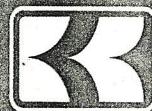


ВІСНИК
КРЕМЕНЧУЦЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО
ПОЛІТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ

Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету

Випуск 1/2002 (12)



ЦИФРОВЫЕ НАБЛЮДАТЕЛИ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ С ПРЯМЫМ ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Коцегуб П.Х., Губарь Ю.В.,
 Толочко О.И., Мариничев В.Ю.
 Донецкий национальный технический университет

Одним из способов достижения в системах подчинённого регулирования (СПР) нулевого статического падения скорости при набросе нагрузки является дополнение однократноинтегрирующей СПР компенсирующей обратной связью по статическому моменту. При таком решении задачи полученная система имеет более высокие показатели качества переходных процессов (как по управляющему, так и по возмущающим воздействиям), чем традиционная двукратно интегрирующая СПР.

Для реализации такого решения в СПР с двигателями постоянного тока независимого возбуждения, питаемыми от управляемых вентильных преобразователей, предложен ряд наблюдателей состояния, восстанавливающих динамическую составляющую тока. Наблюдатели состояния (НС) отличаются друг от друга, в основном, точкой съёма управляющего воздействия. Коррекция переменных НС осуществляется по разности реальной и выделенной при помощи наблюдателя скорости вращения двигателя. Так, например, в [1] предложен НС с управлением по сигналу заданной скорости, который трансформировался в НС с управлением по выходному сигналу регулятора скорости с учётом [1] и без учёта [2] против ЭДС двигателя. Стремление понизить порядок НС и коэффициенты его корректирующих связей привело к разработке НС второго порядка с управлением по ЭДС преобразователя [1] и, наконец, первого порядка с управлением по току якоря двигателя [3]. Чем меньше порядок НС, тем меньшее количество параметров объекта управления необходимо знать для его построения, тем меньшее количество обратных связей имеет НС и тем меньшие значения имеют их коэффициенты передачи (при большом порядке НС некоторые коэффициенты передачи обратных связей НС достигают не реализуемых значений). В этой связи более перспективным является применение наблюдателей низкого порядка.

Эффективность восстановления статического и динамического тока в системах с прямым цифровым управлением показана в [4], где рассмотрены цифровые наблюдатели состояния (ЦНС) с управлением от выходного сигнала регулятора скорости и контролем по мгновенному и среднему за период квантования T значениям скорости. При этом ЦНС описывались разностными управлениями второго и третьего порядков.

В настоящей статье обсуждается вопрос снижения порядка и повышения точности восстановления динамической и статической составляющих тока за счёт переноса точки съёма управляющего сигнала на выход цифрового датчика тока (ЦДТ) якоря двигателя.

Взаимосвязь между средним значением тока якоря двигателя $I_{CP}(nT)$ и его скоростью вращения $\omega(nT)$ при отсутствии нагрузки устанавливается следующей дискретной передаточной функцией

$$\frac{\omega(z)}{I_{CP}(z)} = \frac{c \cdot Tz}{J \cdot z - 1}, \quad (1)$$

где c – конструктивная постоянная двигателя; J – момент инерции привода, приведенный к валу двигателя.

При малом периоде квантования T среднее значение скорости вращения двигателя $\omega_{CP}(nT)$ может быть принято как средне-арифметическое значение мгновенных скоростей ω на n -ом и $n-1$ -ом такте:

$$\omega_{CP}(nT) = \frac{1}{2} \cdot (\omega(nT) + \omega(nT - 1T)), \quad (2)$$

что соответствует следующей передаточной функции

$$\frac{\omega_{CP}(z)}{\omega(z)} = \frac{z + 1}{2z}. \quad (3)$$

Будем считать, что с достаточной степенью точности ток статической нагрузки $I_C(t)$ может быть представлен в виде кусочно-постоянного сигнала, амплитуда которого на участке времени $nT \leq t < nT + 1T$ равна значению реального сигнала $I_C(t)$ в дискретные моменты времени $t = nT$. Для выделения такого сигнала на входе силовой части двигателя по каналу нагрузки установим идеальный импульсный элемент и экстраполятор нулевого порядка, как это показано на рис. 1.

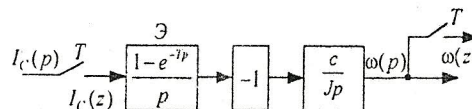


Рисунок 1 Структурная схема канала нагрузки двигателя

Тогда передаточная функция силовой части двигателя от тока статической нагрузки $I_C(z)$ до скорости $\omega(z)$ равна

$$\frac{\omega(z)}{I_C(z)} = -\frac{z-1}{z} \cdot Z \left\{ \frac{c}{Jp^2} \right\} =$$

$$= -\frac{c}{J} \cdot \frac{T}{z-1} = -\frac{1}{z} \cdot \frac{c}{J} \cdot \frac{Tz}{z-1}$$

В соответствии с передаточными функциями (1), (3) и (4) получаем структурную схему силовой части двигателя, представленную на рис. 2.

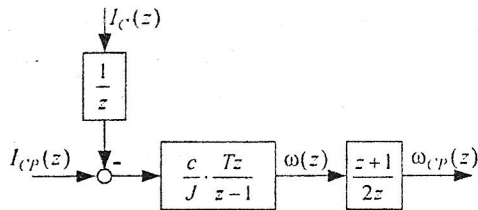


Рисунок 2 Структурная схема силовой части двигателя

При работе системы с прямым цифровым управлением среднее значение тока $I_{CP}(nT)$ измеряется, и оно может быть использовано в качестве управляющего сигнала НС. Тогда структуры наблюдателей состояния для систем с измерением мгновенного и среднего значений скорости при наличии нагрузки имеют вид, представленный на рис. 3. Задержки на такт по каналу обратных связей в наблюдателях введены для ликвидации алгебраических петель.

Наблюдатель состояния с контролем по мгновенному значению скорости

Если положить, что нагрузка равна нулю, а начальное значение реальной скорости не совпадает с восстановленным значением $\hat{\omega}(nT)$, то уже через один период повторения имеет место их равенство. Это можно установить по передаточной функции

$$\frac{\hat{\omega}(z)}{\omega(z)} = \frac{1}{z} \quad (5)$$

В связи с тем, что характеристический полином наблюдателя $G(z) = z$ в нём реализуется максимально возможное быстродействие, соответствующее процессам конечной длительности в цифровых системах первого порядка.

Так как в канале обратной связи наблюдателя имеется звено с задержкой на такт, то в качестве восстановленного значения тока статической нагрузки $\hat{I}_C(nT)$ будем считать сигнал, имеющий место не на выходе звена с запаздыванием (задержкой), а на его входе. Передаточная функция от тока статической нагрузки до восстановленного его значения равна:

$$\frac{\hat{I}_C(z)}{I_C(z)} = \frac{1}{z} \quad (6)$$

что также свидетельствует о том, что уже через один такт восстановленный ток статической нагрузки совпадает с реальным значением.

Что касается динамической составляющей среднего тока, то её определение лучше осуществлять путём вычитания из среднего тока $I_{CP}(nT)$ восстановленного тока статической нагрузки $\hat{I}_C(nT)$. При этом восстановленное значение динамического тока

$$\hat{I}_J(nT) = I_{CP}(nT) - \hat{I}_C(nT) = I_J(nT) + \nabla I_C(nT) \quad (7)$$

отличается от реального значения $I_J(nT) = I_{CP}(nT) - I_C(nT)$ составляющей, зависящей от первой обратной разности статического тока $\nabla I_C(nT) = I_C(nT) - I_C(nT - 1T)$.

При скачкообразном изменении нагрузки $I_C(t) = I_C, t \geq 0$ эта составляющая исчезает через один период квантования (см. графики на рис. 4а, б).

Наблюдатель состояния с контролем координат по среднему значению скорости

Передаточные функции от реальных координат двигателя $\omega_{CP}(z), \omega(z)$ до их восстановленных значений $\hat{\omega}_{CP}(z)$ и $\hat{\omega}(z)$ совпадают с передаточной функцией от тока статической нагрузки $I_C(z)$ до восстановленного тока $\hat{I}_C(z)$. Они равны

$$\frac{\hat{\omega}_{CP}(z)}{\omega_{CP}(z)} = \frac{\hat{\omega}(z)}{\omega(z)} = \frac{\hat{I}_C(z)}{I_C(z)} =$$

$$= \frac{l_2(z+1)}{z^2 - (1-l_2-l_1)z + l_2 - l_1} = \frac{H(z)}{G(z)} \quad (8)$$

Характеристический полином наблюдателя состояния $G(z)$ выбирают равным полиному

$$G_{Ж}(z) = z^2 - a_{1Ж}z + a_{0Ж},$$

обеспечивающему желаемое распределение полюсов передаточной функции.

Не останавливаясь специально на выборе желаемого полинома $G_{Ж}(z)$, отметим, что максимальное быстродействие наблюдателя достигается при $G_{Ж}(z) = z^2$. В наблюдателе при этом протекают процессы конечной длительности. Характеристический полином $G_{Ж}(z) = z^2$ имеет место при $l_1 = l_2 = 1/2$. Передаточные функции (8) при этом переписываются в виде

$$\frac{\hat{\omega}_{CP}(z)}{\omega_{CP}(z)} = \frac{\hat{\omega}(z)}{\omega(z)} = \frac{\hat{I}_C(z)}{I_C(z)} = \frac{z+1}{2z^2} \quad (9)$$

При скачкообразном изменении тока статической нагрузки $I_C(t) = I_C, t \geq 0$ изображение

$I_C(z) = I_C \frac{z}{z-1}$, а изображение восстановленного

$$\hat{I}_C(z) = \frac{z+1}{2z^2} \cdot \frac{z}{z-1} I_C = \frac{z+1}{2z(z-1)} I_C =$$

тока

$$= \frac{1}{2} I_C z^{-1} + 1 I_C z^{-2} + 1 I_C z^{-3} + \dots \quad (10)$$

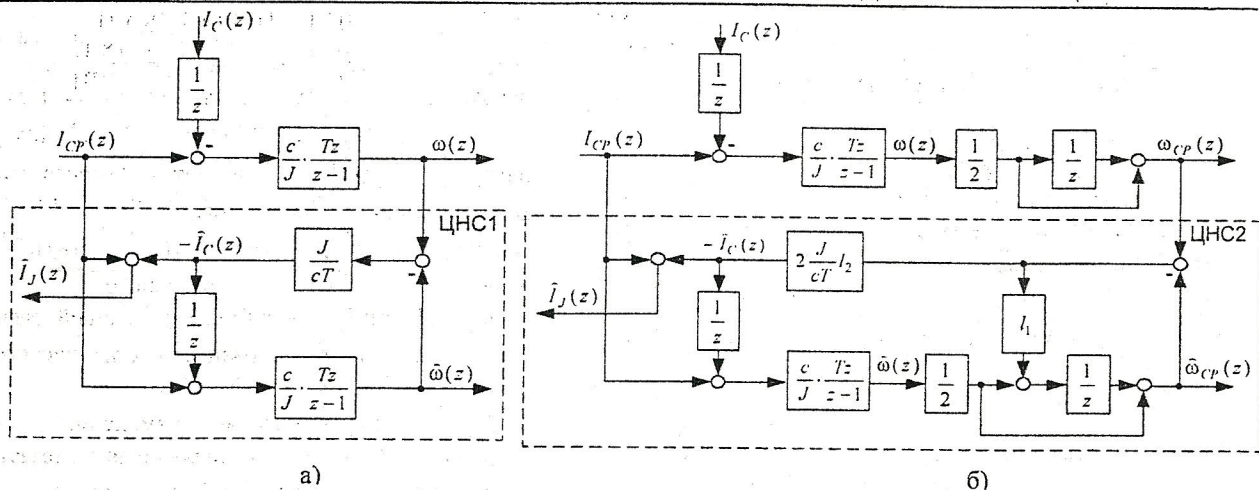


Рисунок 3 Структурные схемы наблюдателей состояния (а) – для систем с датчиком мгновенного значения скорости, ЦНС1, (б) – для систем с датчиком среднего значения скорости, ЦНС2

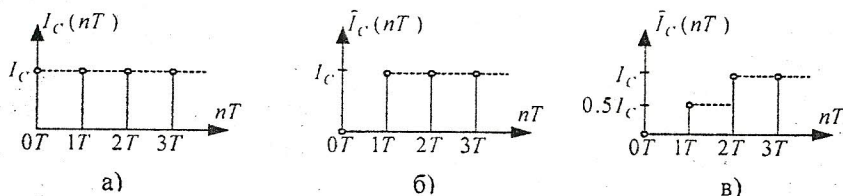


Рисунок 4 Графики изменения $I_C(nT)$ при скачкообразном изменении нагрузки (а) и $\hat{I}_C(nT)$ в наблюдателях состояния с контролем по мгновенному (б) и среднему (в) значениям скорости

В соответствии с последним выражением

$$\hat{I}_C(nT) = \begin{cases} 0, & n=0 \\ \frac{1}{2}I_C, & n=1 \\ I_C, & n \geq 2 \end{cases} \quad (11)$$

то есть восстановление тока заканчивается за два периода квантования так, как показано на рис. 4, в.

Аналогичным образом протекают и процессы восстановления скорости $\hat{\omega}(nT)$ и её среднего значения $\hat{\omega}_{CP}(nT)$, когда нагрузка равна нулю, а начальные значения рассмотренных координат не совпадают с реальными ($\omega(0T)$ и $\omega_{CP}(0T)$).

Изображение восстановленного значения динамической составляющей тока

$$\hat{I}_J(z) = I_{CP}(z) - \hat{I}_C(z) \quad (12)$$

с учётом (14) и того, что изображение реального значения динамической составляющей тока равно

$$I_J(z) = I_{CP}(z) - I_C(z), \quad (13)$$

приобретает вид

$$\hat{I}_J(z) = I_J(z) + (1 - 0.5z^{-1} - 0.5z^{-2})I_C(z). \quad (14)$$

Из последнего выражения видно, что восстановленное значение динамического тока

$$\hat{I}_J(nT) = I_J(nT) + I_C(nT) - 0.5I_C(nT-1T) - 0.5I_C(nT-2T) \quad (15)$$

как и в НС с контролем по мгновенному значению скорости имеет составляющую, зависящую от нагрузки.

Однако при скачкообразном изменении последней эта составляющая исчезает через два периода квантования.

Необходимо подчеркнуть важную особенность предлагаемых здесь наблюдателей, состоящую в том, что при наличии нагрузки установившиеся значения восстановленных скоростей $\hat{\omega}(nT)$ и $\hat{\omega}_{CP}(nT)$ несколько отличаются от установившихся значений реальных координат $\omega(nT)$ и $\omega_{CP}(nT)$. Последнее происходит из-за того, что наблюдатели состояния синтезированы в предположении, что статическая нагрузка отсутствует.

Рассмотренные в [4] наблюдатели, в отличие от предложенных в настоящей статье, позволяют выделить не только динамическую и статическую составляющие тока, но и упреждённые на такт значения скорости и динамического тока, которые одновременно могут быть использованы для компенсации запаздывания в контурах регулирования тока и скорости. Они также позволяют осуществить замыкание системы по мгновенному значению скорости при измерении его среднего значения, что способствует улучшению динамических свойств системы электропривода.

Недостатком этих наблюдателей является необходимость иметь информацию о настройке контура регулирования тока.

Однако решение о целесообразности применения тех или иных наблюдателей требует дополнительных исследований, касающихся

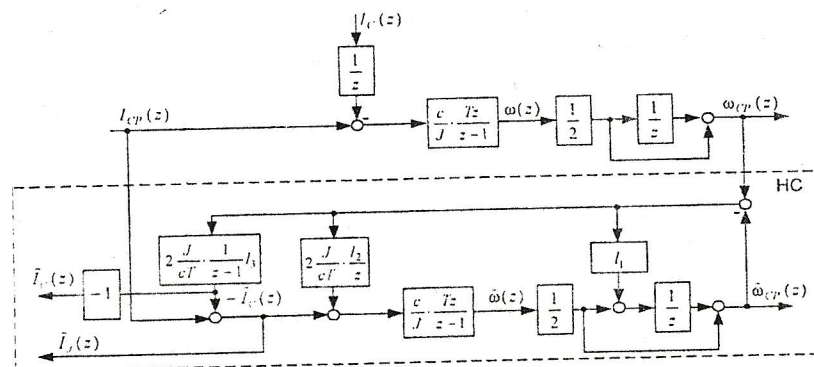


Рисунок 5 Структурная схема цифрового наблюдателя состояния с дополнительным интегратором

динамических свойств систем управления с предлагаемыми наблюдателями и чувствительности этих систем к изменению их параметров.

Здесь только отметим, что компенсация влияния возможного запаздывания в контурах регулирования может быть реализована известными методами, не требующими применения наблюдателей состояния [5], а восстановление мгновенного значения скорости при измерении последней с помощью датчика среднего значения может быть возложено на наблюдатель, синтезированный при условии, что постоянное возмущение (нагрузка) входит в уравнение объекта относительно переменных состояния, подлежащих восстановлению [6]. Применяв эту идею к предложенному здесь наблюдателю при измерении среднего значения скорости, получим наблюдатель состояния, структурная схема которого представлена на рис. 5.

Передаточная функция наблюдателя от тока статической нагрузки $I_C(z)$ до восстановленного значения $\hat{I}_C(z)$ равна

$$W_f(z) = \frac{\hat{I}_C(z)}{I_C(z)} = \frac{(z+1)l_3}{z^3 - (2-l_1-l_2-l_3)z^2 + (1-2l_1+l_3)z - (l_2-l_1)} \quad (16)$$

Учитывая, что $W_f(1)=1$, приходим к выводу, что в установившемся режиме изменения нагрузки восстановленное значение статического тока совпадает с реальным значением.

Постоянный сигнал интегратора, на выходе которого формируется восстановленное значение статического тока, возможен только тогда, когда сигнал на его входе равен нулю. Это свидетельствует о том, что установившиеся восстановленные значения как средней $\bar{\omega}_{cp}(нТ)$, так и мгновенной $\hat{\omega}(нТ)$ скоростей совпадают с реальными значениями скорости и могут быть использованы в качестве сигналов обратной связи.

Однако последнее достигнуто за счёт повышения на единицу порядка наблюдателя, что несколько ухудшает его динамические свойства.

Выводы

1. Для улучшения динамических и статических свойств систем электропривода с прямым цифровым управлением предложены цифровые наблюдатели состояния, обладающие минимально возможным порядком и требующие при их реализации минимальной информации об идентифицируемом объекте.

2. Для окончательного решения вопроса об области применения рассмотренных наблюдателей требуется выполнение исследований, касающихся динамических свойств систем электропривода с этими и известными наблюдателями состояния, и чувствительности НС к изменению параметров системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л.В. Акимов, В.Т. Долбня, В.И. Колотило. Системы управления электроприводами постоянного тока с наблюдателями состояния. — Харьков, ХГПУ, 1998. — 117 с.
2. 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, выпуск 4: Донецк: ДонГТУ, с. 36 – 41.
3. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Мариничев В.Ю., Розкаряка П.И. Система подчиненного регулирования скорости с наблюдателем динамического и статического токов первого порядка. Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. Вып. 1/2001 (10) — Кременчуг: КГПУ, 2001, с. 103 – 109.
4. Коцегуб П.Х., Губарь Ю.В., Толочко О.И., Мариничев В.Ю. Особенности построения и исследование цифровых систем регулирования скорости электроприводов с наблюдателями состояния. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сборник научных трудов. Тематический выпуск 113. — Харьков, ХГПУ, 2000, с. 74 – 77.
5. Файнштейн В.Г., Файнштейн Э.Г. Микропроцессорные системы управления тиристорными электроприводами. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 240 с.