УДК 681.587.73

# Синтез оптимального наблюдателя состояний для системы управления вентильного электропривода

А.Г. Ильина, А.Г. Маматов

ФГАОУВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: dvanoska@mail.ru, franchesko13@gmail.com

#### Авторское резюме

Состояние вопроса: В настоящее время для систем модального и оптимального управления электропривода применяются наблюдатели полной и пониженной размерности. Существенными проблемами при синтезе таких устройств являются отсутствие адекватных математических моделей объектов управления, а также чувствительность наблюдателей к шуму в измерениях, приводящая к потере устойчивости. В связи с этим актуальной задачей является проведение исследований, направленных на разработку оптимальных наблюдающих устройств, позволяющих реализовать систему модального или оптимального управления на реальном объекте управления.

**Материалы и методы:** Использованы компьютеризированные методы идентификации и имитационного моделирования систем, представленные в рамках пакета программ MATLAB. Непараметрическая идентификация проведена в среде MATLAB/System Identification Toolbox по методу минимизации нормы «ошибки прогноза». Проверка синтезированных устройств осуществлена на испытательном стенде, являющемся имитационным макетом угломестной оси телескопа, на низкой скорости в условиях переменного момента трения.

**Результаты:** Рассмотрена классическая методика синтеза наблюдателя полного порядка на основе модели обобщенного электромеханического преобразователя. Предлагается методика синтеза наблюдателя полного порядка в виде фильтра Калмана на основе модели, полученной методами непараметрической идентификации. Проверка наблюдателя полного порядка, синтезированного классическим методом, показала чувствительность устройства к функциональным возмущениям типа момента трения. Установлено, что наблюдатель полного порядка, синтезированного устройства к функциональным возмущениям типа момента трения. Установлено, что наблюдатель полного порядка, синтезированный как фильтр Калмана, демонстрирует устойчивость к подобного рода возмущениям, однако имеет ошибку наблюдения, обусловленную использованным методом непараметрической идентификации. Применение модели объекта управления, полученной с помощью анализа экспериментальной амплитудночастотной характеристики, позволило минимизировать ошибку наблюдения до приемлемого уровня.

Выводы: Ожидается, что полученное устройство продемонстрирует удовлетворительные результаты на реальном устройстве и позволит замкнуть систему модального либо оптимального управления. Наблюдатель, синтезированный классическим методом, не пригоден для замыкания систем оптимального и модального управления по причине своей чувствительности к функциональным возмущениям. Наблюдатель, синтезированный как фильтр Калмана, может быть использован для замыкания подобных систем при условии использования модели, полученной методом анализа экспериментальной амплитудно-частотной характеристики объекта управления.

Ключевые слова: наблюдатель состояний, модальное управление, оптимальное управление, непараметрическая идентификация, вентильный электропривод, фильтр Калмана.

# Synthesis of optimal state estimator for permanent magnet synchronous motor drive

A.G. Ilyina, A.G. Mamatov ITMO University, Saint-Petersburg, Russian Federation E-mail: dvanoska@mail.ru, franchesko13@gmail.com

## Abstract

**Background:** Full and reduced state estimators are curretly used for electric drive modal and optimal control. Significant problems in the synthesis of such devices are the lack of adequate mathematical models of control objects, the sensitivity to noise in measurements, resulting in loss of stability. Therefore, development of optimal state estimator which will permit to actualize modal and optimal control on real objects, is an actually researching problem.

**Materials and methods:** Identification and simulation of the systems was done by computerized methods included in the software package MATLAB. Non-parametric identification was carried out in the MATLAB / System Identification Toolbox by the method of «prediction error» norm minimization. The synthesized devices were tested on the test bench, representing an imitation layout of a telescope elevation axis, at a low speed under variable friction torque.

**Results:** In this paper we consider the classical method of full state estimator synthesis based on a generalized model of the electromechanical transducer and propose a procedure for the synthesis of a full state estimator as a Kalman filter, based on the model obtained by nonparametric identification. Testing of the full state estimator synthesized by the classical method has revealed its sensitivity to functional disturbances such as friction torque. The full state estimator synthesized as a Kalman filter demonstrated resistance to such disturbances but had an estimation error caused by the use of the nonparametric identification method. Using the control object model obtained by analyzing the experimental frequency response helped to reduce the estimation error to an acceptable level.

**Conclusion**: The resulting device is expected to produce satisfactory results on a real device and to allow creating a closed-loop system with modal or optimal control. The estimator synthesized by the classical method is not suitable for closed-loop optimal and modal control systems because of its sensitivity to functional disturbances, while the estimator synthesized as a Kalman filter can be used in closed-loop systems, provided that the control object model is obtained by analyzing the experimental frequency response.

Key words: state estimator, modal control, optimal control, nonparametric identification, permanent magnet synchronous motor drive, Kalman filter.

## DOI: 10.17588/2072-2672.2015.4.033-038

Введение. Системы автоматического регулирования современных цифровых электроприводов осей телескопов траекторных измерений и антенных установок должны обеспечивать необходимое быстродействие, а также, в частности, заданные предельные точности наведения и слежения. Серьезным препятствием в решении данных задач является конечная жесткость элементов кинематической цепи между двигателем и опорно-поворотным устройством, приводящая к возникновению в системе нежелательных динамических процессов. Исполнительный орган электромеханической системы под действием внешних воздействий совершает колебательные движения с частотами, определяемыми резонансными свойствами механической конструкции<sup>1</sup>.

Одним из возможных способов решения задачи демпфирования колебаний исполнительного органа является использование методов модального или оптимального управления<sup>2</sup> [1, 2]. Практическая реализация алгоритмов модального или оптимального управления требует измерения всех координат вектора состояния объекта управления. Физически, необходимые данные могут быть получены при помощи датчиков соответствующего типа, установленных на объекте управления. На практике зачастую измерение всех необходимых величин невозможно с технической точки зрения или же нецелесообразно с экономической. Таким образом, для синтеза подобных систем необходимо использование дополнительного устройства, выполняющего функции оценки координат вектора состояния.

Ниже предлагается синтез оптимального наблюдателя состояний для системы управления вентильного электропривода с двухмассовой нагрузкой и упругой связью между массами. Для решения поставленной задачи используются современные компьютеризированные средства идентификации и моделирования систем, представленные в пакете программ МАТLAB.

Синтез наблюдателя полного порядка по математической модели обобщенного электромеханического преобразователя. В качестве реального объекта управления был выбран двухмассовый испытательный стенд с Известно, что математическая модель вентильного двигателя без существенной потери информативности может быть представлена моделью обобщенного электромеханического преобразователя (ОЭМП) [3, 4].

Измеряемыми выходными переменными считаются ток(момент) двигателя, скорость первой массы. Неизмеряемыми переменными, которые необходимо наблюдать, являются момент скручивания, возникающий между массами, соединенными механической связью с конечной жесткостью  $C_{12}$ , и скорость вращения второй массы.



Рис. 1. Фотография испытательного стенда

Линейная модель ОЭМП с двухмассовой нагрузкой в векторно-матричной форме имеет следующий вид: x=Ax+Bu,

$$v = Cx$$
:

• вектор состояния объекта управления

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} M \\ \omega_1 \\ M_{12} \\ \omega_2 \end{bmatrix};$$

матрица состояния

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Ильина А.Г. Следящий электропривод системы наведения квантово-оптического комплекса: дис. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. <sup>2</sup> Там же.

переменным коэффициентом жесткости и варьируемым моментом инерции второй массы (рис. 1). Указанная установка является иммитационным макетом электропривода угломестной оси телескопа.

<sup>©</sup> ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_e} & \frac{C_e C_m}{R T_e} & 0 & 0\\ \frac{1}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0\\ 0 & C_{12} & 0 & -C_{12}\\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix};$$

• матрица управления

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_{st}C_m}{RT_e} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

• матрица выхода по состояниям

 $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\cdot}$ 

При построении векторно-матричной модели объекта управления использовались параметры, предоставленные предприятиемизготовителем стенда:

• статический коэффициент усиления

 $K_{st} = 24;$ 

C =

• сопротивление фазы двигателя *R* = 1,19 Ом;

• электромагнитная постоянная времени  $T_{\rm e}=8,32$  мс;

• постоянная момента

 $C_m = 9,3 \text{ Hm/A};$ 

• постоянная ЭДС

*C<sub>e</sub>* = 6,2 В⋅с/рад;

• момент инерции первой массы

 $J_1 = 0,11$ кг·м<sup>2</sup>;

• жесткость связи между массами: *C*<sub>12</sub> = 3427,3 Hм/рад;

момент инерции второй массы:

 $J_2 = 0,67$  кг · м<sup>2</sup>;

Модель наблюдателя полного порядка имеет вид:

 $\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + K[y - C\tilde{x}].$ (1)

Уравнение (1) можно представить в виде  $\dot{\tilde{x}} = [A - KC]\tilde{x} + Bu + Ky.$  (2)

Из (2) следует, что устойчивость наблюдателя определяется расположением собственных чисел матрицы А – КС [5].

Для обеспечения быстрой сходимости ошибки наблюдения к нулю матрицу К необходимо выбрать так, чтобы полюса наблюдателя были расположены в левой половине комплексной плоскости на значительном удалении от мнимой оси. Это достигается путем выбора больших коэффициентов матрицы усиления K, что делает устройство чувствительным к любому шуму в наблюдениях.

Синтез наблюдателя полного порядка для данной модели производится в среде MATLAB по алгоритму, описанному в [6].



Рис. 2. Результат наблюдения скорости первой массы: 1 – результат наблюдения; 2 – показания датчика

Перевод модели объекта управления в дискретную форму имеет следующий вид: Wc=ss(A,B,C,0) – непрерывная модель

Т0=0.001 – период дискретизации

Wd=c2d(Wc,T0) – дискретная модель

Ad=Wd.a – матрица состояния

Bd=Wd.b - матрица управления

Cd=Wd.c – матрица выхода по состояниям Расчет матрицы коэффициентов К в среде MATLAB имеет вид:

K = place(Ad', Cd', p)',

где *р* – желаемые собственные числа наблюдателя.

Экспериментальная проверка разработанного наблюдателя показала, что устройство имеет существенную ошибку наблюдения скорости первой массы (рис. 2).

Выбор желаемых собственных чисел наблюдателя осуществлялся по фильтру Бесселя с частотами среза от 50 до 300 рад/с, при этом принципиальный вид графика не претерпевал существенных изменений. На рис. 2 представлена работа устройства с собственными числами, соответствующими частоте среза 200 рад/с:

 $p = \begin{vmatrix} 0,833 & -0,045i \\ 0,865 & +0,145i \\ 0,865 & -0,145i \end{vmatrix}.$ 

Полученный результат можно объяснить наличием в реальном объекте моментов трения, которые не были учтены в использованной модели по причине отсутствия достоверного математического описания сил трения, действующих на подобный объект

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

управления. Для решения данной проблемы были использованы альтернативные методы получения математической модели объекта управления.

Непараметрическая идентификация объекта управления. Одним из возможных методов получения математической модели объекта управления с достаточной точностью является непараметрическая идентификация по данным отклика на тестовый сигнал.

В настоящем исследовании в качестве тестового сигнала был использован меандр напряжения, выходные измеряемые переменные – момент на валу двигателя, скорость первой массы.

Идентификация производится в среде MATLAB/System Identification Toolbox, при этом используется метод непараметрической идентификации PEM («prediction error method»), основанный на принципе минимизации нормы «ошибки прогноза» и позволяющий получить линейную модель объекта в пространстве состояний<sup>3</sup> [7].

Использованная среда также позволяет выполнить верификацию полученной математической модели. Выбранный способ идентификации требует создания файла, содержащего данные о входном сигнале и выходных величинах.

Создание файла данных для идентификации в среде MATLAB осуществляется с помощью следующей команды:

dat = iddata(data.y, data.u, T),

где *data.u* – массив содержащий значения входного воздействия; *data.y* – массив содержащий значения выходных переменных; *T* – период дискретизации.

Также процесс идентификации можно осуществить через командное окно с помощью команды

$$pss4 = pem(dat, n),$$
 (3)

где pss4 – имя модели; *n* – желаемый порядок идентифицированной модели.

В результате выполнения команды вычисляется дискретная модель объекта в пространстве состояний типа «черный ящик» следующего вида:

 $x_{m+1} = Ax_m + Bu_m + Ke_m,$ 

 $y_m = Cx_m + Du_m + e_m,$ 

где *е<sub>т</sub> –* белый шум.

Идентифицированная модель получена в неизвестном базисе, что означает, что координаты вектора состояния не имеют явного физического смысла.

Для верификации полученной модели используются автоматические средства среды

MATLAB/System Identification Toolbox. Модель, синтезированная для настоящего исследования, продемонстрировала соответствие сигнала вращающего момента на 93,7 %, скорости первой массы на 61,85 %.

Синтез оптимального наблюдателя системы управления вентильного лпя электропривода. На основе идентифицироматематической ванной модели объекта управления решается задача синтеза оптимального наблюдателя. Для однозначного определения оптимальных коэффициентов матрицы усиления наблюдателя устройство синтезируется как фильтр Калмана<sup>4</sup>. Характеристики шума задаются с помощью пакета MATLAB исходя из данных идентификации. При расчете используется алгоритм, описанный в [6].

Из математической модели объекта управления (3) выделяются характеризующие его матрицы:

A = pss4.a — матрица состояния;

B = pss4.b – матрица управления;

C = pss4.c — матрица выхода по состояниям.



Рис. 3. Структурная схема оптимального наблюдателя

С помощью команды *dlqe*() рассчитывается матрица коэффициентов наблюдателя *ke*: [*ke*, *re*, *se*, *ee*] = *dlqe*(*A*, *VV*, *C*, *n*, *m*),

VV – ковариационная матрица шума, воздействующего на объект; n – единичная матрица с количеством строк, соответствующим количеству переменных состояний; m – единичная матрица с количеством строк, соответствующим количеству выходов объекта.

Ковариационная матрица шума вычисляется исходя из данных о шуме, воздействующем на объект, полученных автоматически, в результате процесса непараметрической идентификации:

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Ильина А.Г. Следящий электропривод системы наведения квантово-оптического комплекса: дис. ... канд. техн. наук.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Ильина А.Г. Следящий электропривод системы наведения квантово-оптического комплекса: дис. ... канд. техн. наук.

<sup>©</sup> ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

n1=max(size(A));

V=pss4.noisevariance;

VV=zeros(n1,n1);

for i=1:3 for j=1:3

VV(i,j)=V(i,j);

# end end

На основе полученной матрицы коэффициентов наблюдателя и матриц объекта управления составлена модель оптимального наблюдателя в среде MATLAB/Simulink<sup>5</sup> [1]. Структурная схема полученной модели приведена на рис. 3.

Так как вектор состояния используемой модели не имеет физического смысла, для оценки качества работы наблюдателя используются сигналы момента двигателя и скорости вращения первой массы, представляющие собой линейные комбинации переменных состояний наблюдателя.

На рис. 4 представлены результаты наблюдения скорости первой массы для оптимального наблюдателя.

Очевидно, что ошибка наблюдения при использовании оптимального наблюдателя существенно ниже. Наблюдатель устойчив к таким функциональным возмущениям, как моменты сил трения, действующие в реальной системе электропривода. Однако присутствующая ошибка наблюдения, обусловленная, очевидно, невысокой точностью использованного метода непараметрической идентификации, делает невозможным замыкание систем управления прецизионного электропривода с помощью синтезированного устройства.



Рис. 4. Результаты работы оптимального наблюдателя: 1 – сигнал наблюдателя; 2 – показания датчиков

Одним из возможных методов устранения данной проблемы является использование более точных методов идентификации объекта управления. При применении метода построения модели объекта управления с помощью анализа экспериментальной амплитудно-частотной характеристики, описанного в [8], можно получить дискретную модель объекта управления с выходом по скорости вращения первой массы следующего вида:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{m+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_m + \mathbf{B}\mathbf{u}_m; \\ \mathbf{y}_m &= \mathbf{C}\mathbf{x}_m; \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0,595 & -0,174 & -0,163 & -0,035 \\ 0,404 & 0,954 & -0,045 & -0,010 \\ 0,056 & 0,252 & 0,996 & -0,001 \\ 0,001 & 0,004 & 0,032 & 1 \\ \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0,051 \\ 0,014 \\ 0,001 \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 0 & 33,325 & 3,710 & 36,714 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Алгоритм построения оптимального наблюдателя аналогичен описанному для модели, полученной с помощью непараметрической идентификации методом РЕМ. Характеристики воздействующего на объект шума принимаются такими же, как и в предыдущем опыте.

В результате для разработанного наблюдателя состояний была получена следующая матрица коэффициентов усиления:

 $ke = \begin{bmatrix} 0,042 & 0,029 & 0,041 & 0,001 \end{bmatrix}$ .

Оценка качества работы наблюдателя также проводится с помощью восстановленного сигнала скорости первой массы.

На рис. 5 представлены результаты наблюдения скорости первой массы, согласно которым использованный метод идентификации объекта управления позволил минимизировать ошибку наблюдения скорости первой массы при использовании фильтра Калмана в качестве наблюдающего устройства. Предполагается, что полученный наблюдатель может быть использован для замыкания систем модального и оптимального управления вентильного электропривода.

# Заключение

В ходе исследования установлено, что наблюдатель полного порядка, построенный по математической модели ОЭМП с двухмассовой нагрузкой, не может быть использован на реальном объекте ввиду несовершенства математической модели объекта управления. Для получения корректных результатов математическая модель объекта управления была синтезирована с помощью различных методов непараметрической идентификации.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Ильина А.Г. Следящий электропривод системы наведения квантово-оптического комплекса: дис. ... канд. техн. наук.

<sup>©</sup> ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»



Рис. 5. Результаты работы оптимального наблюдателя, построенного на основе модели, идентифицированной по экспериментальной АЧХ: 1 – сигнал наблюдателя; 2 – показания датчиков

В качестве наблюдающего устройства был использован фильтр Калмана, являющийся линейным оценивателем с минимальным квадратом ошибки<sup>6</sup>. Работоспособность синтезированного таким способом наблюдателя проверена экспериментально на испытательном стенде, представляющем собой вентильный электропривод с двухмассовой нагрузкой и упругой связью между массами и являющемся имитационным макетом электропривода оси телескопа. Наблюдатель, синтезированный на основе модели, идентифицированной методом минимизации ошибки прогноза. продемонстрировал устойчивость к функциональным возмушениям, однако не мог быть использован для замыкания системы управления из-за достаточно большой ошибки наблюдения, обусловленной невысокой точностью идентификации. Использование модели объекта, идентифицированной при помощи анализа экспериментальной амплитудно-частотной характеристики [8], позволило минимизировать ошибку наблюдения до приемлемого уровня. Дальнейшее снижение ошибки возможно за счет получения более точных характеристик шума, воздействующего на объект. Предполагается, что настоящая методика синтеза наблюдателя полного порядка может использоваться при разработке систем оптимального и модального управления вентильного электропривода, оказывающих демпфирующее воздействие на колебания в механической части систем электропривода.

### Список литературы

1. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. – М.: Мир, 1977.

2. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Высш. шк., 1989.

3. Ильина А.Г. Параметрическая идентификация вентильного электропривода азимутальной оси телескопа траекторных измерений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 68. – С. 33–38.

4. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства / В.В. Кротенко, В.А. Толмачев, В.С. Томасов, В.А. Синицын // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 11. – С. 23–30.

 Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976.
Перельмутер В.М. Пакеты расширения Matlab

 Перельмутер В.М. Пакеты расширения Matlab Control System Toolbox и Robust Control Toolbox. – М.: Солон-Пресс, 2008.

7. Ljung L. System Identification Toolbox 7 User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\_doc/iden t/ident.pdf, свободный.

8. Abdullin A., Plotitsyn A., Drozdov V. Optimal Control System With Guaranteed Degree Of Stability For Precision Electric Drive // Advances in Automatic Control: Proceedings of the 16th International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation (ACMOS '14). – 2014. – N 35. – P. 22–26.

### References

1. Kvakernaak, H., Sivan, R. *Lineynye optimal'nye sistemy upravleniya* [Linear optimal control systems]. Moscow, Mir, 1977.

2. Aleksandrov, A.G. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Optimal and adaptive systems]. Moscow, Vysshaya shkola, 1989.

3. Il'ina, A.G. Parametricheskaya identifikatsiya ventil'nogo elektroprivoda azimutal'noy osi teleskopa traektornykh izmereniy [Parametric identification of PMSM drive for azimuthal axis of the trajectory measurements telescope]. *Nauchnotekhnicheskiy vestnik SPbGU ITMO*, 2010, no. 68, pp. 33–38.

4. Krotenko, V.V., Tolmachev, V.A., Tomasov, V.S., Sinitsyn, V.A. Sintez mikroprotsessornoy sistemy upravleniya elektroprivoda oporno-povorotnogo ustroystva [Synthesis of a microprocessor control system for the rotary-support electric drive]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, 2004, vol. 47, no. 11, pp. 23–30.

5. Kuzovkov, N.T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva* [Modal control and estimators]. Moscow, Mashinostroenie, 1976.

6. Perel'muter, V.M. *Pakety rasshireniya Matlab Control System Toolbox i Robust Control Toolbox* [Extension packs Matlab Control System Toolbox and Robust Control Toolbox]. Moscow, Solon-Press, 2008.

7. Ljung, L. System Identification Toolbox 7 User's Guide. Available at: http://www.mathworks.com/access/ helpdesk/help/pdf\_doc/ident/ident.pdf, free.

8. Abdullin, A., Plotitsyn, A., Drozdov, V. Optimal Control System With Guaranteed Degree Of Stability For Precision Electric Drive. Advances in Automatic Control: Proceedings of the 16th International Conference on Automatic Control, Modelling & Simulation (ACMOS '14), 2014, no. 35, pp. 22–26.

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

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Ильина А.Г. Следящий электропривод системы наведения квантово-оптического комплекса: дис. ... канд. техн. наук.

#### Ильина Аглая Геннадьевна,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем, e-mail: dvanoska@mail.ru

## Маматов Александр Геннадьевич,

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, бакалавр техники и технологии, магистрант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем, e-mail: franchesko13@gmail.com