

ПРИМЕНЕНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ, ОЦЕНИВАЮЩЕГО ДИНАМИЧЕСКИЙ ТОК, ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ С ИНЕРЦИОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СКОРОСТИ

Выходной сигнал тахогенератора (ТГ), используемого в аналоговых системах управления электроприводами в качестве датчика скорости, наряду с полезной составляющей, содержит помехи, среди которых можно выделить следующие гармонические сигналы:

- 1) оборотные пульсации, обусловленные эксцентриситетом и несоответствием осей вращения двигателя и тахогенератора, а также наличием люфтов в элементах соединений;
- 2) полюсные пульсации, обусловленные различием размеров и формы воздушного зазора под главными полюсами, а также изменением проводимости сердечника якоря в различных направлениях;
- 3) коллекторные пульсации, вызванные периодическим изменением числа секций в параллельных ветвях обмотки и вибрацией щеток вследствие неровности поверхности коллектора;
- 4) зубцовые пульсации, возникающие вследствие изменения магнитной проводимости зубцовой зоны при вращении якоря.

Частота и амплитуда пульсаций прямо пропорциональна измеряемой скорости, так что

$$\Delta\omega_{\text{ТГ}}(t) \approx \omega(t) \sum_{i=1}^n k_{\Delta\omega i} \sin[k_{\Omega i} \varphi(t)] = \omega(t) \sum_{i=1}^n k_{\Delta\omega i} \sin[\Omega_{\text{ТГ}i}(t)t], \quad (1)$$

где $k_{\Delta\omega i}$ – относительная амплитуда пульсаций, φ – угол поворота двигателя ($d\varphi/dt = \omega$), $k_{\Omega i}$ – коэффициент, определяющий частоту пульсаций $\Omega_{\text{ТГ}i}$.

Величина коэффициента $k_{\Omega i}$ зависит от типа пульсаций. Например, для оборотных пульсаций $k_{\Omega} = 1$, для полюсных $k_{\Omega} = 2p$ (p – число пар полюсов). Из выражения (1) видно, что при постоянной скорости двигателя $\omega(t) = \omega_{\text{уст}} = \text{const}$

$$\Omega_{\text{ТГ}i} = k_{\Omega i} \omega_{\text{уст}}, \quad (2)$$

а при линейном изменении скорости $\omega(t) = \varepsilon_0 t$

$$\Omega_{\text{ТГ}i}(t) = k_{\Omega i} \varepsilon_0 t / 2. \quad (3)$$

В замкнутых быстродействующих системах автоматического управления электроприводами постоянного тока пульсации напряжения тахогенератора многократно усиливаются и приводят к существенным колебаниям тока якоря, что ведет к дополнительному нагреву двигателя. Для сглаживания пульсаций на выходе ТГ устанавливают фильтр в виде апериодического звена с постоянной времени T_{ω} .

Рассмотрим двухконтурную однократноинтегрирующую систему подчиненного регулирования скорости (СПРС), структурная схема которой в относительных единицах представлена на рис. 1.

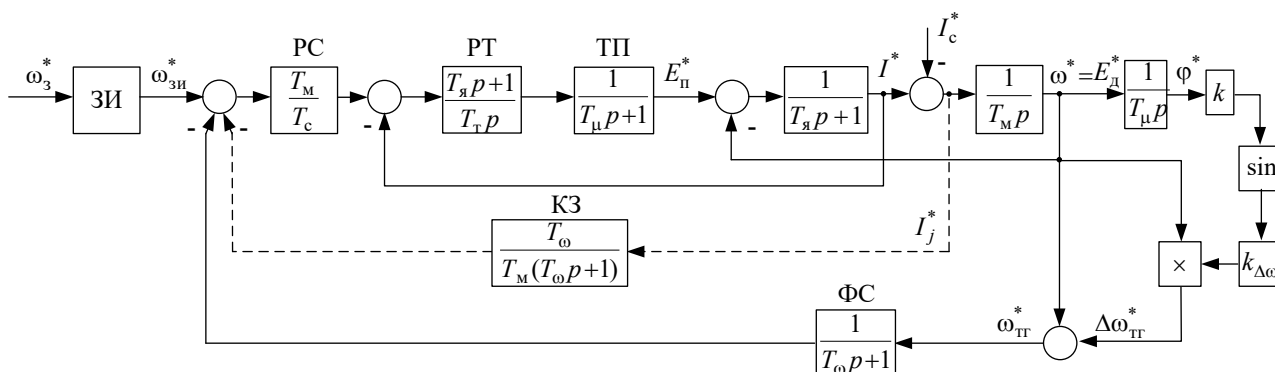


Рис. 1. Однократноинтегрирующая СПРС с фильтром на выходе тахогенератора и дополнительной обратной связью по динамическому току

На схеме введены следующие обозначения: $T_{\text{я}}$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи; $T_{\text{м}}$ – электромеханическая постоянная времени привода T_{μ} ; – постоянная времени тиристорного преобразователя (ТП); $T_{\text{с}}$, $T_{\text{т}}$ – постоянные времени интегрирования разомкнутых контуров скорости и тока. В качестве базовых величин сигналов приняты скорость идеального холостого хода ω_0 , номинальное напряжения якоря двигателя $U_{\text{н}}$, ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ и угол поворота двигателя за время T_{μ} при вращении его с постоянной угловой скоростью ω_0 ($\omega^* = \omega/\omega_0$, $I^* = I/I_{\text{кз}}$, $E^* = E/U_{\text{н}}$, $\varphi^* = \varphi/\omega_0 T_{\mu}$). Пульсации тахогенератора представлены одной составляющей уравнения (1). В соответствии с этим уравнением и принятой системой относительных единиц $k = k_{\Omega} \omega_0 T_{\mu}$.

На рис. 2а представлены переходные процессы (ПП) в системе рис.1 (без обратной связи, изображенной пунктиром) при разгоне от ЗИ вхолостую и при набросе номинальной нагрузки при идеальном измерении скорости (пунктир) и при наличии в выходном сигнале ТГ пульсаций, а на рис. 2б – те же ПП после включения в канал обратной связи по скорости фильтра ФЗ без изменения настройки системы.

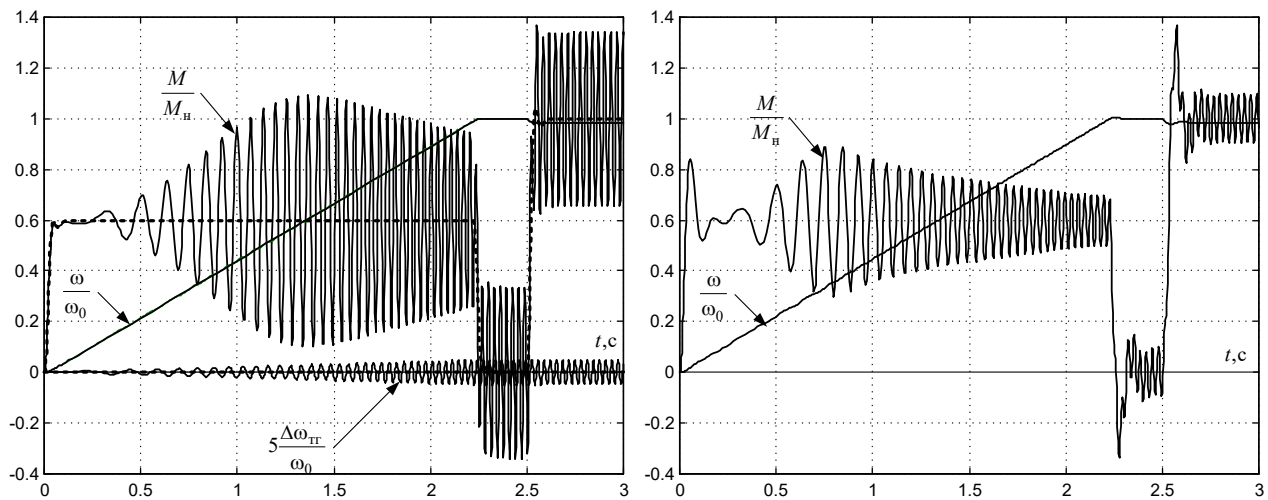


Рис. 2. ПП в СПРС рис.1 при $T_{\omega}=0$ (а) и при $T_{\omega}=3T_{\mu}$ (б) при одинаковой настройке системы ($T_{\text{с}}=2T_{\text{т}}$)

Математическое моделирование выполнено при следующих параметрах: $T_{\text{м}}=10,7T_{\mu}$; $T_{\text{я}}=3,4T_{\mu}$; $T_{\text{т}}=2T_{\mu}$; $T_{\text{с}}=2T_{\text{т}}$; $T_{\omega}=3T_{\mu}$; $k_{\Delta\omega}=0,01$, $k=1$.

Как видим, включение фильтра ФС в канал обратной связи (ОС) по скорости без изменения настройки системы, хотя и уменьшает амплитуду пульсаций, но и вызывает увеличение перерегулирования по току при разгоне привода от задатчика интенсивности (ЗИ) и при набросе нагрузки. Для ликвидации этого явления приходится снижать коэффициент усиления регулятора скорости (РС), что, в свою очередь, приводит к уменьшению быстродействия системы и к увеличению статического падения скорости при набросе нагрузки, как это показано на рис. 3 при $T_{\text{с}}=2(T_{\text{т}}+T_{\omega})$.

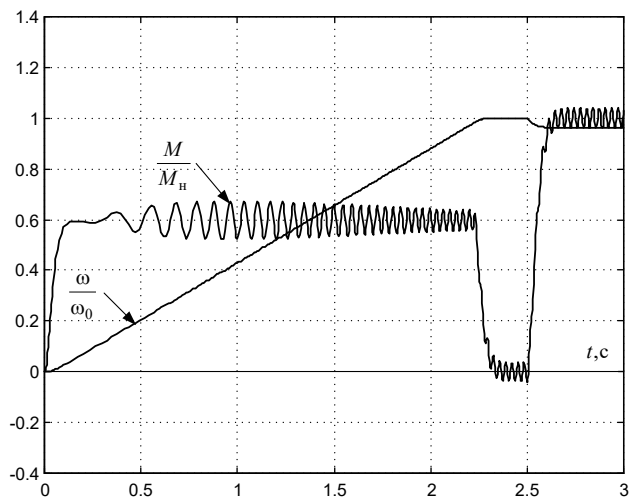


Рис. 3. ПП в СПРС рис. 1 при $T_{\omega}=3T_{\mu}$, $T_{\text{с}}=2(T_{\text{т}}+T_{\omega})$

В [1] предложено для уменьшения отрицательного влияния инерционности обратной связи по скорости на динамику привода заводить на вход РС через корректирующее звено КЗ дополнительную отрицательную обратную связь по динамической составляющей тока якоря I_j , показанную на рис. 1 пунктиром. Разделяя выходной сигнал ТГ $\omega_{\text{т}}$ на полезную составляющую ω и помеху $\Delta\omega_{\text{т}}$, можно показать, что ввод этой ОС компенсирует апериодическое звено в канале полезного сигнала и оставляет его без изменения в канале помехи. Структурная схема, иллюстрирующая действие предложенной ОС по динамическому току, полученная в результате структурных преобразований системы рис. 1, представлена на рис. 4.

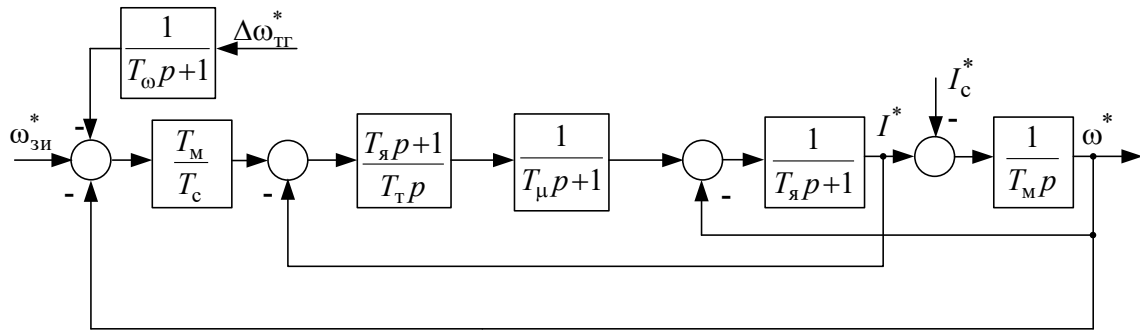


Рис. 4. Преобразованная структурная схема системы с компенсацией инерционности ОС по скорости при помощи дополнительной ОС по динамическому току

Основной проблемой при реализации данного способа компенсации инерционности в канале обратной связи по скорости является получение информации о динамическом токе или моменте двигателя ввиду отсутствия датчиков, измеряющих эти сигналы.

При решении этой задачи возможны следующие варианты: 1) реальное дифференцирование выходного сигнала тахогенератора; 2) замена обратной связи по динамическому току обратной связью по полному току; 3) использование моделей двигателя; 4) идентификация динамического тока при помощи наблюдателей состояния (НС).

Первый способ является самым точным, однако повышение уровня пульсаций при выполнении операции дифференцирования способно свести к нулю все усилия по подавлению помехи. Второй способ является самым простым, но он пригоден только при работе привода с малыми нагрузками или при небольших постоянных времени фильтра, или при невысоких требованиях к статизму системы, так как в этом случае статическое падение скорости при набросе нагрузки возрастает в $(T_c + T_ω)/T_c$ раз. Четвертый способ имеет по сравнению с третьим то преимущество, что НС представляют собой замкнутые модели, реагирующие на неравенство измеренных сигналов и их оценок, обусловленное несоответствием параметров и (или) начальных условий объекта регулирования (ОР) и его модели, положенной в основу НС, а также воздействием на ОР неизмеряемых возмущений.

Рассмотрим возможность использования с указанной выше целью предложенного в [2] наблюдателя второго порядка, восстанавливающего динамический ток. Его структурная схема изображена на рис. 5. В качестве управляющего сигнала в нем использован ток якорной цепи, а в качестве корректирующего сигнала – скорость напряжения датчика ЭДС двигателя, измеряемого при помощи датчика ЭДС (ДЭ) с постоянной времени апериодического звена, равной электромагнитной постоянной времени двигателя $T_{яд}$.

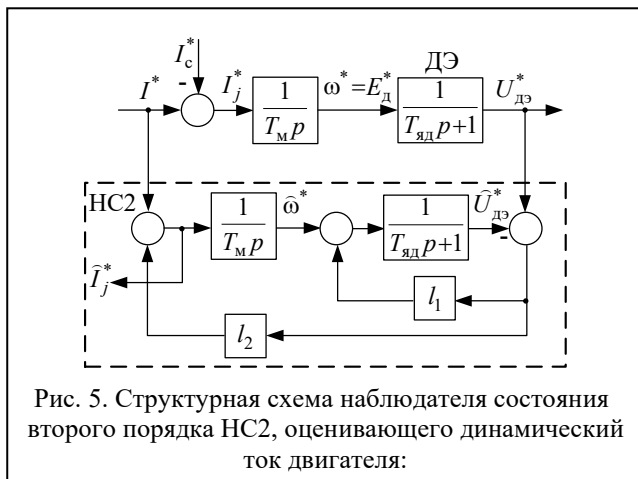


Рис. 5. Структурная схема наблюдателя состояния второго порядка НС2, оценивающего динамический ток двигателя:

по оценке динамического тока, полученной при помощи наблюдателя состояния НС2 (в). Графики получены при $T_c = 2T_т$, $T_ω = 10T_μ$, $Ω_{0н} = 1/T_μ$, $α = \sqrt{2}$, $T_{яд} = 5T_μ$.

При наличии дополнительных корректирующих обратных связей отпадает необходимость в увеличении постоянной времени интегрирования разомкнутого КРС, однако возникает необходимость в увеличении постоянной времени фильтра в цепях обратных связей. Эта постоянная в данном случае увеличена до такого значения, которое позволило добиться примерно такого же уровня пульсаций тока, как в системе с «загруженным» КРС (графики рис. 3).

Коэффициенты корректирующих связей НС рассчитываются по формулам

$$\begin{cases} l_1 = T_{яд} α Ω_{0н} - 1, \\ l_2 = T_{яд} T_M Ω_{0н}^2, \end{cases}$$

где $Ω_{0н}$, $α$ – среднегеометрические корни (СГК) и коэффициент желаемого характеристического полинома

$$G_{2ж}(p) = p^2 + α Ω_{0н2} p + Ω_{0н2}^2.$$

На рис. 6 приведены переходные процессы в системе рис.1 с дополнительной ОС по динамическому току в предположении возможности идеального измерения этого сигнала (а), с заменой ее обратной связью по полному току (б) и при замене ее обратной связью

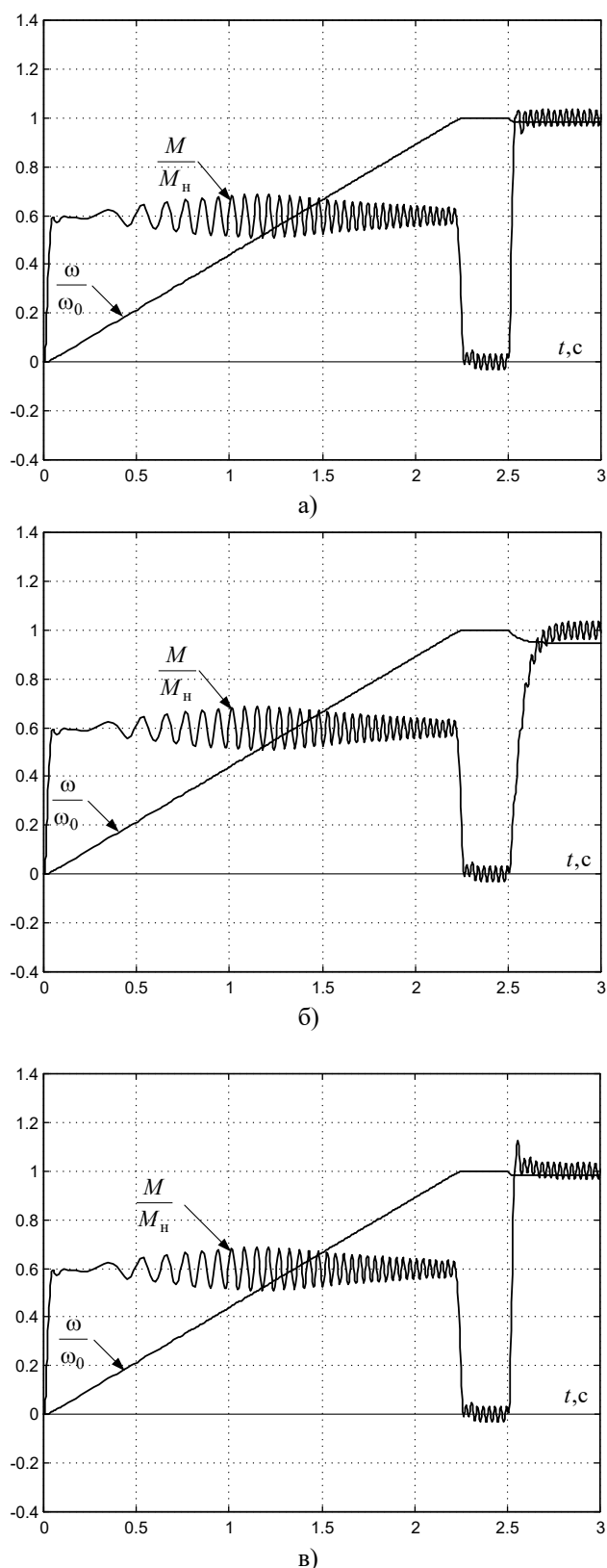


Рис. 6. Переходные процессы в СПРС рис. 1 при

$$T_c = 2T_r, T_\omega = 10T_\mu:$$

- а – дополнительная ОС по динамическому току;
 б – дополнительная ОС по полному току;
 в – дополнительная ОС по оценке динамического тока

Из сравнения графиков рис. 6, рис. 2 и рис. 3 видно, что при использовании для оценки динамического тока в системе рис. 1 наблюдателя состояния, представленного на рис. 5, удается существенно уменьшить амплитуду пульсаций тока якоря без снижения быстродействия привода и без увеличения перерегулирования по току при отработке управляющего воздействия и статической просадки скорости при набросе нагрузки. Некоторое возрастание перерегулирования по току при отработке возмущающего воздействия связано с инерционностью наблюдателя, зависящей от величины его SGK.

Следует отметить, что применение дополнительной обратной связи по идентифицированному динамическому току эффективно не только в рассмотренной в данной статье однократноинтегрирующей СПРС, но и в любых системах электропривода с тахогенератором.

Выводы

1. Системы электропривода с тахогенератором, используемым в качестве датчика скорости, при наличии в его выходном сигнале пульсаций целесообразно дополнять отрицательной инерционной обратной связью по динамическому току, введенной на вход регулятора скорости.
2. Системы электропривода с дополнительной ОС динамическому току при включении фильтра на выходе ТГ не нуждаются в увеличении постоянной времени интегрирования разомкнутого КРС. Они фильтруют только помеху, оставляя ОС по полезному сигналу безынерционной.
3. Для оценки динамического тока можно использовать наблюдатель состояния второго порядка с управлением по току якоря и коррекцией по выходному сигналу инерционного датчика ЭДС.
4. При замене дополнительной ОС по динамическому току обратной связью по полному току якоря переходные процессы по управляющему воздействию остаются без изменения, а ПП при набросе нагрузки затягиваются, что сопровождается увеличением статической просадки скорости в $(T_c + T_\omega)/T_c$ раз. Эти особенности позволяют рекомендовать такую систему для электроприводов, работающих в напряженном повторно-кратковременном режиме с малыми моментами статического сопротивления.

Литература

1. Устройство для управления электроприводом постоянного тока: А.с. 936320. СССР, МКИ Н 02 Р 5/06 / П.Х. Коцегуб, А.В. Светличный, О.И. Толочко; Заявлено 29.10.80; Опубл. 15.06.82, Бюл. №22. – 3 с.
2. Толочко О.И., Пісковатська О.В., Кудокотцев С.М. Системи непрямого регулювання швидкості зі спостерігачами стану // Наукові праці ДонНТУ. Серія "Електротехніка і енергетика". – Донецьк: ДонНТУ. – 2003. – №67. – С. 168-173.