

СИСТЕМА ПОДЧИНЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ С НАБЛЮДАТЕЛЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО И СТАТИЧЕСКОГО ТОКОВ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

**Толочко О.И., Коцегуб П.Х.,
Мариничев В. Ю., Розкаряка П.И.
Донецкий государственный технический университет**

Для того, чтобы сделать систему подчинённого регулирования (СПР) скорости астатической по нагрузке, обычно заменяют пропорциональный регулятор скорости (П-РС) пропорционально-интегральным (ПИ-РС). Более высокого качества переходных процессов в однозонных системах электропривода постоянного тока при отработке как управляющего, так и возмущающего воздействий можно добиться вводом дополнительной положительной обратной связи по статическому току I_C [1] или заменой обратной связи по полному току якорной цепи I обратной связью по его динамической составляющей I_j [2] при сохранении регулятором скорости П-структуры.

Сложность создания такой системы заключается в формировании сигнала обратной связи по динамическому или статическому току или моменту, так как в настоящее время не существует надежных промышленных датчиков этих физических величин. Для косвенного измерения динамического тока используют реальное дифференцирование выходного сигнала датчика скорости [2] или модель двигателя [3]. Существует также возможность оценки динамического тока при помощи наблюдателей состояния (НС) [4, 5].

В [4] рассмотрены всевозможные наблюдатели второго, третьего и четвертого порядка с управлением по сигналу задания на скорость и по ЭДС преобразователя и контролем (коррекцией) по скорости или по ЭДС двигателя. В [5] исследован НС третьего порядка с упрощенной структурой модели контура тока с управлением по выходному сигналу регулятора скорости и контролем по скорости двигателя.

Предложенная в [5] идея переноса точки съема сигнала, оценивающего динамический ток, с выхода аperiodического звена, моделирующего якорную цепь двигателя, на вход интегратора, моделирующего механическую часть привода, позволяет синтезировать наблюдатель динамического тока первого порядка с управлением по полному току якоря и контролем по скорости. На рисунке 1 изображена структурная схема СПР с этим НС в относительных единицах (о.е.). Относительные физические величины $\bar{y}$ представляют собой отношения соответствующих абсолютных величин y к их базовым значениям y_B :

$$\bar{y} = y / y_B. \quad (1)$$

Структурная схема на рис.1 пронормирована по следующим базовым значениям:

- скорость двигателя ω и ее оценка $\hat{\omega}$ – по скорости идеального холостого хода ω_0 ;
- ЭДС преобразователя E_P и двигателя E_D – по номинальному напряжению двигателя U_N ;
- полный, статический и динамический токи и моменты I , I_C , I_j и M , M_C , M_j и их оценки $\hat{I}_j$, $\hat{I}_C$ – внутри схемы по току и моменту короткого замыкания $I_{КЗ}$, $M_{КЗ}$:

$$\bar{I} = I / I_{КЗ}, \quad \bar{M} = M / M_{КЗ},$$

а на входах и выходах – по номинальным значениям I_N , M_N :

$$\bar{i} = I / I_N, \quad \bar{m} = M / M_N;$$

- напряжение управления преобразователем U_y – по сигналу U_N/k_P , где k_P – коэффициент усиления тиристорного преобразователя;
- напряжения заданий на ток и скорость $U_{зТ}$, $U_{зС}$ и напряжения соответствующих обратных связей U_T , U_C – по сигналам $k_T I_{КЗ}$ и $k_C \omega_0$ соответственно, где k_T , k_C – коэффициенты обратных связей по динамическому току или по его оценке и по скорости.

На схеме рис. 1 использованы также следующие обозначения:

T_J – электромагнитная постоянная времени якорной цепи ТП-Д;

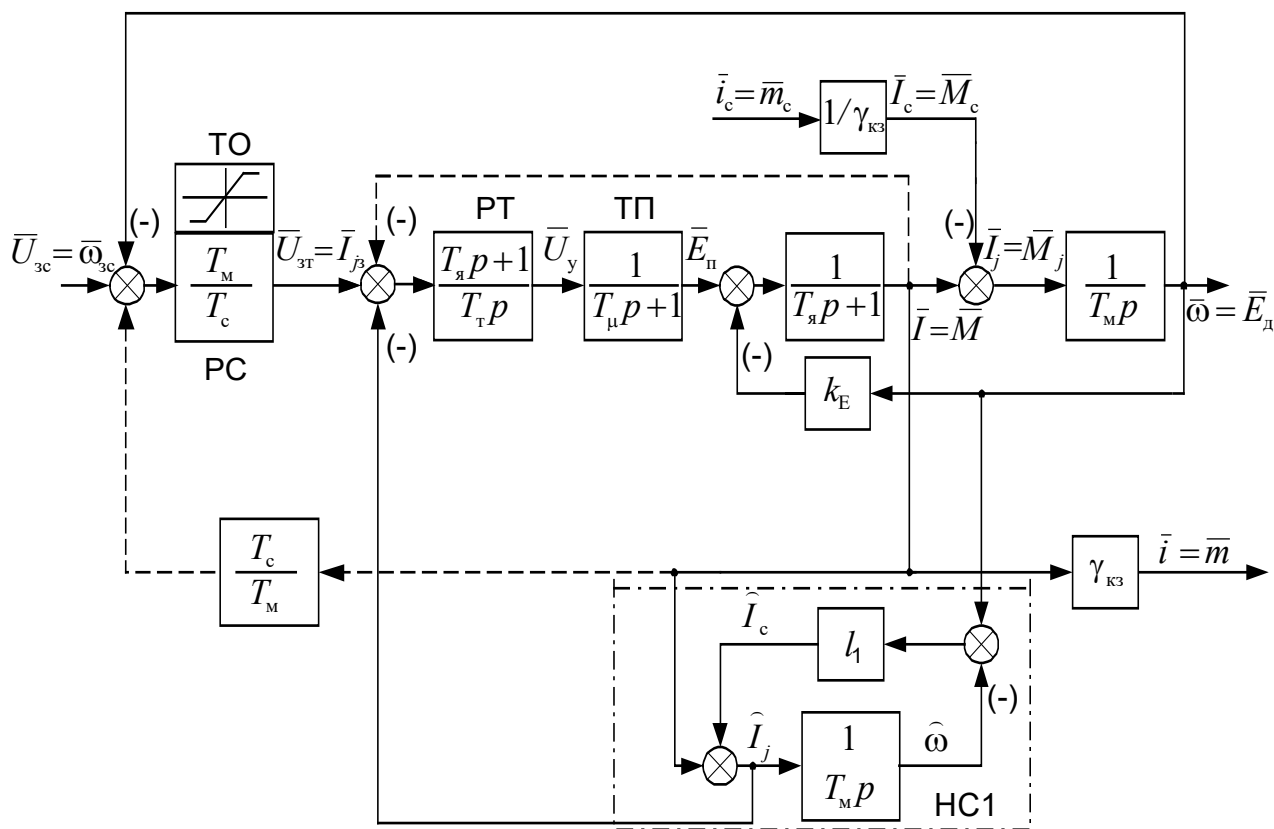
T_M – электромеханическая постоянная времени привода;

T_u – малая не компенсируемая постоянная времени контура тока, отнесенная к ТП;

T_T , T_C – постоянные времени интегрирования разомкнутых контуров динамического тока и скорости;

$\gamma_{КЗ} = M_{КЗ} / M_N = I_{КЗ} / I_N$ – 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).



Система состоит из электромеханической системы тиристорный преобразователь-двигатель (ТП-Д), ПИ-регулятора тока (РТ), П-РС с ограничением выходного сигнала ТО и наблюдателя состояния первого порядка НС1. Она может быть использована в двух вариантах:

В первом случае звено ТО выполняет функции ограничения динамического тока, а, следовательно, и ускорения привода, и система не нуждается в задатчике интенсивности (ЗИ). Переходные процессы при нарастании тока в пуско-тормозных режимах определяются динамическими свойствами контура тока, а при спадании – динамическими свойствами контура скорости. Для ограничения полного тока на уровне максимально допустимого значения I_{max} в этом варианте применяют либо токовую отсечку, либо структуру с дополнительным звеном «ограничение координат», включенным между РС и РТ, и дополнительными положительной и отрицательной обратными связями по току. Дополнительные обратные связи по току включены таким образом, что при $I < I_{max}$ в системе работает обратная связь по динамическому току, а при $I > I_{max}$ – по полному [5].

Характеристический полином рассматриваемого наблюдателя (назовем его НС1) имеет вид

откуда

где Ω_{0H} – среднегеометрический корень наблюдателя.

$$\hat{I}_C(p) = I(p) - \hat{I}_j(p) = \frac{1}{T_\Phi p + 1} I(p) - \frac{1}{T_\Phi p + 1} I_j(p) = \frac{I_C(p)}{T_\Phi p + 1}, \quad (4)$$

где

$$T_\Phi = 1/\Omega_{0H}. \quad (5)$$

Если к правой части формулы (3) прибавить и отнять от нее же правую часть уравнения (4), то получим

$$\hat{I}_j(p) = \frac{I_j(p)}{T_\Phi p + 1} + \frac{T_\Phi p I(p)}{T_\Phi p + 1} + \frac{I_C(p)}{T_\Phi p + 1} - \frac{I_C(p)}{T_\Phi p + 1} = \frac{I(p)}{T_\Phi p + 1} + \frac{T_\Phi p I(p)}{T_\Phi p + 1} - \frac{I_C(p)}{T_\Phi p + 1} = I(p) - \frac{I_C(p)}{T_\Phi p + 1}. \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что система с обратной связью по оценке динамического тока, формируемой при помощи предложенного наблюдателя состояния первого порядка, эквивалентна системе с отрицательной обратной связью по полному току двигателя и инерционной положительной обратной связью по статическому току.

Параметры регуляторов обычно выбираются из условий «модульного оптимума»:

$$T_T = 2T_\mu, \quad T_C = 2T_T = 4T_\mu. \quad (7)$$

Передаточные функции замкнутых контуров тока и скорости по управляющему воздействию не изменяются при замене обратной связи по динамическому току обратной связью по его оценке наблюдателем, если модель, положенная в основу НС, полностью совпадает с моделью идентифицируемой части объекта регулирования (ОР). При $k_E = 0$ они имеют вид:

$$K_{\text{крТу}}(p) = \frac{I(p)}{I_3(p)} = \frac{1}{G_T(p)} = \frac{1}{T_T T_\mu p^2 + T_T p + 1}, \quad (8)$$

$$K_{\text{крСу}}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_3(p)} = \frac{1}{G_C(p)} = \frac{1}{T_C T_T T_\mu p^3 + T_C T_T p^2 + T_C p + 1}. \quad (9)$$

Передаточные функции рассматриваемой системы по возмущающему воздействию при принятом допущении выглядят следующим образом:

$$\frac{I(p)}{I_C(p)} = \frac{(T_C + T_\Phi)p + 1}{(T_\Phi p + 1)(T_C T_T T_\mu p^3 + T_C T_T p^2 + T_C p + 1)}. \quad (10)$$

$$\frac{\Delta\omega(p)}{\Delta\omega_{\text{CP}}(p)} = -\frac{T_M}{T_C} \cdot \frac{T_T p(T_\mu p + 1) + T_\Phi p(T_T T_\mu p^2 + T_T p + 1)}{(T_\Phi p + 1)(T_C T_T T_\mu p^3 + T_C T_T p^2 + T_C p + 1)}, \quad (11)$$

где

$\Delta\omega$ – изменение скорости при набросе нагрузки;

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

$$\Delta\omega_{\text{CP}} = I_C R_\text{я} / c, \quad (12)$$

где

$R_\text{я}$ – активное сопротивление якорной цепи ТП-Д;

c – коэффициент пропорциональности между ЭДС и угловой скоростью двигателя.

Сравним систему с обратной связью по оценке динамического тока, получаемой при помощи наблюдателя НС1, с системой с инерционной обратной связью по динамическому току, получаемой при реальном дифференцировании сигнала обратной связи по скорости.

Такой выбор системы для сравнения обусловлен тем, что, как видно из (3), одной из составляющих оценки динамического тока в системе с НС1 является производная от скорости двигателя.

Из-за наличия инерционности в цепи обратной связи по динамическому току приходится увеличивать постоянную времени этого контура:

$$T_T = 2(T_\mu + T_\Phi). \quad (13)$$

Передаточные функции замкнутого контура скорости по управляющему и возмущающему воздействиям для этой системы имеют вид:

$$K_{\text{крСу}}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_3(p)} = \frac{T_\Phi p + 1}{T_C T_T T_\mu T_\Phi p^4 + T_C T_T (T_\mu + T_\Phi) p^3 + T_C T_T p^2 + (T_C + T_\Phi) p + 1}. \quad (14)$$

$$\frac{I(p)}{I_C(p)} = \frac{(T_C + T_\Phi)p + 1}{T_C T_T T_\mu T_\Phi p^4 + T_C T_T (T_\mu + T_\Phi) p^3 + T_C T_T p^2 + (T_C + T_\Phi) p + 1} \quad (15)$$

$$\frac{\Delta\omega(p)}{\Delta\omega_{CP}(p)} = -\frac{T_M}{T_C} \cdot \frac{T_T p [T_\Phi T_\mu p^2 + (T_\mu + T_\Phi)p + 1]}{T_C T_T T_\mu T_\Phi p^4 + T_C T_T (T_\mu + T_\Phi)p^3 + T_C T_T p^2 + (T_C + T_\Phi)p + 1}, \quad (16)$$

Из первого уравнения «модульного оптимума», составленного для передаточной функции (14) определим постоянную времени интегрирования контура скорости:

$$(T_C + T_\Phi)^2 - 2T_C T_T = T_\Phi^2,$$

откуда

$$T_C = 2(T_T - T_\Phi)$$

или после подстановки (12)

$$T_C = 2(2T_\mu + T_\Phi). \quad (17)$$

Как известно, переходные процессы по управляющему воздействию в системах автоматического управления (САУ), замкнутых через наблюдатели состояния, не отличаются от таковых при замыкании САУ по измеренным координатам, если модель, положенная в основу НС, полностью совпадает с моделью идентифицируемой части объекта регулирования (ОР).

Иначе обстоит дело с переходными процессами по не измеряемому возмущающему воздействию, каковым в данном случае является момент статического сопротивления на валу двигателя M_C , возникающий при нагрузке привода.

Переходные процессы тока и скорости в системе рис. 1 при скачкообразном изменении момента статического сопротивления приведены на рис. 2а.

Графики сняты без учета внутренней обратной связи по ЭДС двигателя ($k_E=0$) для трех значений среднегеометрического корня наблюдателя:

$$\Omega_{0H} = [1/2T_\mu, 1/T_\mu, 2/T_\mu] \quad (18)$$

или в соответствии с (5)

$$T_\Phi = [T_\mu / 2, T_\mu, 2T_\mu] \quad (19)$$

Учитывая, что среднегеометрический корень системы с обратной связью по собственному динамическому току при выполнении условия (7) составляет

$$\Omega_0 = \frac{1}{\sqrt[3]{T_C T_T T_\mu}} = \frac{1}{\sqrt[3]{8T_\mu^3}} = \frac{1}{2T_\mu}, \quad (20)$$

то

$$\Omega_{0H} / \Omega_0 = [1, 2, 4]. \quad (21)$$

На этом же рисунке приведены переходные функции СПР с П-РС и обратной связью по собственному динамическому току. Последняя система не может быть реализована на практике, но ее можно рассматривать как исследуемую САУ с НС при $\Omega_{0H} \rightarrow \infty$ ($T_\Phi \rightarrow 0$).

На рис.2б приведены аналогичные графики для системы с инерционной обратной связью по динамическому току.

На рис.2 обозначены

$\Delta\omega$ – изменение скорости при набросе нагрузки;

$\Delta\omega_C$ – статическое падение скорости при набросе нагрузки в однократно интегрирующей СПР с П-РС и ПИ-регулятором полного тока при выполнении условий (7):

$$\Delta\omega_C = \Delta\omega_{CP} \frac{4T_\mu}{T_M} = I_C \frac{R_\Delta}{c} \cdot \frac{4T_\mu}{T_M} \quad (22)$$

Основные показатели качества этих переходных процессов (перерегулирование по току σ , время первого согласования тока с установившимся значением t_c , время достижения током максимального значения t_m и максимальное падение скорости $\Delta\omega_{max}$) приведены в таблице 1. В последней колонке этой таблицы размещены для сравнения аналогичные показатели для СПР с ПИ-РС и обратной связью по полному току, настроенной на симметричный оптимум.

Из анализа приведенных графиков и данных таблицы 1 видно, что в обеих сравниваемых системах при выбранных настройках перерегулирование по току мало зависит от среднегеометрического корня наблюдателя и обратно пропорциональной ей постоянной времени фильтра в цепи дифференцирования скорости тахогенератора. В рассматриваемом диапазоне этих параметров оно изменяется от 50 до 55% и практически не отличается от перерегулирования в системе с ПИ-РС, настроенной на симметричный оптимум (54%). Это является положительным качеством обеих сравниваемых систем по отношению к системам с наблюдателями динамического тока более высоких порядков. Основное отличие анализируемых переходных процессов состоит в быстрейшем и величине динамического падения скорости. В обеих системах максимальное падение

скорости, время его достижения и время восстановления скорости возрастают при увеличении T_ϕ . Однако в системе с инерционной обратной связью по динамическому току эти показатели при прочих равных условиях оказываются выше, чем в системе с НС1. При $T_\phi=2T_\mu$ динамическое падение скорости в системе с инерционной обратной связью по динамическому току становится даже выше, чем в системе с ПИ-РС.

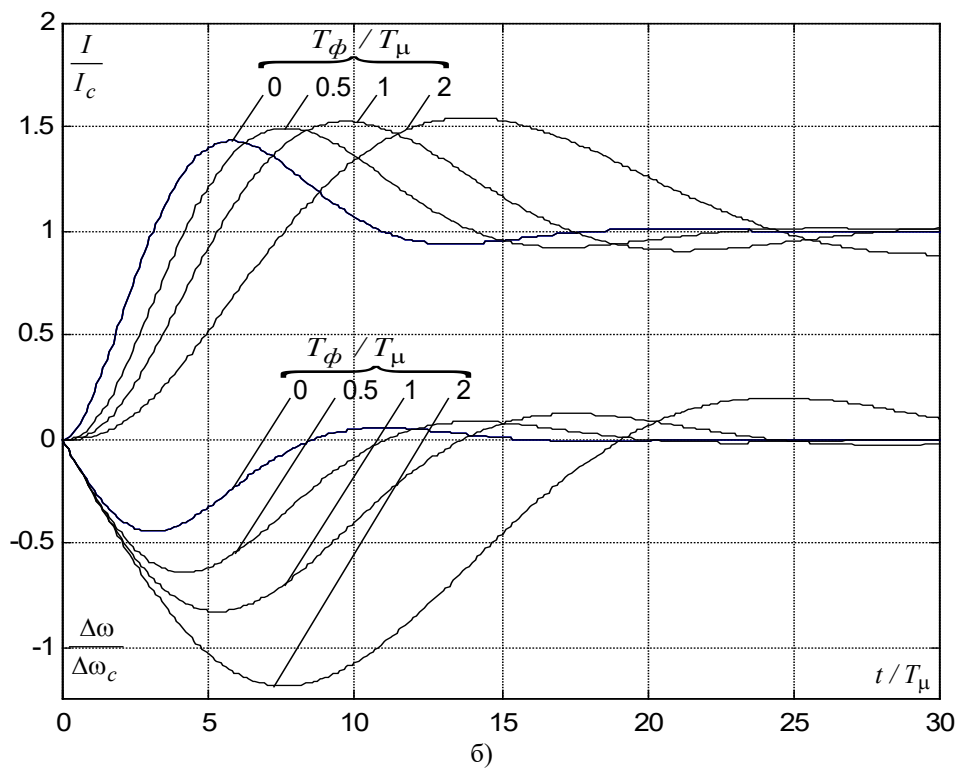
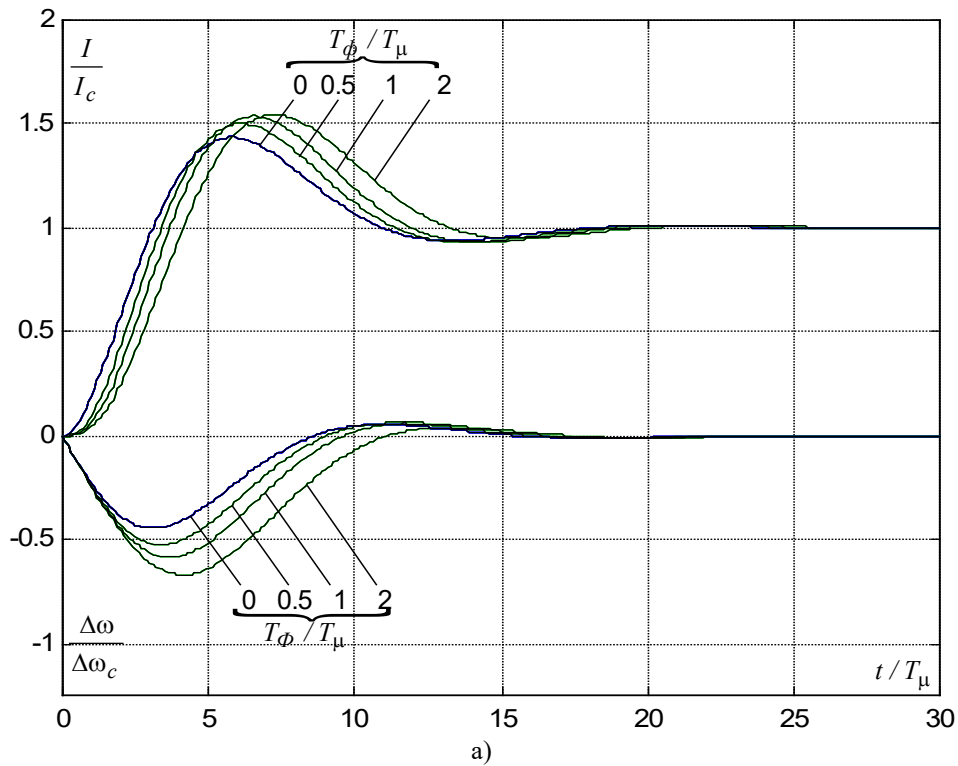


Рисунок 2 – Переходные процессы при скачкообразном изменении нагрузки
(а – в системе с НС1, б – в системе с инерционной обратной связью по динамическому току)

Таблица 1

$\frac{T_\phi}{T_\mu} = \frac{1}{\Omega_{0H} T_\mu}$	2		1		0.5		0	ПИ-РС
	а	б	а	б	а	б		
$\sigma, \%$	54.5	54.7	53.9	53	50.3	49.9	43.4	53.7
t_c / T_μ	4.1	7.6	3.7	5.3	3.4	4.2	3.1	5.9
t_M / T_μ	7.2	13.9	6.5	9.7	6.1	7.6	5.8	10.3
$\Delta\omega / \Delta\omega_c$	0.67	1.19	0.59	0.83	0.52	0.64	0.44	0.95

Для оценки качества переходных процессов в пуско-тормозных режимах на рис.3 представлены переходные функции контура тока (а) и контура скорости (б) по управляющему воздействию.

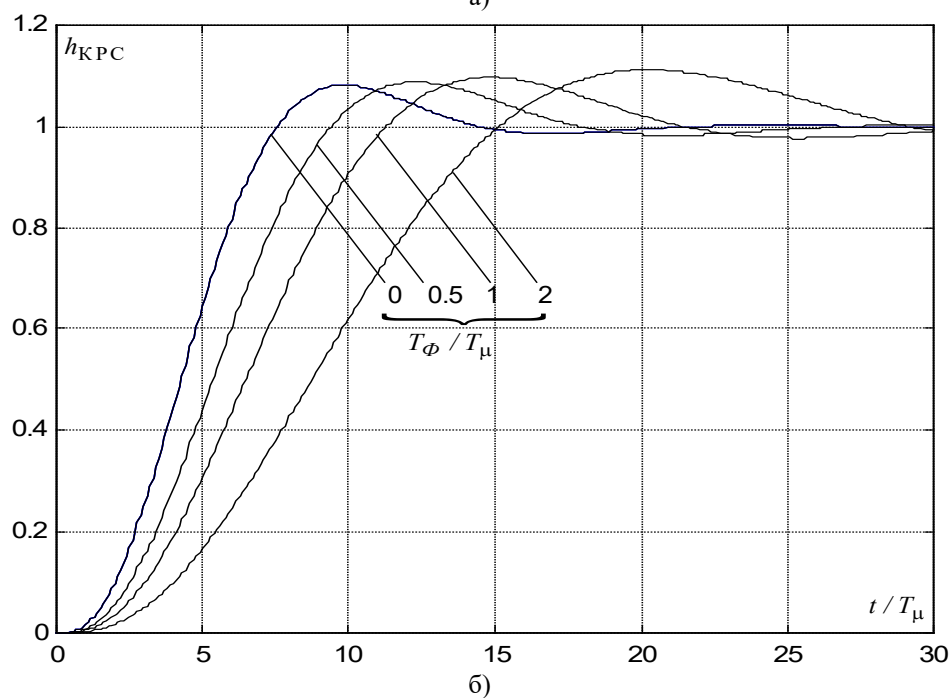
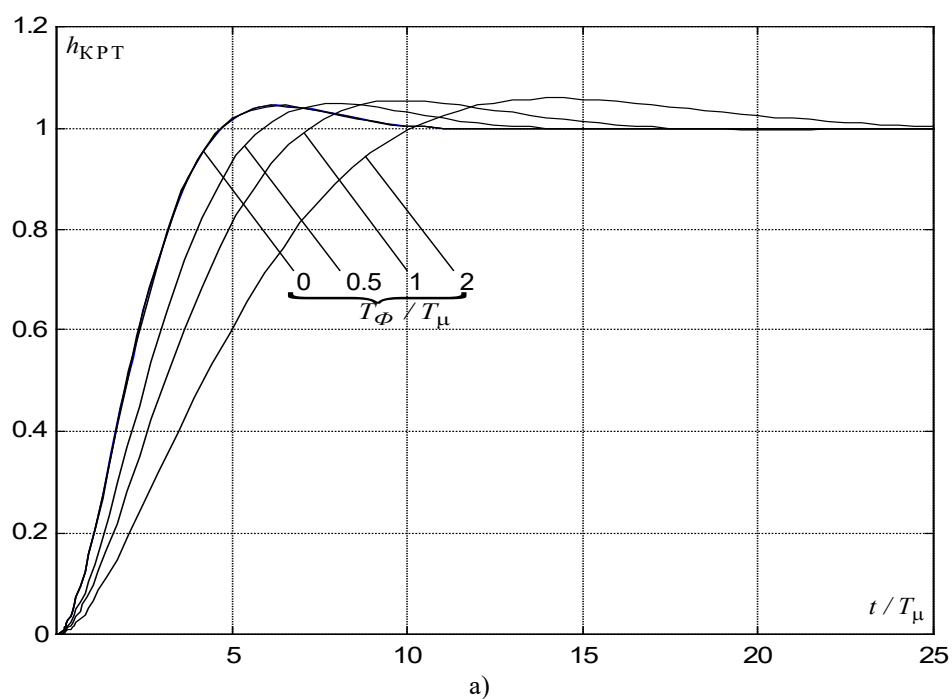


Рисунок 3 – Переходные характеристики (а – контура тока, б – контура скорости) по управляющему воздействию

Как уже отмечалось выше, переходные функции КРТ и КРС по управляющему воздействию в системе, замкнутой по оценке динамического тока, не зависят от величины T_ϕ и совпадают с переходными функциями системы с безинерционной обратной связью по динамическому току ($T_\phi=0$).

Их основные показатели имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} &\text{— для КРТ} \\ &\sigma = 4.3\%, \quad t_c = 4.7T_\mu, \quad t_m = 6.3T_\mu, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} &\text{— для КРС} \\ &\sigma = 8.1\%, \quad t_c = 7.6T_\mu, \quad t_m = 9.8T_\mu. \end{aligned} \quad (24)$$

Двукратноинтегрирующая СПР, настроенная на симметричный оптимум, имеет точно такие же показатели для КРТ, но имеет более низкое быстродействие КРС с фильтром на входе.

$$\sigma = 6.2\%, \quad t_c = 14.3T_\mu, \quad t_m = 18T_\mu. \quad (25)$$

Из рис. 3 видно, что переходные функции в системе с инерционной обратной связью по динамическому току существенно зависят от постоянной времени фильтра. При выбранной настройке регуляторов тока и скорости (см. уравнения (13) и (17)) с увеличением T_ϕ перерегулирование по току остается практически неизменным, но возрастает время первого согласования и время достижения максимума, характеризующие быстродействие системы при работе «под отсечку» ($h_{\text{КРТ}}$) и от ЗИ ($h_{\text{КРС}}$). При $T_\phi=2T_\mu$ они становятся даже выше, чем в двукратноинтегрирующей СПР (см. выражения (25)).

Выводы

1. Система с обратной связью по оценке динамического тока, формируемой при помощи предложенного наблюдателя состояния первого порядка, эквивалентна системе с отрицательной обратной связью по полному току двигателя и инерционной положительной обратной связью по статическому току.
2. Система с НС1 имеет более низкое динамическое падение скорости при набросе нагрузки, чем система с ПИ–РС и система с инерционной обратной связью по динамическому моменту, получаемой путем реального дифференцирования выходного сигнала тахогенератора, при мало отличающемся перерегулировании по току.
3. Система с НС1 характеризуется более высоким быстродействием по управляющему воздействию, чем система с ПИ–РС и система с инерционной обратной связью по динамическому току.
4. Предложенный наблюдатель состояния отличается простотой настройки и реализации и может быть использован как в приводах постоянного, так и (при некоторой доработке) в приводах переменного тока.

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.