

# СИСТЕМА ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ОЦЕНКЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОКА

**Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Мариничев В. Ю., Никорюк Н.С., Розкаряка П. И.**  
**Донецкий государственный технический университет**  
*toi@elf.dgtu.donetsk.ua*

*In this article the slave control system with a feedback by the dynamic current is considering. The full-order observers with accuracy and simplified current circuit models were used for estimation of the dynamic current. The design of considered observers and their comparative analysis was carried out.*

## 1 Постановка задачи

Известно, что повысить порядок астатизма системы подчинённого регулирования (СПР) скорости по возмущающему воздействию можно заменой обратной связи по полному току якорной цепи  $I$  обратной связью по его динамической составляющей  $I_j$  [1]. Структурная схема такой системы для привода постоянного тока представлена на рисунке 1. В схеме использована следующая система относительных единиц (о.е.):

$$\bar{\omega} = \omega / \omega_0, \quad \bar{I} = I / I_{кз}, \quad \bar{M} = M / M_{кз}, \quad \bar{i} = I / I_n, \quad \bar{m} = M / M_n, \\ \bar{E} = E / U_n, \quad \bar{U}_y = U_y / (k_n U_n), \quad \bar{U}_{зт} = U_{зт} / (k_t I_{кз}), \quad \bar{U}_{зс} = U_{зс} / (k_c \omega_0), \quad (1)$$

где

$\omega_0$  – скорость идеального холостого хода двигателя;

$U_n, I_n, M_n$  – номинальные значения напряжения, тока якоря и электромагнитного момента двигателя;

$I_{кз}, M_{кз}$  – ток и момент короткого замыкания;

$k_n$  – коэффициент усиления тиристорного преобразователя;

$k_t, k_c$  – коэффициенты обратных связей по динамическому току и по скорости.

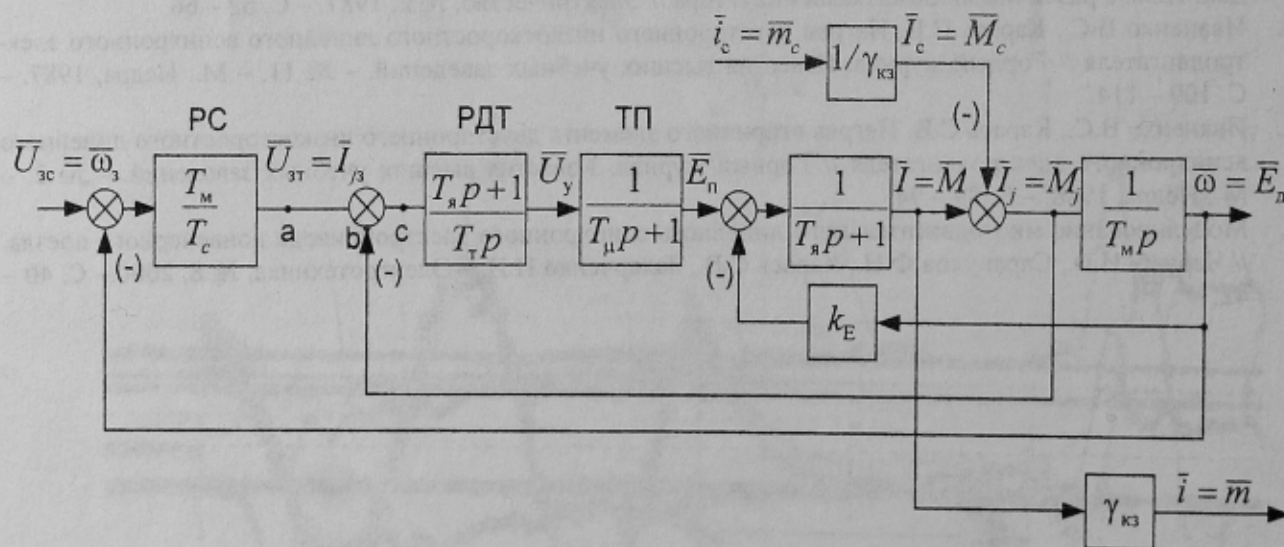


Рисунок 1—Структурная схема СПР с обратной связью по динамическому току

Система состоит из электромеханической системы тиристорный преобразователь (ТП)–двигатель постоянного тока (Д), ПИ-регулятора динамического тока (РДТ) и П-регулятора скорости (РС).

На схеме рис. 1 использованы, кроме вышеописанных, следующие обозначения:

$T_y$  – электромагнитная постоянная времени якорной цепи ТП-Д;

$T_m$  – электромеханическая постоянная времени привода;

$T_\mu$  – малая не компенсируемая постоянная времени контура тока, отнесенная к ТП;

$T_t, T_c$  – постоянные времени интегрирования разомкнутых контуров динамического тока и скорости;

$\gamma_{кз} = M_{кз} / M_{н} = I_{кз} / I_{н}$  – кратность тока и момента короткого замыкания;

$k_E$  – коэффициент учета влияния внутренней обратной связи по ЭДС двигателя, который может принимать значение 0 (связь не учитывается) или 1 (связь учитывается).

Поскольку динамический ток не поддается непосредственному измерению, то для его оценки можно использовать реальное дифференцирование выходного сигнала датчика скорости [2], модель двигателя [3] или наблюдатели состояния (НС) [4, 5].

Остановимся на последнем способе, преимуществом которого является асимптотичность идентифицирующих устройств.

Рассмотрим два типа наблюдателей полного порядка. Их структурные схемы в принятой выше системе о.е. представлены на рис.2 и 3 соответственно. Прямые части обоих НС состоят из моделей замкнутого контура регулирования тока (КРТ) и механической части привода (МЧП) без приложения к ней статического момента  $M_c$  как не измеряемого возмущающего воздействия. Замыкание наблюдателей выполняется по разности измеренной скорости двигателя  $\omega$  и ее оценки  $\hat{\omega}$ . Благодаря такой структуре сигнал на выходе КРТ наблюдателей  $\hat{I}_{j1}$  оценивает не полный, а динамический ток якорной цепи.

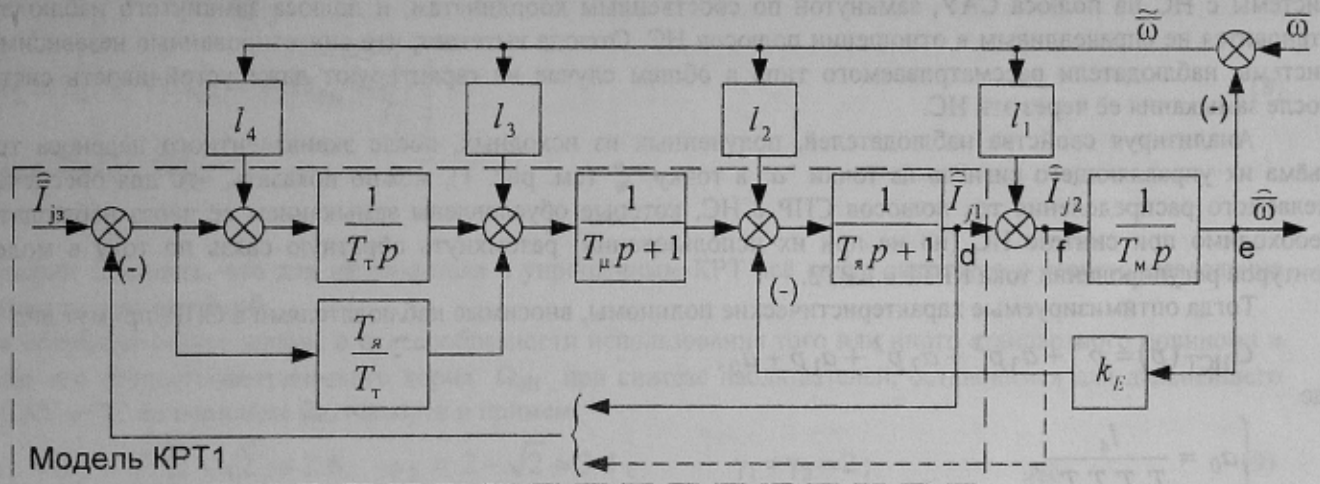


Рисунок 2—Структурная схема НС с точной моделью КРТ

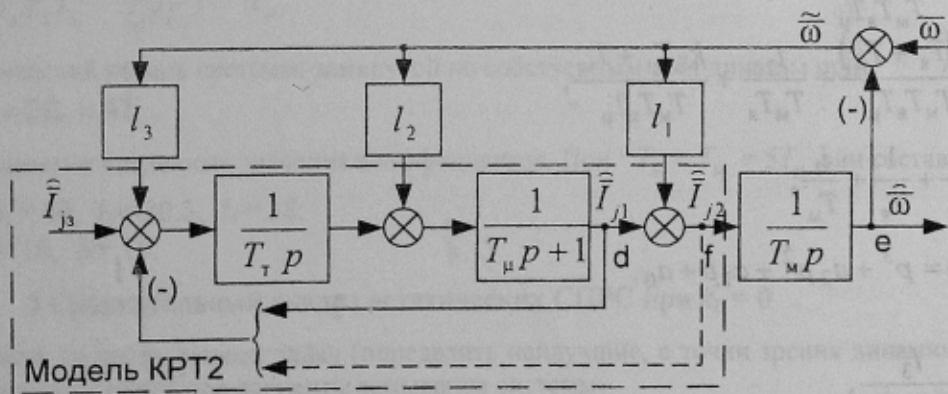


Рисунок 3—Структурная схема НС с упрощенной моделью КРТ

Разница между наблюдателями состоит в том, что первый из них (рис.2) воспроизводит модель контура тока точно, а второй (рис.3) – упрощенно. Упрощение состоит в пренебрежении влиянием внутренней обратной связи по ЭДС двигателя и в редуцировании модели КРТ на этой основе при синтезе НС [5]. Назовем рассматриваемые наблюдатели условно НСТ (рис.2) и НСУ (рис.3). НСТ имеет 4-й порядок, а НСУ – 3-й (за счет редуцирования).

В [4] предложено заменить связи по  $I_j$  и  $\omega$  обратными связями по сигналам  $\hat{I}_{j1}$  и  $\hat{\omega}$  наблюдателей (точки "d" и "e" на структурных схемах).

В [5] обращено внимание на тот факт, что в любых НС рассматриваемого типа, кроме выходного сигнала контура тока  $\hat{I}_{j1}$ , имеется ещё один сигнал (условно обозначим его  $\hat{I}_{j2}$ ), который оценивает динамическую составляющую тока более точно, чем сигнал  $\hat{I}_{j1}$ , однако сравнительный анализ систем с разными способами замыкания обратных связей не выполнен. Вызывает сомнение также целесообразность замыкания СПР по оценке скорости  $\hat{\omega}$  при предположении измеряемости реальной координаты  $\omega$ . Не исследованным остался

вопрос и об области параметров электромеханической системы, для которой применение наблюдателя с упрощенной моделью контура тока, не приводит к существенному ухудшению динамических свойств привода.

Кроме того, в [4] и [5] синтез НС выполнен из условия обеспечения желаемого распределения полюсов наблюдателя, а не системы, замкнутой через наблюдатель.

В связи с вышеизложенным в данной статье решаются следующие задачи:

- 1) Синтезировать наблюдатели состояния, представленные на рис. 2 и рис. 3, из условия желаемого расположения полюсов СПР, замкнутой через НС.
- 2) Определить, по каким сигналам лучше замыкать СПР: по  $\hat{I}_{j1}$  или по  $\hat{I}_{j2}$ , по  $\omega$  или по  $\bar{\omega}$ .
- 3) Определить область параметров, при которых оправдана замена наблюдателя НСТ наблюдателем НСУ.

## 2 Параметрический синтез НС

Рассматриваемые наблюдатели отличаются тем, что, они воздействуют непосредственно на идентифицируемую часть объекта регулирования, т. е. точка приложения "b" сигнала ОС по оценке динамического тока расположена правее точки съема "a" управляющего сигнала наблюдателя  $U_{ст}$ . При замыкании систем автоматического управления (САУ) при помощи таких НС положение о разделении полюсов системы с НС на полюса САУ, замкнутой по собственным координатам, и полюса замкнутого наблюдателя становится не справедливым в отношении полюсов НС. Отсюда вытекает, что синтезированные независимо от системы наблюдатели рассматриваемого типа в общем случае не гарантируют даже устойчивость системы после замыкания её через эти НС.

Анализируя свойства наблюдателей, полученных из исходных, после эквивалентного переноса точки съема их управляющего сигнала из точки "a" в точку "c" (см. рис. 1), можно показать, что для обеспечения желаемого распределения тех полюсов СПР с НС, которые обусловлены замыканием её через наблюдатель, необходимо при синтезе НС (но не при их использовании) разомкнуть обратную связь по току в моделях контуров регулирования тока КРТ1 и КРТ2.

Тогда оптимизируемые характеристические полиномы, вносимые наблюдателями в СПР, примут вид

$$G_{НСТ}(p) = p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0, \quad (1)$$

где

$$\begin{cases} a_0 = \frac{l_4}{T_M T_{я} T_T T_{\mu}}, \\ a_1 = \frac{k_E + l_1 + l_3 + l_2}{T_M T_{я} T_{\mu}}, \\ a_2 = \frac{l_1 (T_{я} + T_{\mu})}{T_M T_{я} T_{\mu}} + \frac{l_2}{T_M T_{я}} + \frac{k_E T_{\mu} + T_M}{T_M T_{я} T_{\mu}}, \\ a_3 = \frac{1}{T_{\mu}} + \frac{1}{T_{я}} + \frac{l_1}{T_M}; \end{cases} \quad (2)$$

$$G_{НСУ}(p) = p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0, \quad (3)$$

где

$$\begin{cases} a_0 = \frac{l_3}{T_M T_T T_{\mu}}, \\ a_1 = \frac{l_1 + l_2}{T_M T_{\mu}}, \\ a_2 = \frac{l_1 T_{\mu} + T_M}{T_M T_{\mu}}. \end{cases} \quad (4)$$

Задаваясь видом желаемых полиномов

$$G_4(p) = p^4 + \alpha_3 \Omega_{0н} p^3 + \alpha_2 \Omega_{0н}^2 p^2 + \alpha_2 \Omega_{0н}^3 p + \Omega_{0н}^4, \quad (5)$$

$$G_3(p) = p^3 + \gamma_2 \Omega_{0н} p^2 + \gamma_1 \Omega_{0н}^2 p + \Omega_{0н}^3, \quad (6)$$

где  $\Omega_{0н}$  — среднегеометрический корень наблюдателя, получим выражения для коэффициентов корректирующих связей НС:

1) для НСТ

$$\begin{cases} l_1 = T_m \left( \alpha_3 \Omega_{0н} - \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_\mu} \right) \\ l_2 = T_m \left[ T_m \alpha_2 \Omega_{0н}^2 - \frac{T_r + T_\mu}{T_\mu} \left( \alpha_3 \Omega_{0н} - \frac{1}{T_r} \right) + \frac{T_r}{T_\mu^2} \right] - k_E \\ l_3 = T_m T_r \left( T_\mu \alpha_1 \Omega_{0н}^3 - \alpha_2 \Omega_{0н}^2 - \frac{\alpha_3 \Omega_{0н}}{T_\mu} - \frac{1}{T_\mu^2} \right) \\ l_4 = T_m T_r T_\mu T_\mu \Omega_{0н}^4 \end{cases} \quad (7)$$

2) для НСУ

$$\begin{cases} l_1 = T_m \left( \gamma_2 \Omega_{0н} - \frac{1}{T_\mu} \right) \\ l_2 = T_m \left( T_\mu \gamma_1 \Omega_{0н}^2 - \gamma_2 \Omega_{0н} + \frac{1}{T_\mu} \right) \\ l_3 = T_m T_r T_\mu \Omega_{0н}^3 \end{cases} \quad (8)$$

Следует отметить, что для наблюдателя с упрощенным КРТ всё выше сказанное о теореме разделения справедливо только при  $k_E=0$ .

Не обсуждая сейчас вопрос о целесообразности использования того или иного стандартного полинома и о величине его среднегеометрического корня  $\Omega_{0н}$  при синтезе наблюдателей, остановимся для дальнейшего анализа САУ с НС на полиноме Баттерворта и примем

$$\alpha_1 = \alpha_3 = \sqrt{2(2 + \sqrt{2})} \approx 2.6, \quad \alpha_2 = 2 + \sqrt{2} \approx 3.4; \quad \gamma_1 = \gamma_2 = 2; \quad (9)$$

$$\Omega_{0н} = 2\Omega_0 = \frac{2}{\sqrt[3]{T_c T_r T_\mu}} = \frac{2}{\sqrt[3]{8T_\mu^3}} = \frac{1}{T_\mu}, \quad (10)$$

где  $\Omega_0$  – среднегеометрический корень системы, замкнутой по собственным координатам при

$$T_r = 2T_\mu, \quad T_c = 2T_r = 4T_\mu. \quad (11)$$

Для примера приведем и численные значения коэффициентов. При  $T_r = T_m = 5T_\mu$  они составляют

- для НСТ:  $l_1 = 7.1, l_2 = 50, l_3 = 20.3, l_4 = 38$ ;

- для НСУ:  $l_1 = 5, l_2 = 10, l_3 = 15$ .

### 3 Сравнительный анализ астатических СПРС при $k_E = 0$

Для решения второй из поставленных задач (определить наилучшие, с точки зрения динамики, сигналы обратных связей), рассмотрим следующие варианты замыкания системы:

1 – по  $I_j$  и  $\omega$  (как эталон);

2 – по  $\hat{I}_{j2}$  и по  $\omega$  (или  $\hat{\omega}$ );

3 – по  $\hat{I}_{j1}$  и по  $\omega$  (или  $\hat{\omega}$ ).

При решении этой задачи можно первоначально пренебречь влиянием противоЭДС, т.е. положить  $k_E=0$  как в системе рис.1, так и в наблюдателе НСТ, как при синтезе корректирующих связей НС, так и при анализе динамических свойств СПР. Пренебрежение влиянием противоЭДС двигателя на динамику привода соответствует случаю, когда  $T_m \gg T_\mu$ .

В этом случае переходные процессы при отработке управляющего воздействия для всех вариантов замыкания будут одинаковы, так как при отсутствии статического момента и обратной связи по ЭДС, ошибки оценивания координат обоими НС равны нулю в любой момент времени.

Для оценки переходных процессов по возмущающему воздействию будем анализировать реакцию тока  $I$  и скорости  $\omega$  двигателя на скачок статического момента  $M_c$ . При этом, чтобы абстрагироваться от влияния электромеханической постоянной времени привода  $T_m$  на величину динамического падения скорости  $\Delta\omega_{max}$ , будем выводить на графики приращение скорости  $\Delta\omega$ , отнесенное к статическому падению скорости  $\Delta\omega_c$  в

однократноинтегрирующей системе с П-РС и обратной связью по полному току якоря при выполнении условия (11):

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_c} = \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{cp}} \cdot \frac{T_m}{T_c},$$

где  $\Delta\omega_{cp}$  – статическое падение скорости в разомкнутой системе ТП-Д.

Анализ переходных характеристик САУ с рассмотренными обратными связями на скачкообразное изменение статического момента показал, что замена обратной связи по скорости  $\omega$  обратной связью по её оценке  $\hat{\omega}$  при прочих равных условиях приводит хотя и к незначительному (около 2%), но всё же к повышению перерегулирования по току, что не желательно. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать системы, замкнутые по измеренной скорости.

Реакция САУ с оставшимися вариантами обратных связей на скачкообразное изменение статического момента проиллюстрированы графиками на рис. 4, полученные при  $T_r = 5T_\mu$

Графики 1 на этих рисунках представляют собой тот эталон, к которому будут стремиться переходные процессы в системах с НС при увеличении до бесконечности их собственных частот  $\Omega_{0н}$ . Они характеризуются следующими показателями качества:

$$\sigma = 43.4\%, \quad \Delta\omega_{max} = 0.44\Delta\omega_c, \quad t_c = 3T_\mu, \quad (12)$$

где  $\sigma$  – перерегулирование по току,  $\Delta\omega_{max}$  – максимальное динамическое падение скорости,  $t_c$  – время первого согласования тока с установившимся значением, равное времени достижения скоростью первого экстремума,  $t_m$  – время достижения током максимального значения.

Аналогичные показатели для системы с ПИ-РС и обратной связью по полному току якоря, настроенной на симметричный оптимум, составляют

$$\sigma = 53.7\%, \quad \Delta\omega_{max} = 0.95\Delta\omega_c, \quad t_c = 6T_\mu, \quad (13)$$

Если учесть, что СПР с обратной связью по динамическому току имеет более высокое быстродействие и при обработке управляющего сигнала, то становится понятным желание каким-либо образом оценить величину динамического тока и замкнуть контур тока по этому сигналу.

Проанализируем теперь переходные процессы с наблюдателями (графики 2 и 3), полученные при замыкании контура регулирования тока (КРТ) по сигналу  $\hat{I}_{j1}$  и  $\hat{I}_{j2}$ .

Из сравнения графиков рис. 4а и рис. 4б видно, что, несмотря на пренебрежение влиянием обратной связи по ЭДС двигателя как при синтезе обоих НС, так и при моделировании системы, переходные процессы в САУ зависят от типа наблюдателя. Причем в системе, замкнутой через НСУ (рис. 3), переходные процессы не зависят от величины электромагнитной постоянной времени якорной цепи  $T_r$ . В случае применения наблюдателя НСТ (рис. 2) переходные процессы зависят от величины  $T_r$  и при уменьшении этого параметра приближаются к переходным процессам в системе с наблюдателем НСУ (при  $T_r = 0$  они становятся одинаковыми). Основные показатели работы САУ с наблюдателем НСТ при набросе нагрузки приведены в таблице:

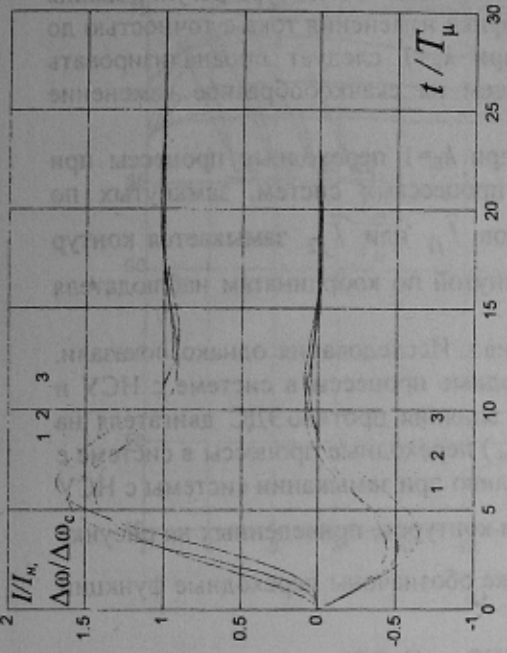
Таблица 1

Сигнал обратной связи в КРТ	$T_r / T_\mu$	10	5	2	0
$\hat{I}_{j1}$	$\sigma, \%$	74.7	73.5	71.3	68.1
	$\Delta\omega_{max} / \Delta\omega_c$	0.58	0.59	0.60	0.64
	$t_c / T_\mu$	3.3	3.3	3.6	3.6
$\hat{I}_{j2}$	$\sigma, \%$	51.6	53.1	57.6	60.8
	$\Delta\omega_{max} / \Delta\omega_c$	0.48	0.48	0.50	0.52
	$t_c / T_\mu$	3.0	3.0	3.0	3.0

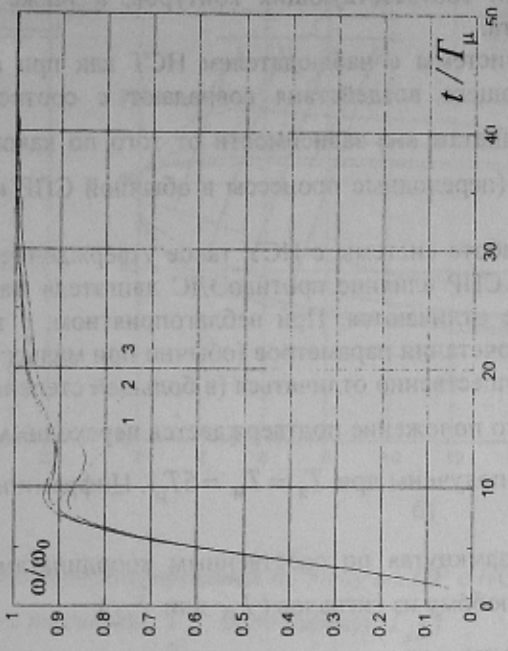
Таким образом, последняя колонка таблицы содержит показатели качества системы с наблюдателем НСУ при любых значениях постоянной времени  $T_r$ , которые совпадают с показателями качества системы с наблюдателем НСТ при  $T_r = 0$ . Графики рис. 4 сняты при  $T_r = 5T_\mu$ .

Анализируя графики и данные таблицы, можно констатировать, что замена сигнала  $\hat{I}_{j1}$  сигналом  $\hat{I}_{j2}$  при замыкании контура динамического тока приводит к уменьшению перерегулирования по току на (7+12)% и к уменьшению динамического падения скорости в среднем на 18%.

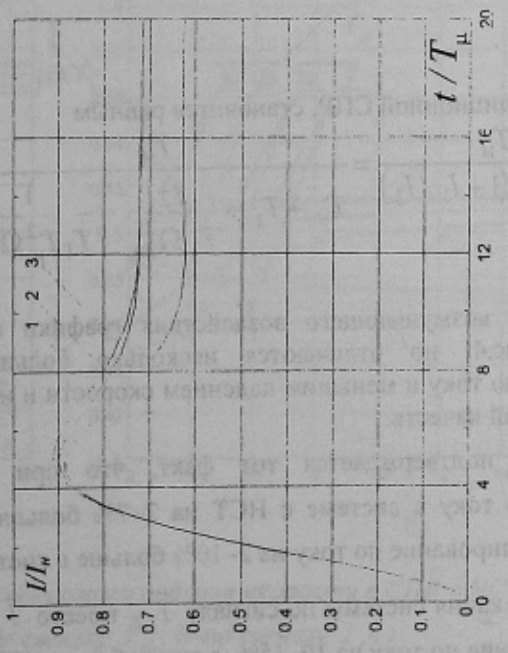
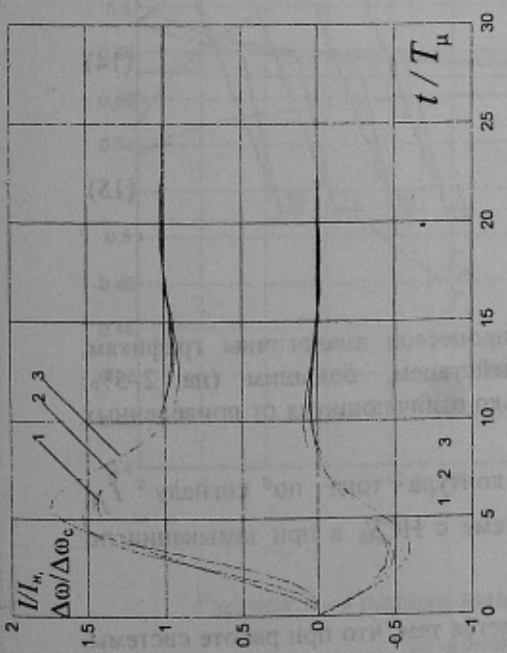
При этом линия протекания переходных процессов в системе с управлением НСУ будет отличаться от переходных процессов в системе замкнутой по обратной связи. В том же диапазоне частоты и в системе с НСТ не только при нулевой нагрузке, но и при отработке управляющего воздействия. В том же диапазоне частоты переходных процессов в системе с НСТ может определяться с увеличением частоты. Так в том же диапазоне частоты переходных процессов по сравнению с системой с управлением НСУ будет отличаться.



а) Рисунок 4—Переходные функции по возмущающему воздействию СПР с НСТ (а) и с НСУ (б) с разными вариантами замыкания обратных связей при  $k_E=0$ .



б) Рисунок 5—Переходные функции контура тока (а) и контура скорости (б) по управляющему воздействию при  $k_E=1$ .



При учете влияния противоЭДС переходные процессы в системе с упрощенным НСУ будут отличаться от переходных процессов в системе, замкнутой по собственному динамическому току, и в системе с НСТ не только при набросе нагрузки, но и при обработке управляющего воздействия. К тому же динамические свойства любых СПР при  $k_E=1$  зависят от величин постоянных времени  $T_\gamma$  и  $T_M$ . Поскольку величина динамического тока в исследуемой системе может определяться как уровнем ограничения регулятора скорости, так и темпом изменения выходного сигнала задатчика интенсивности (ЗИ), то для оценки переходных процессов по управляющему воздействию необходимо проанализировать реакцию на скачок задания контура регулирования динамического тока (КРДТ) и контура регулирования скорости (КРС). Графики изменения тока с точностью до постоянного множителя совпадают с реакциями контуров. Поэтому при  $k_E=1$  следует проанализировать переходные функции соответствующих контуров, а также реакции систем на скачкообразное изменение статического момента.

При работе системы с наблюдателем НСТ как при  $k_E=0$ , так и при  $k_E=1$  переходные процессы при обработке управляющего воздействия совпадают с соответствующими процессами систем, замкнутых по собственным координатам вне зависимости от того по какому из сигналов  $\tilde{I}_{j1}$  или  $\tilde{I}_{j2}$  замыкается контур регулирования тока (переходные процессы в обычной СПР и в СПР замкнутой по координатам наблюдателя совпадают).

При  $k_E=1$  и работе системы с НСУ такое утверждение не справедливо. Исследования однако показали, что если в обычной СПР влияние противоЭДС двигателя мало, то переходные процессы в системе с НСУ и НСТ практически не отличаются. При неблагоприятном, с точки зрения влияния противоЭДС двигателя на динамику привода, сочетании параметров (обычно при малых значениях  $T_M$ ) переходные процессы в системе с НСТ и НСУ могут существенно отличаться (в большей степени это справедливо при замыкании системы с НСУ по сигналу  $\tilde{I}_{j1}$ ). Это положение подтверждается переходными функциями контуров, приведенных на рисунке 5. Графики на рис. 5 получены при  $T_\gamma = T_M = 5T_\mu$ . Цифрами на этом рисунке обозначены переходные функции систем:

1 – система, замкнутая по собственным координатам (обычная СПР с П-РС), и система с НСТ и обратной связью по любому из сигналов ( $\tilde{I}_{j1}$  или  $\tilde{I}_{j2}$ );

2 – система с НСУ и обратной связью по  $\tilde{I}_{j1}$ ;

3 – система с НСУ и обратной связью по  $\tilde{I}_{j2}$ .

Из графиков также следует, что даже при неблагоприятном сочетании параметров системы и замыкании контура тока по сигналу  $\tilde{I}_{j2}$  переходные процессы в системе с НСТ и НСУ практически не отличаются. Исключается также и снижение коэффициента передачи контура тока, которое имеет место в системе с НСУ и замыкании контура по его сигналу  $\tilde{I}_{j1}$ . Этот коэффициент вместо величины

$$K_{кт} = \frac{T_M}{T_M + T_T} \quad (14)$$

имеющий место в традиционной СПР, становится равным

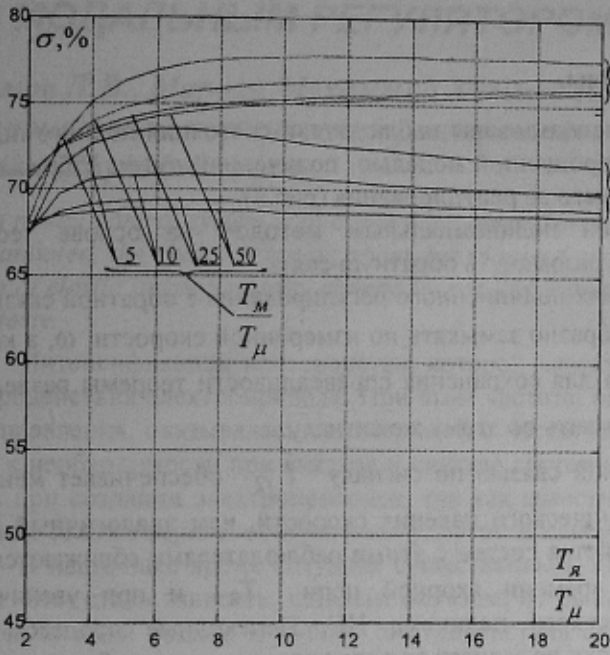
$$K_{кт} = \frac{T_M}{T_M + T_T(1 + I_1/I_3)} = \frac{T_M}{T_M + T_T + \frac{\gamma_2}{T_\mu \Omega_{0н}^2} - \frac{1}{T_T T_\mu^2 \Omega_{0н}^3}} \quad (15)$$

При обработке возмущающего воздействия графики переходных процессов аналогичны графикам, приведенным на рис.4, но отличаются несколько большим быстродействием, большим (на 2–5%) перерегулированием по току и меньшим падением скорости и имеют несколько отличающиеся от приведенных в таблице 1 показатели качества.

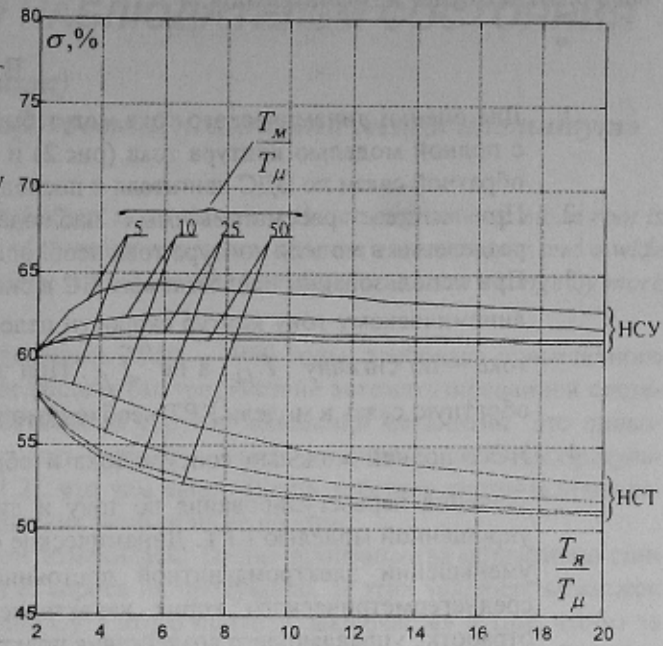
По-прежнему подтверждается тот факт, что при замыкании контура тока по сигналу  $\tilde{I}_{j1}$  перерегулирование по току в системе с НСТ на 2–7% больше, чем в системе с НСУ, а при замыкании по сигналу  $\tilde{I}_{j2}$  перерегулирование по току на 2–10% больше в системе с НСУ.

Эффект от замыкания системы по сигналу  $\tilde{I}_{j2}$  вместо  $\tilde{I}_{j1}$  подтверждается тем, что при работе системы с НСТ перерегулирование по току на 10–15%, а при работе с НСУ в среднем на 10% меньше.

Более точная информация о перерегулировании по току и максимальном падении динамической скорости при набросе нагрузки приведена на рис. 6 и рис. 7.

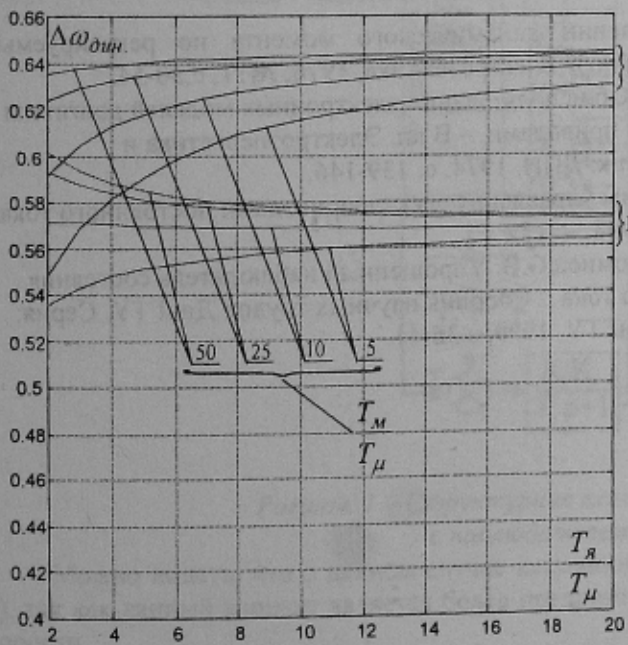


а)

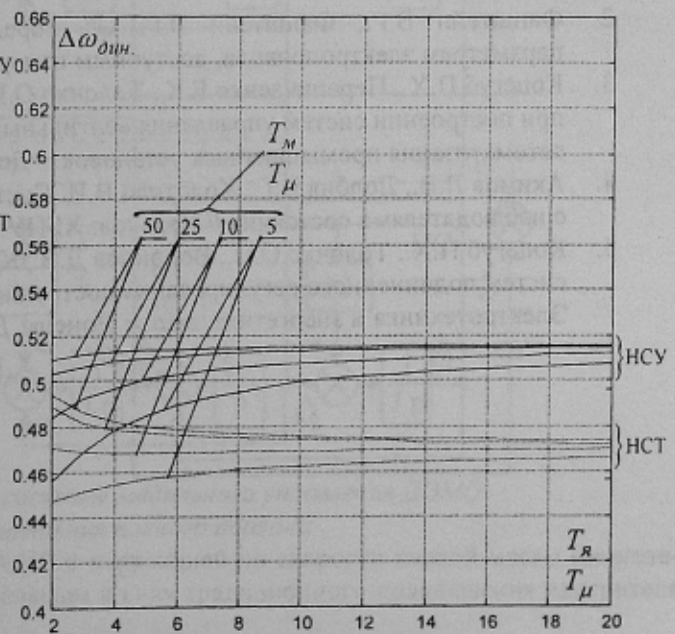


б)

Рисунок 6 – Графики зависимости перерегулирования по току в СПР с НСТ и НСУ  
(а–контур замкнут по сигналу  $\tilde{I}_{j1}$ , б–по сигналу  $\tilde{I}_{j2}$ )



а)



б)

Рисунок 7 – Графики зависимости динамического падения скорости в СПР с НСТ и НСУ  
(а–контур замкнут по сигналу  $\tilde{I}_{j1}$ , б–по сигналу  $\tilde{I}_{j2}$ )



Следует отметить, что эти графики приведены для случая, когда среднегеометрический корень наблюдателя  $\Omega_{0н}$  превышает в 2 раза среднегеометрический корень контура регулирования скорости. Если  $\Omega_{0н}$  увеличить в 1.5 раза, то разница в показателях отработки возмущающего воздействия при различных наблюдателях будет незначительной.

### Выводы

- 1 Для оценки динамического тока могут быть использованы наблюдатели состояния полного порядка с полной моделью контура тока (рис.2) и с упрощенной моделью, полученной путем отбрасывания обратной связи по ЭДС двигателя и последующего ее редуцирования (рис.3).
- 2 При синтезе рассматриваемых наблюдателей полиномиальным методом на основе теоремы разделения в модели контура тока необходимо разомкнуть обратную связь.
- 3 При использовании предлагаемых НС в системах подчиненного регулирования с обратной связью по динамическому току контур скорости целесообразно замыкать по измеренной скорости  $\omega$ , а контур тока – по сигналу  $\hat{I}_{j2}$ , а не  $\hat{I}_{j1}$ . При этом для сохранения справедливости теоремы разделения обратную связь в модели КРТ необходимо замыкать по этому же сигналу.
- 4 НС с полной моделью контура тока и обратной связью по сигналу  $\hat{I}_{j2}$  обеспечивает меньшие значения перерегулирования по току и динамического падения скорости, чем аналогичный НС с упрощенной моделью КРТ. Динамические свойства систем с этими наблюдателями сближаются при уменьшении электромагнитной постоянной времени якорной цепи  $Tя$  и при увеличении среднегеометрического корня характеристического полинома НС. Переходные процессы при отработке управляющего воздействия практически не зависят от типа используемого наблюдателя.
- 5 НС с редуцированной моделью контура тока проще в реализации и в настройке, характеризуется меньшими значениями коэффициентов корректирующих связей и может быть рекомендован в системах с малыми значениями  $Tя$ , а также в системах, когда преобладающим является режим отработки управляющего воздействия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кунин П.Н., Мурашкин А.К., Петрачков А.И. Электропривод с обратной связью по динамическому моменту // Автоматизация производственных процессов. – Новосибирск, 1978, с. 85-92.
2. Фанштейн В.Г., Фанштейн Э.Г. Об определении динамического момента по регулируемым параметрам электропривода, доступным измерению // Электротехника, 1976, №11, с.50-54.
3. Коцегуб П.Х., Перепичаенко Е.К., Толочко О.И. Об использовании электронных моделей двигателя при построении систем управления вентильными приводами. – В кн. Электроэнергетика и автоматизация промышленных установок. - Донецк: ДПИ, 1974, с. 139-146.
4. Акимов Л.В., Долбня В.Г., Колотило В.И. Системы управления электроприводами постоянного тока с наблюдателями состояния // Харьков: ХГПУ. 1998. –117 с.
5. Коцегуб П.Х., Толочко О.И., Воронцов Д.В., Коломиец С.В. Упрощенный наблюдатель состояния систем подчиненного регулирования постоянного тока // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика, вып.4: Донецк: ДонГТУ, 1999, с.36-41.