УДК 621.34: 62-50

Микропроцессорная реализация наблюдателей состояния и нагрузки для электромеханотронных модулей

Колганов А.Р., д-р техн. наук, Лебедев С.К., Гнездов Н.Е., кандидаты техн. наук

Предложена методика расчета предельно достижимой динамики наблюдателей при их реализации в микропроцессорной системе управления, выполняющей расчеты в числах с фиксированной точкой без переполнения переменных. Для наблюдателей полного, с астатизмом первого и второго порядков определены максимальные значения полос пропускания. Приведено описание экспериментальной установки и программного обеспечения.

Ключевые слова: электромеханотронные модули и системы, электропривод, наблюдатель состояния, микропроцессор.

Microprocessor Implementation of State and Load Observers for Electromechanotronic Modules

A.R. Kolganov, Doctor of Engineering, S.K. Lebedev, N.E. Gnezdov, Candidates of Engineering

The authors suggest a calculation method of ultimate realizable dynamics of observers during their realization in microprocessor control system which calculates in numbers with fixed point without overflowing of variables. Maximum values of pass bands are defined for observers of first and second order astatism. The description of experimental installation and software is given.

Key words: electromechanotronic modules and systems, electric drive, state observer, microprocessor.

Одной из проблем при создании энергосберегающих электромеханотронных модулей и систем является обеспечение «информационной прозрачности» объекта управления. Решение этой задачи может быть получено либо за счет применения многочисленных датчиков (преобразователей физических величин в электрические сигналы), либо за счет использования устройств косвенного вычисления переменных, к которым относятся и наблюдатели состояния.

Обеспечению «информационной прозрачности» с помощью датчиков препятствуют следующие факторы:

- конструктивные и технико-экономические ограничения на применение датчиков (ограничение габаритов и веса системы, высокие затраты на приобретение, установку и обслуживание датчиков);
- принципиальная невозможность измерения ряда важных переменных с помощью датчиков (приведенные механические нагрузки, эквивалентные упруго-вязкие моменты и т. д.);
- внесение датчиками недопустимых статических и динамических погрешностей.

Наблюдатели состояния позволяют получить информацию о состоянии объекта и возмущениях по доступной входной и выходной информации, а также по параметрам его математической модели [1].

Существенный импульс к расширению использования наблюдателей в электромеханотронных системах, в частности в быстродействующих системах электроприводов переменного тока, дал переход управляющих устройств на цифровую микропроцессорную элементную базу.

В настоящее время производительность и быстродействие *DSP*-микроконтроллеров для управления электродвигателями позволяют осуществлять цифровую реализацию наблюдателей состояния, синтезированных в рамках непрерывных систем.

Интенсивное использование наблюдателей и учет новых факторов сложности при описании объектов управления и режимов их работы подстегивает интерес исследователей к способам, методам, алгоритмам синтеза и настройки наблюдателей, повышению качества восстановления координат объекта.

Ранее авторами были разработаны методики синтеза наблюдателей состояния и нагрузки с повышенным порядком астатизма, заданной полосой пропускания и компенсацией динамической ошибки восстановления [2, 3].

При этом для совершенствования метода стандартных коэффициентов предложены выражения и алгоритмы выбора среднегеометрического корня наблюдателей [4] как по заданному времени регулирования, так и по требуемой полосе пропускания, что также позволяет корректно

¹ Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракт №02.740.11.0067)

[©] ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

соотносить требования к динамике регуляторов и наблюдателей состояния различных порядков.

Результаты имитационного моделирования наблюдателей состояния полного (НСП), с астатизмом первого (НСА1) и второго (НСА2) порядков, синтезированных по предложенным методикам, подтвердили отсутствие в восстановленных значениях переменных статических ошибок, вызванных действием на объект возмущений сложной формы. Также подтверждена компенсация погрешности, обусловленной негативным влиянием «нулей» передаточных функций при ненулевых начальных условиях и действии внешних возмущений.

Кроме того, предложенные наблюдатели обеспечивают оценку мгновенного значения механической нагрузки на валу электропривода при ее изменении по произвольному закону или с заданной полосой частот, что открывает путь к применению принципов комбинированного управления с использованием обратной связи по возмущению.

Однако вопрос применимости разработанных наблюдателей в реальных системах электроприводов оставался открытым.

Для реализации наблюдателя в цифровой системе управления электроприводом его уравнения рассчитываются одним из методов численного интегрирования. Например, при использовании метода Эйлера разностные уравнения наблюдателя состояния с астатизмом 2-го порядка (рис. 1) при общепринятых обозначениях координат электропривода и коэффициентов наблюдателя имеют следующий вид:

$$\begin{pmatrix}
\hat{\Omega}_{1}(k+1) = \hat{\Omega}_{1}(k) + \tau \cdot (\frac{1}{J_{1}}(M(k) - \hat{M}_{ye}(k)) + \\
+ I_{1}(\Omega_{1}(k) - \hat{\Omega}_{1}(k))); \\
\hat{M}_{y}(k+1) = \hat{M}_{y}(k) + \tau (c(\hat{\Omega}_{1}(k) - \hat{\Omega}_{2}(k)) + \\
+ I_{2}(\Omega_{1}(k) - \hat{\Omega}_{1}(k))); \\
\hat{\Omega}_{2}(k+1) = \hat{\Omega}_{2}(k) + \tau (\frac{1}{J_{2}}(\hat{M}_{ye}(k) - \hat{M}_{c}(k)) + \\
+ I_{3}(\Omega_{1}(k) - \hat{\Omega}_{1}(k))); \\
\hat{M}_{ye}(k+1) = \hat{M}_{y}(k+1) + b(\hat{\Omega}_{1}(k+1) - \hat{\Omega}_{2}(k+1)); \\
\hat{M}_{c}^{*}(k+1) = d\hat{M}_{c}^{*}(k) + \tau I_{4}(\Omega_{1}^{*}(k) - \hat{\Omega}_{1}^{*}(k)); \\
\hat{M}_{c}^{*}(k+1) = M_{c}^{*}(k) + dM_{c}^{*}(k+1) + \\
+ \tau I_{5}(\Omega_{1}^{*}(k) - \hat{\Omega}_{1}^{*}(k)),
\end{cases}$$

где т – период расчета наблюдателя; *k*, *k* + 1 – номера шагов расчета.

В (1) задаются начальные значения: $\hat{\Omega}_{1}(0), \hat{M}_{y}(0), \hat{\Omega}_{2}(0), \hat{M}_{ye}(0), \hat{dM}_{c}(0), \hat{M}_{c}(0).$ Период расчета наблюдателя т определяется по допустимой погрешности вычислений.



Рис. 1. Структурная схема наблюдателя состояния с астатизмом второго порядка

Для расчета (1), осуществляемого в микропроцессоре, необходимо определить:

- размерность переменных;
- коэффициенты масштабирования, используемые для операций с переменными разных размерностей;
- коэффициенты в (1), используемые при расчете в микропроцессоре.

Размерность переменных определяет характеристики цифровой реализации:

- точность восстановления переменных;
- полосу пропускания наблюдателя, при которой не произойдет переполнения регистров микропроцессора, означающих переменные наблюдателя.

С другой стороны, задавшись полосой пропускания наблюдателя, можно определить требуемую размерность переменных. То есть, возможны прямой и обратный подход к определению размерности переменных и расчету коэффициентов в разностных уравнениях.

Для реализации наблюдателя в цифровой системе управления необходимо:

- рассчитать коэффициенты в (1);
- определить полосу пропускания, выше которой происходит ограничение переменных.

Используя для переменных в уравнениях (1) размерности микропроцессора, получаем следующую систему:

© ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

$$\begin{cases} \hat{\Omega}_{1}^{*}(k+1) = \hat{\Omega}_{1}^{*}(k) + k_{m1}(M^{*}(k) - \hat{M}_{ys}^{*}(k)) + \\ + k_{\tau 1}(\Omega_{1}^{*}(k) - \hat{\Omega}_{1}^{*}(k)); \\ \hat{M}_{y}^{*}(k+1) = \hat{M}_{y}^{*}(k) + k_{\Omega 1}(\Omega_{1}^{*}(k) - \hat{\Omega}_{2}^{*}(k)) + \\ + k_{\Omega 2}(\Omega_{1}^{*}(k) - \hat{\Omega}_{1}^{*}(k)); \\ \hat{\Omega}_{2}^{*}(k+1) = \hat{\Omega}_{2}^{*}(k) + k_{m2}(\hat{M}_{ys}(k) - \hat{M}_{c}(k)) + \\ + k_{\tau 2}(\Omega_{1}^{*}(k) - \hat{\Omega}_{1}^{*}(k)); \\ \hat{\Lambda}_{ys}^{*}(k+1) = \hat{M}_{y}^{*}(k+1) + \\ + k_{\Omega 3}(\Omega_{1}^{*}(k+1) - \hat{\Omega}_{2}^{*}(k+1)); \\ \hat{M}_{c}^{*}(k+1) = d\hat{M}_{c}^{*}(k) + k_{\Omega 4}(\Omega_{1}^{*}(k) - \hat{\Omega}_{1}^{*}(k)); \\ \hat{M}_{c}^{*}(k+1) = d\hat{M}_{c}^{*}(k) + d\hat{M}_{c}^{*}(k+1) + \\ + k_{\Omega 5}(\Omega_{1}^{*}(k) - \hat{\Omega}_{1}^{*}(k)), \\ \Gamma_{\mu} e k_{m1} = \frac{m_{\Omega}}{m_{M}} \frac{\tau}{J_{1}}; k_{m2} = \frac{m_{\Omega}}{m_{M}} \frac{\tau}{J_{2}}; k_{\Omega 1} = \frac{m_{M}}{m_{\Omega}} \tau I_{4}; \\ k_{\Omega 2} = \frac{m_{M}}{m_{\Omega}} \tau I_{2}; k_{\Omega 3} = \frac{m_{M}}{m_{\Omega}} b; k_{\Omega 4} = \frac{m_{M}}{m_{\Omega}} \tau I_{4}; \end{cases}$$

 $k_{\Omega 5} = \frac{m_M}{m_\Omega} \tau l_5; k_{\tau 1} = \tau l_1; k_{\tau 2} = \tau l_3; m_M - \text{passep-}$

ность момента; m_{Ω} – размерность скорости.

Для определения максимально возможной полосы пропускания наблюдателя $f_{np.max}$ при заданных периоде расчета и размерностях переменных нами разработана программа в одной из систем компьютерной математики.

В программе учтены соотношения среднегеометрического корня ω_{0s} и полосы пропускания *f_{np}* при биномиальном распределении корней характеристического уравнения наблюдателя [4].

При параметрах объекта $J_1 = 0,055 \ \kappa em^2$, $J_2 = 0,277 \text{ } \kappa e M^2$, $c = 553,633 \text{ } H M / p a \partial$ и b = 0,83 *Нмс / рад*, периоде расчета $\tau = 1 \cdot 10^{-3} c$ и размерностях переменных Ω:0,000488 рад/с (4-х байтовая знаковая переменная); М: 1,192 · 10⁻⁷ Нм (4-х байтовая знапеременная) ковая получены значения $f_{np\,max}^{HCA2}$ = 9,7 Гц и $\omega_{0s\,max}^{HCA2}$ = 188 c⁻¹.

Аналогичные расчеты, выполненные для наблюдателей состояния полного и с астатизмом первого порядков [2], дали следующие значения: $f_{np\,max}^{HCT} = 329,2 \ \Gamma u$, $\omega_{0s\,max}^{HCT} = 4064 \ c^{-1}$ и $f_{np\,max}^{HCA1} = 46,2 \ \Gamma u$, $\omega_{0s\,max}^{HCA1} = 701 \ c^{-1}$.

Как видим, с повышением порядка наблюдателя для соблюдения условия его работы в линейной зоне приходится в разы снижать его полосу пропускания. При этом можно не выполнить требования технического задания по динамике и точности восстановления переменных.

Выйти из данной ситуации можно, увеличив размерность переменных или уменьшив период расчета. И то и другое связано с повышением затрат на аппаратную часть системы управления.

В связи с этим представляется рациональным использование не только более мощного микроконтроллера, но и переход к вычислениям с плавающей точкой.

В последнее время на рынке *DSP*-микроконтроллеров появились продукты, включающие модуль вычислений с плавающей точкой. Передовой в этом отношении компанией, занимающей более половины рынка, является американская *Texas Instruments*. Серия выпускаемых микроконтроллеров *TMS320F2833x* обладает производительностью до 300 миллионов операций с плавающей точкой в секунду.

Поэтому для создания экспериментальной установки был выбран *DSP*-микроконтроллер *TMS320F28335* (рис. 2, 3).



Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки



Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки

Основным элементом экспериментальной установки является отладочная плата, которая, с одной стороны, через блок питания подключается к сети переменного тока, а с другой стороны, через промежуточное устройство (*JTAG*-эмулятор или конвертер *USB-CAN*) соединена с персональным компьютером с установленной на нем средой программирования и отладки программ для микроконтроллера отладочной платы.

Разработка программного обеспечения для проведения экспериментов выполнялась в два

этапа. Сначала с помощью инструмента *Embedded Target for TI C2000 DSP* имитационные модели системы «объект – наблюдатель состояния» были транслированы в программный код на языке *C*, затем проведена корректировка полученного кода с учетом особенностей отладочной платы и *TMS320F28335*. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и качества наблюдателей, полученные по предложенным методикам.

Список литературы

1. Колганов А.Р., Буренин С.В. Алгоритмы и программы функционального проектирования систем управления электромеханическими объектами: Учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 1997.

2. Анализ вариантов построения регуляторов и наблюдателей САУ с упругими связями / А.Б. Виноградов, В.Ф. Глазунов, Н.Е. Гнездов, С.К. Лебедев // Изв. вузов. Техн. текст. пром. – 2003. – №5. – С.87–93.

3. Лебедев С.К., Коротков А.А. Алгоритмы синтеза наблюдателей нагрузки электропривода // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 5–8.

4. Гнездов Н.Е., Коротков А.А., Лебедев С.К., Выбор параметров стандартных распределений при синтезе электроприводов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 14–16.

Колганов Алексей Руфимович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: klgn@drive.ispu.ru

Лебедев Сергей Константинович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок, телефон (4932) 26-97-09, e-mail: lebedev@drive.ispu.ru

Гнездов Николай Евгеньевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок, телефон (4932) 26-97-08, e-mail: gnezdov@drive.ispu.ru