \right] (j\omega)^2 + [K_{му} \sigma (1-\alpha) + 1](j\omega)} \quad (6)$$

Из них следует, что внизу диапазона ($\alpha \approx 0,1$) устойчивая работа возможна лишь при $T_c = 0,01$ *сек.* С увеличением скорости **($\alpha \to 1$), кривые** Д-разбиения сдвигаются относительно действительной оси $R(\omega)$ вверх и САР устойчива при меньших значениях T_c. При $\alpha = 1$ САР устойчива при любом значении T_c в том числе и при $T_c = 0$, то есть вверху диапазона стабилизация не требуется, а введение T_c приводит лишь к затягиванию переходного процесса. Следовательно, для получения хороших динамических показателей в целом изменение T_c по диапазону должно быть нелинейным.

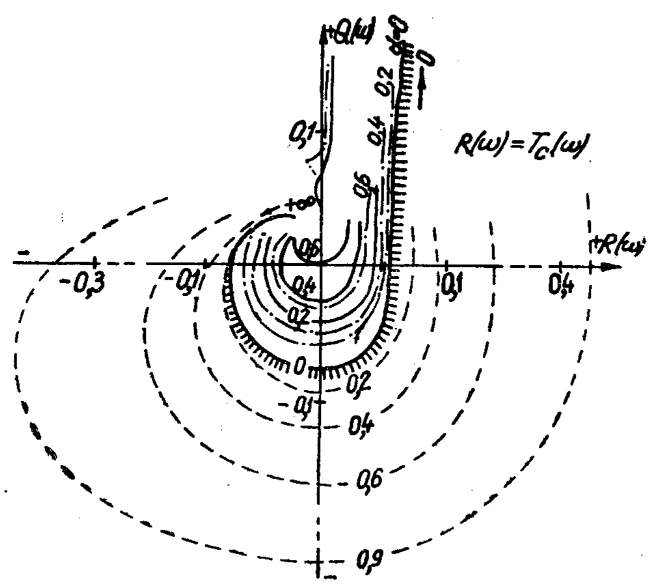

Рис. 4. Кривые Д-разбиения по параметру T_c при $K_{от} = 0,1$ для разных уставок скорости:

сплошными — для вариантов — *а* и *б*,
штриховыми — для варианта — *в*,
штрих-пунктирными — для варианта — *г*.

На рис. 5 приведены осциллограммы, снятые при приеме и сбросе нагрузки для скоростей 300 и 3000 *об/мин*: *а*, *г* — при С=0; *б*, *в* — при C = 2000 *мкф*, для варианта схемы рис. 1, *г*. Из них следует, что эффективная стабилизация САР емкостью C-2000 *мкф* происходит на нижнем пределе диапазона (n=300 *об/мин*). При работе привода на скорости 3000 *об/мин* стабилизация емкостью C практически не сказывается.

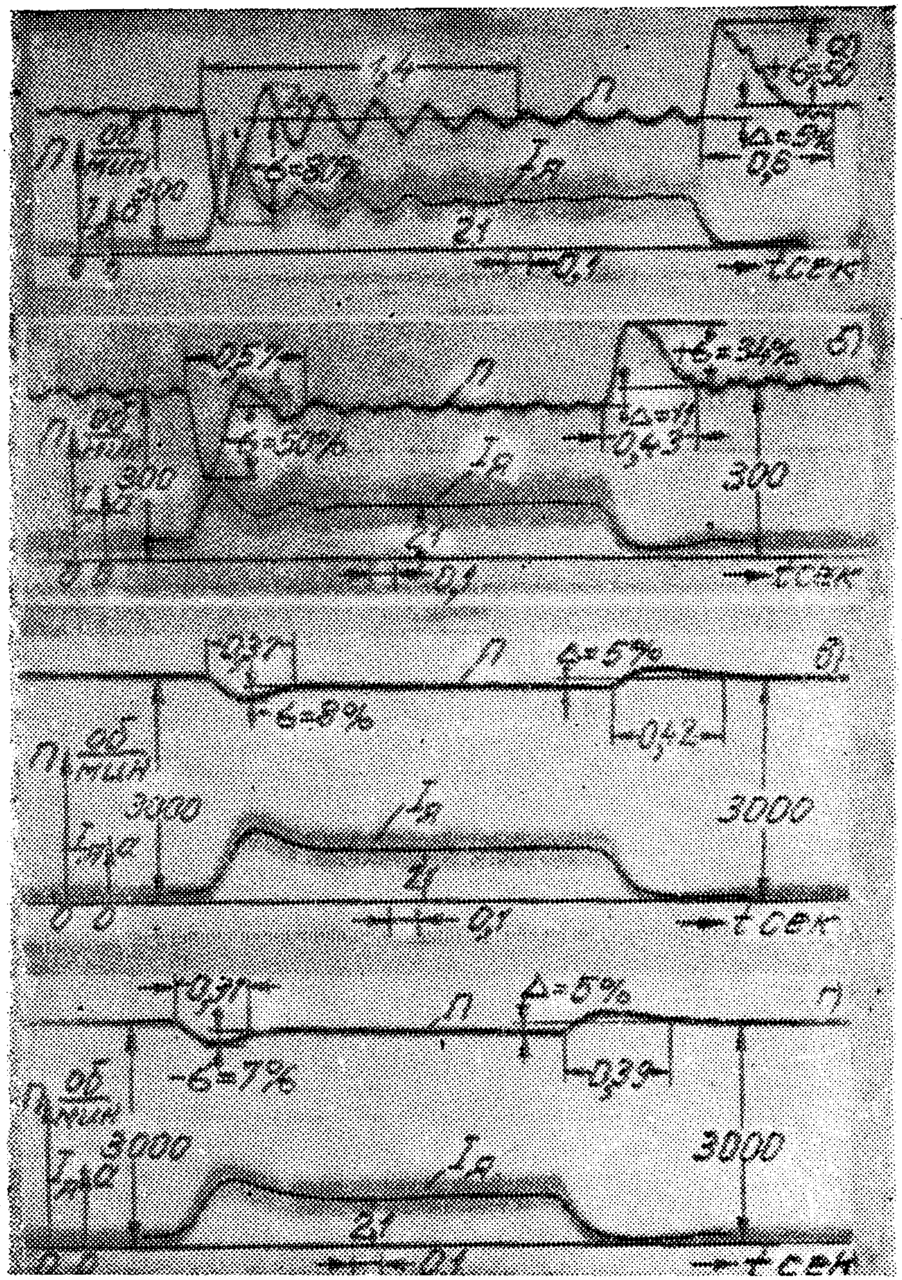

Рис. 5. Осциллограммы переходного процесса для приема и сброса нагрузки.

Выводы

1. Введение постоянной времени T_c в закон регулирования улучшает устойчивость работы электропривода ценой ухудшения быстродействия.

2. Эффективная стабилизация САР требуется на нижнем пределе диапазона регулирования скорости. Вверху диапазона устойчивость может быть улучшена за счет ослабления ОТ схемным решением, то есть стабилизация емкостью *С* должна быть по диапазону нелинейной,

3. При выборе емкости С из условия нижнего предела диапазона регулирования скорости лучшее ее использование наблюдается в варианте с дифференциальным включением потенциометра.

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. А. Боровиков. Динамические процессы в электроприводе по системе однофазный магнитный усилитель — двигатель. «Электромеханика», № 2, 1965.