

РЕДУЦИРОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ВЕКТОРНЫМ ВЫХОДОМ

А.Р. КОЛГАНОВ, д-р техн. наук, С.К. ЛЕБЕДЕВ, Н.Е. ГНЕЗДОВ, кандидаты техн. наук, А.А. КОРОТКОВ, асп.

Рассматривается общий подход к редуцированию наблюдателей электропривода. Предложен алгоритм построения астатических редуцированных наблюдателей нагрузки с учетом влияния на динамику действия внешней нагрузки. Предложен метод расчёта эквивалентных передаточных функций, определяющих характер переходного процесса восстановленного вектора состояния. На примере редуцированного наблюдателя с астатизмом второго порядка показана методика синтеза пассивных фильтров, оптимизирующих динамику восстановления возмущения.

Ключевые слова: электропривод, астатический редуцированный наблюдатель, пассивный фильтр.

LOAD OBSERVERS REDUCTION FOR ELECTRIC DRIVE WITH VECTOR OUTPUT

A.R. KOLGANOV, Doctor of Engineering, S.K. LEBEDEV, Candidate of Engineering, N.E. GNEZDOV, Candidate of Engineering, A.A. KOROTKOV, Post Graduate Student

The authors consider a general approach to reduction of electric drive observers. The construction algorithm of astatic reduced load observers subject to influence on external load dynamics. The article shows the calculation method of equivalent transfer functions that determine the transient process nature of restored state vector. Using the example of reduced second order astatic observer, the authors describe the synthesis techniques of passive filters that optimize the disturbance restoration dynamics.

Keywords: electric drive, astatic reduced observer, passive filter.

Реализация алгоритмов системы управления электроприводом на базе современной высокопроизводительной техники позволяет за счет усложнения структуры получать требуемые характеристики качества и точности управления. Так, полные наблюдатели нагрузки с адекватной моделью возмущения, построенной на основе известных параметров возмущения, восстанавливают не только весь вектор переменных состояния системы, но и возмущения, действующие на механику электропривода.

«Классические» алгоритмы построения наблюдателей полного порядка [1] для системы, имеющей более одной измеряемой переменной, т. е. с векторным выходом, осложняются отсутствием сложившихся методик расчета динамики наблюдателя. В связи с развитием информационно-измерительных систем современного электропривода такая ситуация становится весьма распространенной.

Устранить неоднозначность расчета динамики при векторном характере выхода объекта и невязки наблюдателя позволяют редуцированные наблюдатели (пониженного порядка, наблюдатели Люенбергера [1]), построение которых основано на восстановлении только тех компонентов вектора состояния, которые не могут быть непосредственно измерены. Редуцирование наблюдателя состояния основано на трансформации вектора переменных на выходе объекта в компоненты вектора состояния.

Исходное уравнение состояния и уравнение выхода объекта n -го порядка имеет вид

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[X] = [A][X] + [B][U], \\ [Y_1] = [C][X], \end{cases} \quad (1)$$

где $[A]$, $[B]$, $[C]$ – матрицы параметров; $[X]$, $[U]$ – векторы состояния и входа; $[Y_1]$ – вектор выхода.

Все переменные состояния объекта, составляющие вектор $[X]$, можно разделить на измеряемые, которые образуют вектор $[Y_1]$ размерности p , и неизменяемые, образующие вектор $[W]$ размерности $k = n - p$.

В этом случае можно записать

$$[X] = \begin{bmatrix} [Y_1] \\ [W] \end{bmatrix}.$$

Тогда система матричных уравнений состояния объекта запишется в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}[Y_1] = [A_{11}][Y_1] + [A_{12}][W] + [B_1][U], \\ \frac{d}{dt}[W] = [A_{21}][Y_1] + [A_{22}][W] + [B_2][U], \end{cases} \quad (2)$$

где $[A_{11}]$, $[A_{12}]$, $[A_{21}]$, $[A_{22}]$ и $[B_1]$, $[B_2]$ – элементы блочных матриц из (1);

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}.$$

Найдем из первого уравнения системы (2) величину $[A_{12}][W]$:

$$[A_{12}][W] = \frac{d}{dt}[Y_1] - [A_{11}][Y_1] - [B_1][U].$$

Таким образом, для получения в определенном масштабе вектора невязки $[\hat{W}]$ надо умножить вектор восстановленных координат

$[\hat{W}]$ слева на матрицу $-[A_{12}]$ и определить разность $[A_{12}][W] - [A_{12}][\hat{W}]$. После преобразований уравнение состояния наблюдателя имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dt}[\hat{W}] = [A_{21}][Y_1] + [A_{22}][\hat{W}] + [B_2][U] + \dots + [L]([A_{12}][W] - [A_{12}][\hat{W}]). \quad (3)$$

По уравнению (3) получена структура редуцированного наблюдателя (рис. 1). Динамику восстановления определяет характеристическое уравнение

$$\det(s[E] - [A_{22}] + [L][A_{12}]) = 0. \quad (4)$$

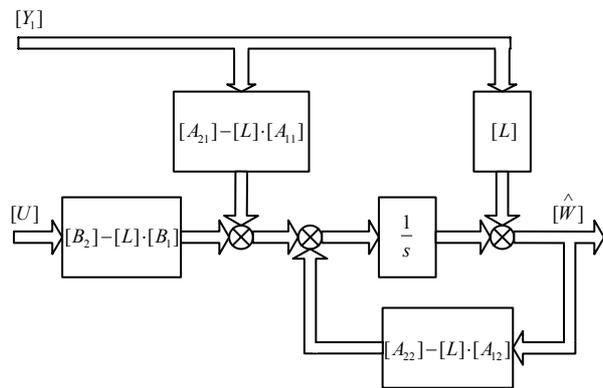


Рис. 1. Общая структура редуцированного наблюдателя

Рассмотрим особенности синтеза редуцированных наблюдателей на примере наблюдателя нагрузки электропривода с астатизмом второго порядка. Астатические редуцированные наблюдатели восстанавливают вектор неизмеряемых переменных состояния $[W]$ и вектор возмущения $[Z]$, действующий на объект [4]. Уравнение состояния и выхода наблюдателя с учетом уравнения (3) и модели возмущения, составленной из двух последовательных интегрирующих звеньев, имеет вид

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{W} \\ \hat{Z} \\ \hat{Z}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{22} & F & 0 \\ 0 & 0 & F_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{W} \\ \hat{Z} \\ \hat{Z}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_2 & A_{21} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ Y_1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$[Y_2] = [C_2'] \begin{bmatrix} \hat{W} \\ \hat{Z} \\ \hat{Z}' \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $[F], [F_1]$ – матрицы параметров возмущения редуцированного объекта; $[Y_2]$ – вектор выхода; $[C_2']$ – матрица параметров уравнения выхода.

Обозначим матрицы

$$[A_{22}'] = \begin{bmatrix} A_{22} & F & 0 \\ 0 & 0 & F_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [B_2'] = \begin{bmatrix} B_2 & A_{21} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

как матрицы состояния и управления редуцированного наблюдателя нагрузки с астатизмом второго порядка.

Используя полученные матрицы, редуцированный наблюдатель с астатизмом второго порядка рассчитывается по аналогии с наблюдателями полного порядка. Уравнение состояния (5) с учетом обратной связи по невязке примет вид

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{W} \\ \hat{Z} \\ \hat{Z}' \end{bmatrix} = [A_{22}'] \begin{bmatrix} \hat{W} \\ \hat{Z} \\ \hat{Z}' \end{bmatrix} + [B_2'] \begin{bmatrix} U \\ Y_1 \end{bmatrix} + \dots + [L] \begin{bmatrix} [C_2][W] - [C_2'] \begin{bmatrix} \hat{W} \\ \hat{Z} \\ \hat{Z}' \end{bmatrix} \end{bmatrix}.$$

Характеристическое уравнение наблюдателя имеет вид

$$\det(s[E] - [A_{22}'] + [L][C_2']) = 0. \quad (7)$$

Таким образом, если параметрами матрицы $[L]$ удастся обеспечить желаемое расположение корней уравнения (7) в левой полуплоскости комплексной плоскости, то можно получить асимптотическое с заданным характером и темпом стремление ошибки оценивания вектора состояния к нулю [2].

В [5] показано влияние на форму переходного процесса основных «возмущений» астатического наблюдателя. По предложенному алгоритму синтеза пассивных фильтров определим матрицу передаточных функций $[H_{eq2}]$ между внешними возмущениями и невязками. Рассмотрим уравнения состояния объекта и модели астатического редуцированного наблюдателя. Соответствующая система уравнений в матричной форме имеет вид

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} X \\ X_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ L[0 \mid C_w] + A_{21}[1 \mid 0] & A_{22}' - LC_2' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ X_2' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B & F \\ B_2 & LC_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ Z \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\hat{X}_2 = \begin{bmatrix} \hat{W} \\ \hat{Z} \\ \hat{Z}' \end{bmatrix}$ – полный вектор состояния ре-

дуцированного наблюдателя; $[X] = \begin{bmatrix} Y_1 \\ W \end{bmatrix}$ – полный вектор состояния объекта; $M_1 = [0 \mid C_W]$ – блочная матрица определения из вектора $[X]$ переменной состояния, используемой для вычисления невязки; матрицы C_W и C_Z выделяют недоступную для измерения переменную объекта, по которой вычисляется невязка, из вектора состояния $[W]$ и вектора возмущения $[Z]$ соответственно; $M_2 = [1 \mid 0]$ – блочная матрица выделения доступных для измерения переменных состояния $[Y_1]$ из вектора состояния $[X]$.

Вектор состояния уравнения (8) находится из выражения

$$\begin{bmatrix} X \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix} = [M]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} B & F \\ B_2 & LC_Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ Z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

т. е.

$$[H_{eq2}] = [M]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} B & F \\ B_2 & LC_Z \end{bmatrix},$$

где $[M] = \begin{bmatrix} sE - A & 0 \\ LM_1 + A_{21}M_2 & sE - A_{22}'' + LC_2'' \end{bmatrix}$.

Характеристическое уравнение системы формируется как произведение соответствующих характеристических уравнений объекта и наблюдателя:

$$\det(s[E] - [A]) \det(s[E] - [A_{22}''] + [L][C_2'']) = 0.$$

Таким образом, $[H_{eq2}]$ позволяют найти интересующие нас передаточные функции между входными воздействиями и элементами вектора состояния

$$H_{eq2_{ij}}(s) = \frac{B_{ij}(s)}{A_{ij}(s)}.$$

Компенсация нулей передаточной функции реализуется с помощью фильтра на выходе наблюдателя

$$W_{f_{ij}}(s) = \frac{1}{B_{ij}(s)}.$$

Суммируя, отметим, что алгоритм синтеза редуцированных наблюдателей нагрузки должен включать в себя следующие этапы:

1. Расчет элементов матрицы обратных связей $[L]$ по заданному распределению корней характеристического уравнения.

2. Формирование в одном уравнении уравнения состояния объекта и астатического редуцированного наблюдателя.

3. Определение передаточных функций выходных фильтров для оценки нагрузки.

Рассмотрим синтез редуцированного наблюдателя нагрузки на примере механической части электропривода с жесткими кинематическими связями и найдем параметры фильтров для редуцированного наблюдателя нагрузки с астатизмом второго порядка (РНА2).

Запишем систему уравнений объекта (1) в матричной форме, условно разделив вектор состояния на измеряемые и недоступные для измерения переменные:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi \\ \Omega \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{[A]} \begin{bmatrix} \varphi \\ \Omega \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{[B]} M_D + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}}_{[F]} M_L. \quad (10)$$

Считая измеряемыми переменными объекта угловое положение φ и скорость Ω ,

$$[Y_1] = \begin{bmatrix} \varphi \\ \Omega \end{bmatrix}, \text{ находим матрицы } [A_{11}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[A_{12}] = [0], [A_{21}] = [0], [A_{22}] = [0] \text{ и } [B_1] = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$[B_2] = [0], \text{ вектор } [W] = [0].$$

Определяя матрицы состояния и управления редуцированного наблюдателя нагрузки, запишем (5) в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{M}_L \\ \hat{M}_L' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{M}_L \\ \hat{M}_L' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_D \\ \varphi \\ \Omega \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\text{где } [A_{22}'] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, [B_2'] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ и } [C_2'] = [1 \ 0].$$

Характеристическое уравнение (7) позволяет определить коэффициенты матрицы $[L]$ по заданному быстродействию характеру движения невязки. Для определения передаточной функции фильтра при действии возмущений запишем в матричной форме систему уравнений состояния объекта (10) и наблюдателя (11):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi \\ \Omega \\ \hat{M}_L \\ \hat{M}_L' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_1 & 1 \\ 0 & 0 & -L_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi \\ \Omega \\ \hat{M}_L \\ \hat{M}_L' \end{bmatrix} + \dots \quad (12)$$

$$\dots + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \\ J_\Sigma & -J_\Sigma \\ 0 & L_1 \\ 0 & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_D \\ M_L \end{bmatrix},$$

и вычислим эквивалентную передаточную функцию:

$$[H_{eq2}] = \begin{pmatrix} s & -1 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s+L_1 & -1 \\ 0 & 0 & L_2 & s \end{pmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & -1 \\ 0 & L_1 \\ 0 & L_2 \end{bmatrix}$$

Из передаточной функции

$$H_{M_L}(s) = \frac{\hat{M}_L}{M_L} = \frac{sL_1 + L_2}{s^2 + sL_1 + L_2} \text{ находим}$$

$$W_{f_M}(s) = \frac{1}{s \frac{L_1}{L_2} + 1}$$

Структурная схема редуцированного наблюдателя нагрузки с астатизмом второго порядка приведена на рис. 2.

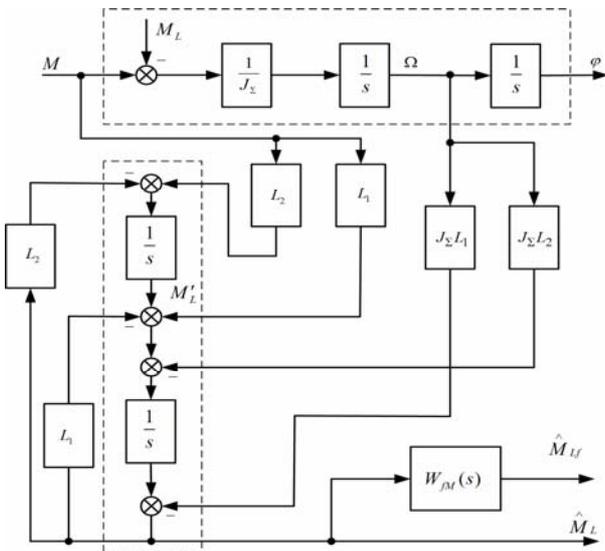


Рис. 2. Структурная схема редуцированного наблюдателя нагрузки

Сравнительный анализ структуры редуцированного наблюдателя нагрузки с наблюдателем нагрузки полного порядка и тем же порядком астатизма [5] показывает качественное упрощение структуры за счет существенного сокращения количества интеграторов, что благоприятно сказывается как на аппаратной, так и на программной реализации.

Исследование редуцированного наблюдателя нагрузки (РНА2) проведем в среде *Simulink* при ступенчатом воздействии нагрузки. Для сравнения выберем наблюдатель нагрузки полного порядка с астатизмом второго порядка (ПНА2). Переходные процессы оценок нагрузки показаны на рис. 3. Графики показывают очевидную необходимость применения фильтров для сигнала оценки нагрузки и определенное преимущество по быстродействию редуцированного наблюдателя нагрузки.

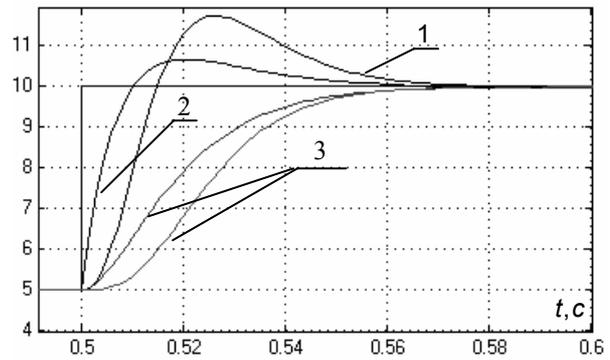


Рис. 3. Процесс восстановления нагрузки астатическими наблюдателями: 1 – ПНА2 без фильтра; 2 – РНА2 без фильтра; 3 – ПНА2 и РНА2 с фильтром

Заключение

Разработанный алгоритм синтеза редуцированных наблюдателей нагрузки может быть рекомендован для использования применительно к широкому кругу объектов с векторным выходом, на которые действуют возмущения произвольной формы.

Дальнейшая работа ведется в направлении реализации систем комбинированного управления, которые используют обратную связь по возмущению в целях повышения качества регулирования в автоматизированном электроприводе.

Теоретические положения нашли подтверждение экспериментальными исследованиями с применением средств имитационного моделирования.

Список литературы

1. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976.
2. Лебедев С.К., Гнездов Н.Е., Коротков А.А. Выбор параметров стандартных распределений при синтезе электроприводов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 14–16.
3. Лебедев С.К., Коротков А.А. Наблюдатели механической нагрузки регулируемого электропривода: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XIV Бенардосовские чтения). Т. 1. – Иваново, 2007. – С. 246.
4. Лебедев С.К., Коротков А.А., Разживин А.В. Разработка структуры и расчет параметров наблюдателей с астатизмом повышенного порядка: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV Бенардосовские чтения). Т. 1. – Иваново, 2009. – С. 242.
5. Лебедев С.К., Коротков А.А. Алгоритмы синтеза наблюдателей нагрузки электропривода // Вестник ИГЭУ. – 2009. – Вып. 3. – С. 5–8.

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 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

Коротков Александр Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры электропривода и автоматизированных промышленных установок,
телефон (4932) 26-97-07.