

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-787-797

MODAL SYNTHESIS OF THE OBSERVER OF THE STATE VARIABLES OF THE RIVER DREDGER AUTOMATION SYSTEM

A. A. Chertkov, V. Yu. Ivanyuk, Ya. N. Kask

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The purpose of the work is to apply automation technologies and digitalization of the process of assessing the immeasurable variables of the state of the river dredger automation system when controlling high-tech software and hardware equipment with an electric drive, in order to increase the productivity of the vessels of the technical fleet when performing dredging operations on waterways. River dredgers are complex dynamic control objects, the performance of which in the conditions of digital transformation can be significantly increased through the use of new software and hardware, the algorithmization of which is based on neural network technologies and learning processes. To increase the efficiency and reliability of the operation of such facilities with the prospect of transition to unmanned control of the energy systems of dredgers, it is necessary to increase the information content of the complex of sensors containing information about the object state. In this regard, the use, along with the existing ones, of mathematical information sensors, which are observers, is proposed in the paper. On the example of controlling a precision electric drive, an algorithm for synthesizing a dynamic system with an observer, in which all components of the state variables vector are restored at the output coordinate, is considered. The proposed algorithm for the synthesis of the state vector evaluator is implemented in the form of a program compiled in the MATLAB codes, and it is demonstrated by the example of calculating a three-dimensional dynamic observer for the automation system of a river dredger. The obtained values of state variables and errors of their recovery, as well as the results of modeling the dynamic reactions of the automation system of the river dredger, correspond to the specified speed and required stability of the electric drive of the river dredger during its transition to a steady state under new initial conditions.

Keywords: synthesis algorithm, state matrix spectrum, electric drive model, dynamic observer, modal method, vector of state variables, modeling.

For citation:

Chertkov, Alexandr A., Vladimir Yu. Ivanyuk, and Yaroslav N. Kask. "Modal synthesis of the observer of the state variables of the river dredger automation system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 787–797. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-787-797.

УДК 681.5

МОДАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ РЕЧНОГО ЗЕМЛЕСОСА

А. А. Чертков, В. Ю. Иванюк, Я. Н. Каск

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Цель работы состоит в применении технологий автоматизации и цифровизации процесса оценки неизмеряемых переменных состояния системы автоматизации речного земснаряда при управлении высоко-технологичным программно-аппаратным оборудованием с электроприводом в целях повышения производительности судов технического флота при выполнении дноуглубительных работ на водных путях. Отмечается, что речные землесосы являются сложными динамическими объектами управления, производительность которых в условиях цифровой трансформации может быть значительно повышена

путем применения новых программно-аппаратных средств, алгоритмизация которых базируется на нейросетевых технологиях и цифровых технологиях компьютерного моделирования. Подчеркивается, что для повышения эффективности и надежности функционирования таких средств управления энергетическими системами земснарядов требуется повышение информативности комплекса датчиков информации о состоянии объекта. В этой связи в работе предлагается применение наряду с существующими аппаратными датчиками математических датчиков информации, к которым можно отнести наблюдателей переменных состояния объекта. На примере управления прецизионным электроприводом рассматривается алгоритм синтеза динамической системы с наблюдателем, в котором по координате выхода восстанавливаются все составляющие вектора переменных состояния. Предложенный алгоритм синтеза оценщика вектора переменных состояния, реализованный в виде программы, составленной в кодах MATLAB, демонстрируется на примере расчета трехмерного динамического наблюдателя для системы автоматизации речного землесоса. Полученные значения переменных состояния и ошибок их восстановления, а также результаты моделирования динамических реакций системы автоматизации речного землесоса соответствуют заданному быстродействию и требуемой устойчивости электропривода речного землесоса при переходе его в новое установившееся состояние.

Ключевые слова: алгоритм синтеза, спектр матрицы состояния, модель электропривода, динамический наблюдатель, модальный метод, вектор переменных состояния, моделирование.

Для цитирования:

Чертков А. А. Модальный синтез наблюдателя переменных состояния системы автоматизации речного землесоса / А. А. Чертков, В. Ю. Иванюк, Я. Н. Каск // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 787–797. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-787-797.

Введение (Introduction)

Современный подход к автоматизации речных землесосов как сложных судовых динамических объектов базируется на использовании цифровых технологий и инструментов построения интеллектуальных систем. Искусственные нейронные сети и аппарат нечеткой логики позволяют на качественно новом уровне решать проблемы управления динамическими объектами высокой размерности с плохо формализуемыми моделями. Однако их применение в задачах синтеза оптимальных систем ограничивается наличием существенного недостатка, связанного со сложностью процесса обучения, требующего большого объема экспериментальных данных об объекте управления [1]–[3].

Одним из важных приложений в концепции интегрированных систем управления может являться решение проблемы обеспечения высоких требований к точности и надежности систем автоматизации судов, что связано с расчетом оптимальных значений точности оценки вектора состояния при заданном быстродействии системы. В частности, в работах [4], [5] предложено использование цифровых технологий, реализуемых на основе модального метода синтеза применительно к динамической модели судовой системы стабилизации курса, что позволит путем вариации осуществлять выбор требуемых параметров авторулевых комплексов, обеспечивающих устойчивость судна на курсе. Однако в реальных условиях измерение всех переменных состояния, а также их производных высокого порядка затруднено локализацией датчиков в труднодоступных местах, а также дороговизной и недостатком компактных средств измерений. С целью преодоления этих сложностей предлагается использовать наряду с инструментальными математическими датчиками информации, которые строятся на динамических наблюдателях и оценщиках.

В системах реального времени наиболее распространены оценки типа «фильтрация», характерные для оценщиков полного порядка, предложенных Р. Калманом. Основу их составляет подсистема в виде идентификатора состояния, в котором формируется сигнал невязки между выходами объекта и его модели, обеспечивающий обратную связь по ошибке восстановления вектора состояния. За счет его влияния динамика модели приобретает качественно новые свойства, когда свободные движения объекта и модели различаются, а вынужденные — асимптотически сходятся. Это позволяет заменить переменные состояния объекта переменными состояниями модели, т. е. их оценками. Построенные на этой основе оценщики обладают свойствами динамической системы и называются *динамическими компенсаторами*.

Необходимыми условиями реализации алгоритма оценивания вектора состояния объекта и возмущений, а также восстановления неизмеряемых переменных состояния, согласно [6]–[10], служат текущие измерения его входов и выходов и использование параметрической информации о модели объекта. Актуальность проблемы синтеза оценивателей состояния широко освещена в отечественной [11]–[12] и зарубежной [13]–[14] литературе. Однако на практике при разработке алгоритма синтеза оценивателей необходимо учитывать специфику динамических свойств конкретных объектов [15].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассмотрим в общем случае алгоритм синтеза оценивателя и покажем его реализацию на конкретном объекте. С этой целью выбираем модель управляемого объекта в виде системы матричных уравнений, заданных в форме пространства состояний:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + BU(t); \\ Y(t) = CX(t) + DU(t). \end{cases} \quad (1)$$

Для начальных условий $X(t_0) = X_0$, $t \geq t_0$.

Здесь $X(t) \in R^n$, $U(t) \in R^m$ и $Y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода соответственно; A , B , C , D — матрицы состояния, управления, выхода и связи *вход – выход* линейной стационарной системы соответственно.

Процесс синтеза алгоритма оценивания переменных состояния этого объекта заключается в формировании такой структуры наблюдателя, переменные состояния которого могли бы служить оценками переменных состояния объекта управления.

Предположим, что $D = 0$. Тогда алгоритм оценки переменных состояния $X(t)$ по измеряемым переменным управления $U(t)$ и выходным переменным $Y(t)$, описываемый приведенными уравнениями, будет отображать работу наблюдателя в составе обобщенной системы управления, представленной на рис. 1:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}(t) = A\hat{X}(t) + BU(t) + N[Y(t) - \hat{Y}(t)]; \\ \hat{Y}(t) = C\hat{X}(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $\hat{X}(t) \in R^n$ — вектор переменных состояния наблюдателя, служащий оценкой состояния объекта; N — $(n \times l)$ — матрица коэффициентов усиления (настройки) наблюдателя, подлежащих определению; $\hat{Y}(t) = C\hat{X}(t)$ — вектор выхода наблюдателя, служащий оценкой вектора выхода объекта.

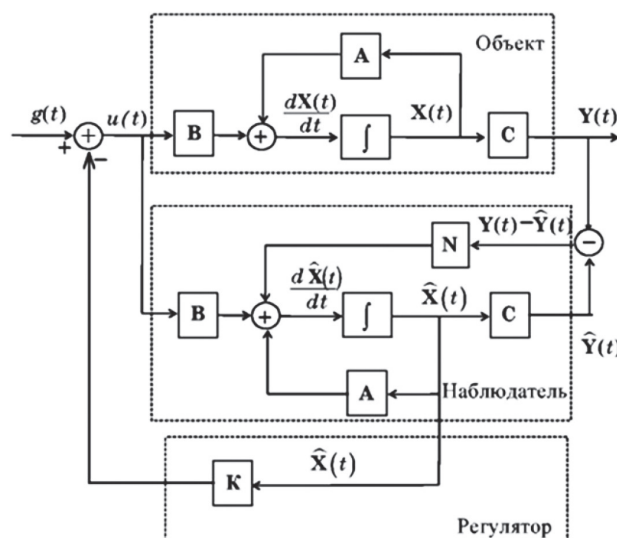


Рис. 1. Обобщенная структура объект – наблюдатель системы управления

Представленный уравнениями (2) регулятор является уже динамической системой, порядок которой совпадает с порядком объекта управления. Такой регулятор называют *динамическим компенсатором*.

Объединив уравнения (2), получим

$$\dot{\hat{X}}(t) = A\hat{X}(t) - NC\hat{X}(t) + BU(t) + NCX(t) = (A - NC)\hat{X}(t) + BU(t) + NCX(t). \quad (3)$$

Если в уравнениях (2) заменить выход $Y = CX$, то динамическую модель наблюдателя можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}(t) = H\hat{X}(t) + BU(t) + NCX(t); \\ \hat{Y}(t) = C\hat{X}(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $H = (A - NC)$ — матрица динамических свойств наблюдателя.

Из полученных оценок (4) можно сформировать модель ошибки оценивания вектора переменных состояния, которую можно ввести в состав расширенной динамической системы, включающей как объект управления, так и модель ошибки оценивания его состояния. Полученные с ее помощью оценки служат оценками восстановления вектора состояния объекта.

Поскольку наблюдатель (оцениватель) строят, как правило, в системе модального управления объектом (см. рис. 1), вектор управления $U(t)$ принимает следующий вид:

$$U(t) = -K\hat{X}(t), \quad K = [k_1, k_2, \dots, k_n], \quad (5)$$

где K — вектор коэффициентов усиления цепи обратной связи в системе модального управления.

Численные значения коэффициентов $k_1, k_2, \dots, k_n$ находят из характеристического многочлена $\det(sI - \tilde{A})$ модального регулятора с собственными числами матрицы $\tilde{A} = A - BK$, приравнявая его коэффициенты при степенях оператора s к коэффициентам при тех же степенях s стандартного полинома того же порядка, но с желаемым распределением корней.

Выбором элементов матрицы N наблюдателю можно придать любое желаемое распределение корней (собственных чисел матрицы H) характеристического уравнения

$$D(s) = \det [sI - H], \quad (6)$$

при котором процесс оценивания (4) асимптотически устойчив и $\varepsilon = X - \hat{X} \rightarrow 0$, т. е. при $t \rightarrow \infty$ оценочные переменные состояния наблюдателя стремятся к переменным состояния объекта при любых начальных значениях $x_0, \hat{x}_0$.

Для выбора распределения корней характеристического уравнения наблюдателя обычно пользуются одной из стандартных форм, например

$$s^n + \alpha_{n-1}s^{n-1} + \dots + \alpha_0 = 0. \quad (7)$$

При этом так же, как и при расчете модального регулятора, приравнивают коэффициенты при одинаковых степенях оператора s в уравнениях (5) и (7) и находят выражения для определения элементов матрицы N наблюдателя через параметр ω стандартных форм. Коэффициенты усиления (настройки) как наблюдателя, так и модального регулятора могут рассчитываться независимо. Причем эмпирически установлено (см. [5]), что быстродействие наблюдателя должно превышать быстродействие замкнутой модальным регулятором системы в 2–4 раза.

Покажем на примере модели электропривода системы автоматизации речного земснаряда практическую реализацию представленного алгоритма путем построения расширенной динамической системы как совокупности объекта управления и наблюдателя, но не вектора переменных состояния, а вектора ошибки восстановления переменных состояния.

Пусть модель привода с электродвигателем постоянного тока задана в пространстве состояний матрицами:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} & 0 \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [0 \quad 0 \quad 1]; \quad D = 0. \quad (8)$$

Коэффициенты, входящие в матрицы A и B модели (8): R_a — активное сопротивление якорной цепи; L_a — индуктивность якорной цепи; K_t — постоянная, определяющая связь между током и моментом на валу электродвигателя; b — коэффициент сопротивления привода (отношение момента сопротивления к скорости вращения); K_b — постоянная противо-ЭДС; J — момент инерции привода, приведенный к валу электродвигателя.

Тогда в терминах уравнения (1) модель привода с электродвигателем постоянного тока в форме пространства состояний, с учетом (8), примет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} & 0 \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t);$$

$$y = [0 \quad 0 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $x_1 = I_a(t)$ — ток якорной цепи; $x_2 = \omega(t)$ — скорость вращения вала электропривода; $x_3 = \theta(t)$ — угол поворота вала электропривода.

Для получения численных значений коэффициентов матриц в уравнении (9) введем следующие параметры [15]:

$$L_a = 0,00891 \text{ Гн}; R_a = 1,1 \text{ Ом}; J = 0,0044 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2 / \text{рад}; b = 0,011 \text{ Н} \cdot \text{м} / (\text{рад} / \text{с});$$

$$K_b = 0,22 \text{ В} / (\text{рад} / \text{с}); K_t = 0,22 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{А}.$$

Искомую матрицу K коэффициентов обратных связей можно получить в результате решения системы уравнений (5) и (7) путем приравнивания в этих выражениях коэффициентов при операторе s с одинаковыми степенями. Заметим, что эта рутинная операция в среде MATLAB может быть выполнена с помощью функций *acker* либо *place*, соответственно, для одномерных и многомерных систем. Воспользуемся функцией *acker*, имеющей синтаксис

$$K = \text{acker}(A, B, P),$$

где P — вектор, задающий желаемое расположение полюсов системы.

С этой целью задаемся на комплексной плоскости желаемым расположением корней (полюсов) характеристического полинома замкнутой системы в ее левой полуплоскости:

$$P = [-3.00 + j*3.00; -3.00 - j*3.00; -5.00].$$

Фрагмент программы в кодах MATLAB, используемый для расчета вектора K , и результаты его вычисления:

```
% sah1066d.m
La=0.00891;% Гн
Ra=1.1;% Ом
J=0.0044;% Н*м*с2 /рад.
```

```

b=0.011;% Н•м /(рад./с)
Kb=0.22;% В/(рад./с)
Kt=0.22;% Н•м/А
A=[-Ra/La -Kb/La 0; Kt/J -B/J 0; 0 1 0]; B=[1/La 0 0]';
C=[0 0 1]; D=[0];
P=[-3.00+j*3.00;-3.00-j*3.00;-5.00];
K=acker(A, b, P);
K =
-1.0243-0.2152 0.0160.

```

При известных значениях вектора коэффициентов K , используя указанные операторы функций MATLAB:

```

>> Ac=A-B*K
>> eig(Ac),

```

получим значения элементов матрицы $\tilde{A} = A - BK$ замкнутой системы управления заданным объектом, а также собственные ее числа:

```

A~ =
-8.5000-0.5350-1.8000
50.0000-2.5000 0
0 1.0000 0
ans =
-5.0000 + 0.0000i
-3.0000 + 3.0000i
-3.0000-3.0000i.

```

Полученные отрицательные значения собственных чисел равны заданным ранее значениям корней (полюсов) характеристического уравнения замкнутой модальным регулятором системы управления. Следовательно, можно приступить к синтезу наблюдателя (оценителя) вектора ошибки восстановления переменных состояния.

Для синтеза наблюдателя с матрицей динамических свойств $H = (A - NC)$ необходимо определить вектор коэффициентов N усиления (настройки) наблюдателя, которые могут быть вычислены по формуле Аккермана:

$$N = acker(A', C', P_{obs}),$$

для выбранного (заданного) вектора корней характеристического уравнения наблюдателя:

$$P_{obs} = [-50+j*50; -50-j*50; -50],$$

из условия существенного превышения его быстродействия над быстродействием системы.

С помощью соответствующих команд инструментария MATLAB:

```

>> P_obs=[-50+j*50;-50-j*50;-50];
>> N=acker(A', C', P_obs),
получим расчетные значения коэффициентов вектора  $N$  наблюдателя:
N =
1.0e+03 *
-9.1455 5.4284 0.0240.

```

Сформируем на основе (1) и (3) композитную (составную) матрицу расширенной системы как совокупность двух подсистем: объекта с модальным регулятором и динамического наблюдателя (оценителя), выразив переменные уравнений состояния объекта и наблюдателя не в терминах $\dot{X}(t)$ и $\hat{\dot{X}}(t)$, а в терминологии $\dot{X}(t)$ и $\dot{e}(t)$, где $e(t)$ — вектор ошибки оценки состояния системы, равный $e(t) = X(t) - \hat{X}(t)$.

В этом случае с учетом (5) уравнение (1) состояния объекта управления примет вид

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= AX(t) + BU(t) = AX(t) - BK\hat{X}(t) + BKX(t) - BKX(t) = \\ &= (A - BK)X(t) + BK(X(t) - \hat{X}(t)) = (A - BK)X(t) + BKe(t).\end{aligned}\quad (10)$$

В свою очередь, уравнение состояния наблюдателя (3) с учетом (5), примет вид

$$\begin{aligned}\dot{\hat{X}}(t) &= (A - NC)\hat{X}(t) - BK\hat{X}(t) + NCX(t) = \\ &= (A - NC - BK)\hat{X}(t) + NCX(t).\end{aligned}\quad (11)$$

Тогда вектор производной ошибки оценивания: $\dot{e}(t) = \dot{X}(t) - \dot{\hat{X}}(t)$, примет вид

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= AX(t) - BK\hat{X}(t) - (A - NC - BK)\hat{X}(t) - NCX(t) = \\ &= (A - NC)X(t) - (A - NC)\hat{X}(t) = (A - NC)e(t).\end{aligned}\quad (12)$$

Таким образом, объединив выражения (10) и (12), выразим состояние расширенной системы *объект – наблюдатель* в терминологии переменных $X(t)$ и $e(t)$:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = (A - BK)X(t) + BKe(t); \\ \dot{e}(t) = (A - NC)e(t). \end{cases}$$

В результате композитная (составная) матрица состояний расширенной системы со встроенной в нее моделью ошибки наблюдателя (оценивателя) примет вид

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A - BK & BK \\ 0_{3 \times 3} & A - NC \end{bmatrix}.$$

Для моделирования динамики расширенной моделью ошибки наблюдателя системы по каждой ее переменной состояния в составе вектора

$$X_e = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), e_1(t), e_2(t), e_3(t)]$$

воспользуемся функцией *initial* из инструментария MATLAB, полный синтаксис которой имеет следующий вид:

$$X = \text{initial}(\text{SYS}, X0, T).$$

Данная функция отображает матрицу X , число строк в которой определяется размерностью массива временных отсчетов T , а число столбцов — числом переменных состояния, описывающих траекторию движения системы для модели SYS , заданной в пространстве состояний с вектором начальных условий $X0$ по каждой переменной состояния.

Создадим систему SYS с помощью функции *ss* (State Space) в пространстве состояний, аргументами которой являются стандартные матрицы A , B , C и D системы. С этой целью для измерения всех переменных состояния выберем матрицу C замкнутой системы, равную единичной матрице $C = \text{eye}(6)$, что обеспечит равенство измерений соответствующим значениям переменных состояния, а в качестве матриц B и D выберем «пустые» матрицы. Зададим также вектор начальных условий $X0 = [1; 0; 1; 0; 1; 0]$.

Фрагмент программы моделирования динамики всей системы по каждой переменной состояния и ошибке ее оценивания, составленной в кодах среды MATLAB:

```
% Модель расширенной системы со встроенной моделью сигнала ошибки
% наблюдателя
A_ = [A - B*K, B*K; zeros(3,3), A - N'*C];
sys = ss(A_, [], eye(6), []);
t = 0:0.01:3;
x0 = [1; 0; 1; 0; 1; 0];
x = initial(sys, x0, t);
x1 = [1 0 0 0 0 0]*x';
x2 = [0 1 0 0 0 0]*x';
```

```
x3= [0 0 1 0 0 0]*x';
e1= [0 0 0 1 0 0]*x';
e2= [0 0 0 0 1 0]*x';
e3= [0 0 0 0 0 1]*x';
subplot(2,3,1);
plot(t, x1); grid
xlabel('Время: t, с '), ylabel('x1')
title('Ток якорной цепи')
subplot(2,3,2);
plot(t, x2); grid
xlabel('Время: t, с '), ylabel('x2')
title('Скорость вала')
subplot(2,3,3);
plot(t, x3); grid
xlabel('Время: t, с '), ylabel('x3')
title('Угол поворота')
subplot(2,3,4);
plot(t, e1); grid
xlabel('Время: t, с '), ylabel('e1')
subplot (2,3,5);
plot(t, e2); grid
xlabel('Время: t, с '), ylabel('e2')
subplot(2,3,6);
plot(t, e3); grid
xlabel('Время: t, с '), ylabel('e3')
```

Результаты (Results)

На рис. 2 приведены графики динамического процесса, полученные с помощью функции `initial`. В верхней части выведены изменения во времени переменных состояния системы, под ними — погрешности наблюдателя при восстановлении соответствующих координат. Видно, что во всех случаях (по окончании переходного процесса в наблюдателе) погрешности практически равны нулю и переменные состояния электропривода и наблюдателя идентичны.

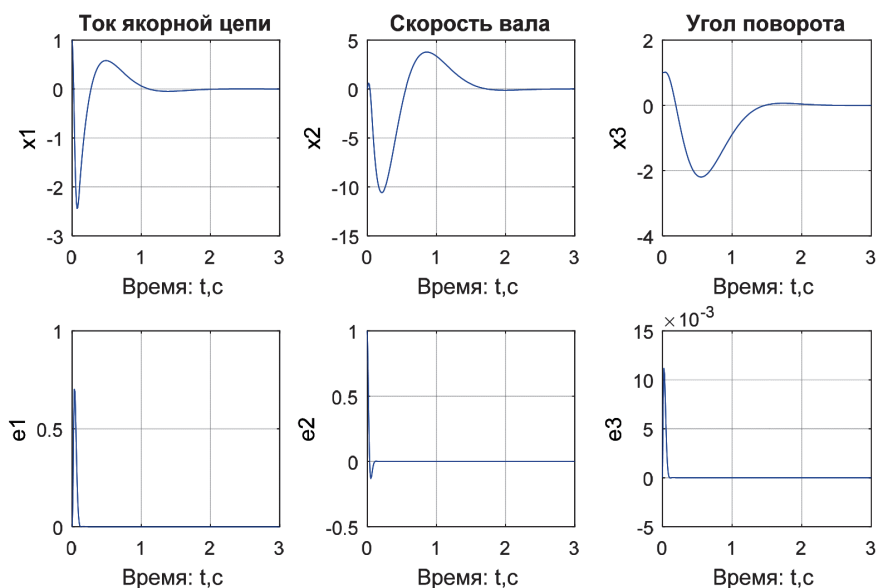


Рис. 2. Изменения во времени переменных состояния электропривода и погрешностей работы наблюдателя (математического датчика информации о состоянии объекта)

Обсуждение (Discussion)

Результаты моделирования, представленные на рис. 2, показывают, что расчетные траектории свободного движения наблюдаемой системы под действием новых (отличных от заданных) начальных условий, а также кривые ошибок восстановления вектора переменных ее состояния асимптотически сходятся по завершении переходных процессов в наблюдателе.

Графики отражают специфику объекта судовой автоматики, откуда следует, что время переходного процесса зависит от численных значений параметров модели, а также от установившихся значений переменных состояния.

Заключение (Conclusion)

В работе приведены результаты исследований, связанные с построением алгоритма наблюдателя (оценителя) полной размерности с использованием модели расширенной системы *объект – наблюдатель*, что позволяет получить оценки векторов ошибки восстановления переменных состояния по доступному для измерений вектору $x_3 = \theta(t)$ выхода. Корректность предлагаемых технических решений демонстрируется на примере расчета траекторий системы автоматического управления электроприводом речного землесоса с применением наблюдателя.

Модальный метод синтеза наблюдателя и алгоритм его реализации применительно к электроприводу речного землесоса с заданной структурой модели позволяют получить простые решения для управления траекториями ее движения, однозначно определяемыми по совокупности заданных собственных чисел матрицы замкнутой системы. Для линейной модели наблюдателя устойчивость гарантируется обоснованным выбором корней ее характеристического многочлена, обеспечивающих превышение его быстродействия над быстродействием замкнутой модальным модулятором системы. Метод и алгоритм позволили синтезировать наблюдатель при измерении координаты выхода для полного восстановления вектора состояния во всех рабочих режимах электропривода.

Выбор структуры расширенной системы наблюдателя путем введения векторов переменных $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ и ошибок их восстановления $e_1(t)$, $e_2(t)$ и $e_3(t)$ позволяет предложить способ мониторинга датчиков скорости, тока якоря и угла поворота вала электродвигателя, являющихся переменными состояния объекта.

Наблюдатели фактически являются математическими датчиками информации и могут использоваться как для восстановления неизмеряемых переменных состояния, так и для других переменных, измерение которых в условиях эксплуатации затруднено.

Предложенный алгоритм численной оценки вектора состояния средствами математического программирования может эффективно применяться для управления технологическими процессами, плохо формализуемыми в математической форме. Алгоритмы оптимизации объектов и систем средствами математического программирования содержат модели динамических объектов в форме уравнений в пространстве состояний, образующих систему ограничений на каждом шаге итерационного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot / M. Tomera // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2010. — Vol. 20. — No. 2. — Pp. 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
2. Дерябин В. В. Использование нейронных сетей для стабилизации судна на траектории / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 665–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-665-678.
3. Лукашкин Г. Е. Построение системы автономного адаптивного управления судном на основе нечеткой логики / Г. Е. Лукашкин // Транспортное дело России. — 2019. — № 5. — С. 177–180.
4. Сахаров В. В. Алгоритмизация и синтез систем управления судовыми динамическими объектами средствами математического программирования / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 201–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-201-211.

5. Веремей Е. И. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов / Е. И. Веремей, В. М. Корчанов, М. В. Коровкин, С. В. Погожев. — СПб.: Изд-во НИИ Химии СПбГУ, 2002. — 370 с.
6. Андриевский Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 475 с.
7. Witkowska A. Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method / A. Witkowska, R. Smierzchalski // *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. — 2012. — Vol. 22. — No. 4. — Pp. 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.
8. Сахаров В. В. Синтез оптимального оценивателя для системы управления судовым динамическим объектом / В. В. Сахаров, О. В. Шергина, А. А. Чертков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2013. — № 1 (20). — С. 26–31.
9. Чертков А. А. Синтез наблюдателя на основе фильтра Калмана для системы управления динамическим объектом / А. А. Чертков // *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. — 2014. — № 1 (12). — С. 66–71.
10. Никитин Е. Д. Анализ и структура систем динамического позиционирования судов / Е. Д. Никитин, Т. В. Тимочкина, В. А. Миклуш, Н. В. Яготинцева // *Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право*. — 2017. — № 3 (21). — С. 85–90.
11. Гофман А. Д. Динамика корабля / А. Д. Гофман. — СПб.: СПГУВК, 2003. — 150 с.
12. Жеребцов В. М. Системы автоматического управления движением судна / В. М. Жеребцов, Д. П. Клепач // *Новая наука: современное состояние и пути развития*. — 2016. — № 11–2. — С. 159–162.
13. Powell J. D. Feedback Control of Dynamic Systems / J. D. Powell, G. F. Franklin. — 7th Edition. — Pearson, 2014. — 880 p.
14. Dhaliwal S. S. State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems: Master thesis / S. S. Dhaliwal. — Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2011. — 83 p.
15. Чертков А. А. Алгоритм наблюдателя системы управления курсом судна для оценки возмущений и шумов измерений / А. А. Чертков, В. А. Загрединов, Ю. Б. Михайлов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 6 (40). — С. 221–227. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-221-227.

REFERENCE

1. Tomera, Mirosław. “Nonlinear controller design of a ship autopilot.” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 20.2 (2010): 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
2. Deryabin, Victor V. “Neural networks implementation for a vessel track control.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 665–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-665-678.
3. Lukashkin, G. “Building a system of autonomous adaptive control of the vessel based on fuzzy logic.” *Transport business of Russia* 5 (2019): 177–180.
4. Saharov, Vladimir Vasilevich, Alexandr Alexandrovich Chertkov, and Sergey Valerevich Saburov. “Algorithmic and synthesis of control systems of ship dynamic objects by means of mathematical programming.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 201–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-201-211.
5. Veremey, E. I., V. M. Korchanov, M. V. Kоровкин, and S. V. Pogojev. *Kompjuternoe modelirovanie sistem upravlenija dvizheniem morskikh podvijnykh ob'ektov*. SPb.: NII Himii SPbGU, 2002.
6. Andrievskij, B. R., and A. L. Fradkov. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravlenija s primerami na jazyke MatLab*. SPb.: Nauka, 2000.
7. Witkowska, Anna, and Roman Śmierchalski. “Designing a ship course controller by applying the adaptive backstepping method.” *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 22.4 (2012): 985–997. DOI: 10.2478/v10006-012-0073-y.
8. Saharov, V. V., O. V. Shergina, and A. A. Chertkov. “Optimal estimator synthesis for ship dynamic object control.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 26–31.
9. Chertkov, A. “Synthesis of the observer on the basis of filter Kalmana to control system of dynamic object.” *Informatsionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo* 1(12) (2014): 66–71.

10. Nikitin, E.D., T. V. Timochkina, V. A. Miklush, and N. V. Yagotintseva. "Analysis and structure of dynamic positioning systems for ships." *Informatsionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo* 3(21) (2017): 85–90.
11. Gofman, A. D. *Dinamika korablja*. SPb.: Izd-vo SPGUWK, 2003.
12. Zherebtsov, V.M., and D. P. Klepach. "Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna." *Novaya nauka: sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya* 11–2 (2016): 159–162.
13. Powell, J. David, and Gene F. Franklin. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 7th edition. Pearson, 2014.
14. Dhaliwal, S. S. State Estimation and Parameter Identification of Continuous-time Nonlinear Systems. Master thesis. Ontario, Canada: Queen's University Kingston, 2011.
15. Chertkov, Alexandr Alexandrovich, Denis Alekseevich Zagredinov, and Jurij Borisovich Mihaylov. "Algorithm of ship course control system watcher for assessing disturbances and noise measurements." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 221–227. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-221-227.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Иванюк Владимир Юрьевич — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Каск Ярослав Николаевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov, Alexandr A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Ivanyuk, Vladimir Yu. — Applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Kask, Yaroslav N. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rgam2010@yandex.ru, kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 августа 2022 г.
Received: August 24, 2022.