

19. Choset H. Coverage for robotics – A survey of recent results, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, October 2001, Vol. 31, pp. 113-126. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1016639210559>.
20. Odintsov L.G., Paramonov V.V. *Tekhnologiya i tekhnicheskie sredstva vedeniya poiskovo-spasatel'nykh i avariyno-spasatel'nykh robot: Spravochnoe posobie [Technology and technical means of conducting search and rescue and rescue operations: a reference guide]*. Moscow: Izd-vo NTS ENAS, 2004, 232 p.
21. Available at: <https://www.bobcat.com/cis/ru/index>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Овчинников.

Баранник Александр Юрьевич – Федеральное государственное бюджетное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, федеральный центр науки и высоких технологий (ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)); e-mail: auba@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: 89166951214; к.т.н., с.н.с.; ведущий научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра.

Лагутина Анна Викторовна – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; тел.: 89057118834; старший научный сотрудник 6 научно-исследовательского центра.

Дудоров Евгений Александрович – Научно-производственное объединение «Андроидная техника»; e-mail: dudorov@npo-at.com; г. Москва, Россия; тел. 8904974-7199; к.т.н.; доцент; исполнительный директор.

Barannik Alexander Yuryevich – Federal State Budgetary Establishment «All-Russian Scientific Research Institute for Civil Defense and Emergency of the EMERCOM of Russia» (Federal Science and High Technologies Center) (VNI GOChS (FC)); e-mail: auba@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79166951214; cand. of eng. sc.; senior researcher; leading researcher of the 6th Research Center.

Lagutina Anna Viktorovna – e-mail: anya-lagutina@yandex.ru; phone: +79057118834; senior researcher of the 6th Research Center.

Dudorov Evgeny Alexandrovich – Scientific and Production Association "Android technology"; e-mail: dudorov@npo-at.com; Moscow, Russia; phone: +79049747199; cand. of eng. sc.; associate professor; Executive Director.

УДК 007:52

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-192-204

А.А. Кабанов, А.В. Зуев, А.Н. Жирабок, В.Ф. Филаретов, В.А. Крамарь

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРИВОДАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

В работе рассматривается задача идентификации дефектов в приводах робототехнических систем, модель динамики которых описывается линейными дифференциальными уравнениями. Решение задачи идентификации дефектов предложено искать на основе решения вспомогательной задачи оптимального управления для динамической системы, в которой роль неизвестной вектор-функции, описывающей возникающие дефекты, выполняет некоторое вспомогательное управление, которое должно обеспечить минимум функционалу невязки. На основе полученного решения вспомогательной задачи оптимального управления предложен диагностический наблюдатель дефектов. При этом сам дефект находится через решение соответствующего алгебраического уравнения Риккати и дифференциального уравнения для вспомогательной переменной. В отличие от популярных подходов к решению задачи идентификации дефектов, основанных на наблюдателях, работающих в скользящем режиме, предлагаемый метод позволяет расширить класс систем, для которых может быть решена задача идентификации. Известно, что методы проектирования наблюдателей скользящего режима накладывают определенные ограниче-

ния на рассматриваемые системы. Предложенный подход на основе оптимального управления может дать результаты и для систем с нелинейной динамикой. В этом случае, вероятно, эффективными будут методы приближенного решения задач оптимального управления, основанные на представлении системы в линейной форме с коэффициентами, зависящими от состояния (так называемый метод *State-dependent Riccati Equation, SDRE*). Совершенствование предложенного метода в этом направлении будет являться предметом последующих исследований. Изложенная теория показана на примере идентификации дефектов в приводе постоянного тока. Рассмотрены разные случаи для системы с полными наблюдениями (известен весь вектор состояния) и с неполными наблюдениями. На моделировании было показано, что качество идентификации дефектов можно повысить за счет выбора соответствующих значений матриц штрафов в функционале невязки, при этом можно добиться хорошего диагностирования отдельно по различным каналам входа дефектов. В работе представлены рекомендации по выбору матриц штрафов. Результаты моделирования подтвердили работоспособность синтезированных с помощью предложенного метода диагностических наблюдателей.

Линейные системы; дефекты; идентификация; наблюдатели; оптимальное управление; привод.

A.A. Kabanov, A.V. Zuev, A.N. Zhirabok, V.F. Filaretov, V.A. Kramar

IDENTIFICATION OF FAULTS IN DRIVES BASED ON OPTIMAL CONTROL METHODS

*The paper exams the problem of identifying faults in the drives of robotic systems, the dynamics model of which is described by linear differential equations. It is proposed to search for a solution to the fault identification problem based on the solution of an auxiliary optimal control problem for a dynamical system in which the role of an unknown vector function describing emerging faults is performed by some auxiliary control, which should provide a minimum for the residual functional. Based on the solution of the auxiliary optimal control problem, a fault diagnostic observer is proposed. In this case, the fault itself is found through the solution of the corresponding algebraic Riccati equation and the differential equation for the auxiliary variable. Unlike popular approaches to solving the problem of fault identification based on observers operating in a sliding mode, the proposed method allows us to expand the class of systems for which the identification problem can be solved. It is known that the methods of sliding mode observers design impose certain restrictions on the systems under consideration. The proposed approach based on optimal control can also give results for systems with nonlinear dynamics. In this case, methods of approximate solution of optimal control problems based on the representation of the system in linear form with state-dependent coefficients (the so-called *State-dependent Riccati Equation, SDRE*) are likely to be effective. The improvement of the proposed method in this direction will be the subject of further research. The stated theory is shown on the example of fault identification in a DC drive. Different cases are considered for a system with complete observations (the entire state vector is known) and with incomplete observations. It was shown during the simulation that the quality of faults identification can be improved by selecting the appropriate values of the penalty matrices in the residual functional, while it is possible to achieve good diagnostics separately through various channels of faults occurrence. The paper presents recommendations on the choice of penalty matrices. The simulation results confirmed the operability of the diagnostic observers synthesized using the proposed method.*

Linear systems; defects; identification; observers; optimal control; drive.

Введение. Различные промышленные предприятия в повседневной деятельности используют множество сложных устройств и установок. На этих установках могут возникать различные неисправности и дефекты, вызванные специфическими условиями окружающей среды и внутренними условиями. Из-за таких дефектов поведение объекта может существенно отличаться от заданного. Сами эти дефекты могут возникать в различных компонентах систем, в частности, в исполнитель-

ных механизмах и датчиках, инициируя неожиданные изменения параметров системы. Для предотвращения критических повреждений систем следует использовать методы обнаружения и идентификации этих дефектов.

Сегодня разработано множество методов идентификации; один из них основан на наблюдателях, работающих в скользящем режиме, и использует особенности скользящего движения [1]. Эти наблюдатели используются для оценки состояния и неизвестных входных данных, идентификации неисправностей и управления отказоустойчивостью в различных системах [2–10]. Чтобы гарантировать существование скользящего движения, система должна быть минимально-фазовой, то есть инвариантные нули системы должны быть устойчивыми; кроме того, должно выполняться условие соответствия [11]. Эти требования накладывают ограничения на класс систем, для которых могут быть разработаны такие наблюдатели, работающие в скользящем режиме.

Чтобы ослабить условие соответствия, были разработаны различные методы [5, 12–15]. Эти методы позволяют решить проблему за счет сложной структуры схемы идентификации неисправностей. Кроме того, система все же должна быть минимально-фазовой, и при этом могут возникнуть большие ошибки идентификации. Условие минимально-фазовости смягчено в [16] и [17] до требования только сильной обнаруживаемости и обнаруживаемости соответственно.

В данной работе для решения задачи идентификации дефектов предлагается новый подход, основанный на методах оптимального управления. При этом идентификация дефектов выполняется на основе решения вспомогательной задачи оптимального управления для динамической системы, в которой роль неизвестной вектор-функции, описывающей возникающие дефекты, выполняет некоторое вспомогательное управление, которое должно обеспечить минимум функционалу невязки. На основе полученного решения вспомогательной задачи оптимального управления в работе предложен диагностический наблюдатель дефектов. При этом сам дефект находится через решение соответствующего уравнения Риккати и дифференциального уравнения для вспомогательной переменной.

Предложенный метод позволяет расширить класс систем, для которых может быть решена задача идентификации дефектов.

Постановка задачи. Рассмотрим класс технических систем, описываемых линейной моделью вида

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Dd(t), \quad x(t_0) = x_0, \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$ и $y(t) \in R^l$ – векторы состояния, управления и выхода, соответственно; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $D \in R^{n \times q}$ и $C \in R^{l \times n}$ – известные постоянные матрицы; $d(t) \in R^q$ – вектор-функция, описывающая дефекты: при их отсутствии $d(t) = 0$, при появлении дефекта $d(t)$ становится неизвестной функцией времени. Предполагается, что матрица D и функция $d(t)$ описывают дефекты, которые возможны в системе, причем заранее неизвестно, какой из них может возникнуть.

Пусть известна история измерений $y(t)$ фазовых переменных $x(t)$ системы (1) на интервале $t \in [t_0, t_f]$, на котором система управляется некоторым законом, который, не умаляя общности, можно представить в виде $u(t) = G(y, t)$.

В работе ставится задача разработки метода построения наблюдателей для идентификации элементов вектора $d(t)$. Задача состоит в нахождении по измерениям $y(t)$ такой аппроксимации $d_*(t, t_f)$ неизвестной функции дефекта $d(t)$, что

$$\lim_{t_f \rightarrow \infty} d_*(t, t_f) = d(t).$$

Вспомогательная задача оптимального управления. Для решения задачи идентификации дефектов в системе (1) рассмотрим вспомогательную задачу оптимального управления для системы

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az + B_v v(t) + Bu(t), \quad z(t_0) = x_0, \\ y_z(t) &= Cz(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где функция $v(t)$ рассматривается как вспомогательное управление; матрица $B_v \in R^{n \times w}$ определяет в каких уравнениях предполагается выявлять дефект. В случае если известна матрица $D \in R^{n \times q}$, то следует принять $B_v = D$ (далее будем считать, что $B_v = D$). В противном случае B_v заполняется так, что элемент $[B_v]_{i,j} = 1$, если предполагаем что дефект j возникает в уравнении i , остальные элементы заполняются нулями.

Роль неизвестной вектор-функции $d(t)$, описывающей дефекты в (1), в системе (2) выполняет вспомогательное управление $v(t)$, которое выбирается так, чтобы перевести систему (2) из произвольного состояния $z(t_0) = x_0$ в состояние $y_z(t_f) = y(t_f)$ при $t_f \rightarrow \infty$ и при этом минимизировать функционал невязки

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (e^T Q e + v^T R v) dt \rightarrow \min_v, \quad (3)$$

где $e(t) = y_z(t) - y(t) \in R^l$ – вектор невязки, $Q \in R^{n \times n}$ – положительно-полуопределённая матрица; $R \in R^{m \times m}$ – положительно определенная матрица; T – символ транспонирования.

Связь возмущенной дефектами динамической системы (1) с соответствующей вспомогательной задачей оптимального управления (2), (3) означает, что траектории вспомогательной системы оптимального управления могут рассматриваться как отклонения от невозмущенного состояния системы (1) под влиянием дефектов. Таким образом, система со вспомогательным законом оптимального управления позволяет оценивать дефекты. В определенном смысле аналогичный подход используется в задачах анализа больших отклонений [18, 19].

Задача идентификации дефектов состоит в том, чтобы как можно более точно восстановить по измерениям $y(t)$ движение $z(t)$ вспомогательной системы (2), т.е. нужно построить оптимальное в смысле (3) управление $v(t)$ и порождаемую им траекторию системы (2) такие, что $\|y_z(t) - y(t)\| \rightarrow 0$, $\|v(t) - d(t)\| \rightarrow 0$ при $t_f \rightarrow \infty$.

Решение вспомогательной задачи оптимального управления. По сути задача (2), (3) является задачей построения линейно-квадратичного управления для следящей системы с возмущениями. Приведем ее решение.

Для задачи (2), (3) запишем Гамильтониан

$$H = \frac{1}{2} (z - x)^T C^T Q C (z - x) + \frac{1}{2} v^T R v + \lambda^T (Az + Dv + Bu),$$

определим оптимальное управление

$$\frac{\partial H}{\partial v} = 0 \Rightarrow Rv + D^T \lambda = 0 \Rightarrow v = -R^{-1} D^T \lambda, \quad (4)$$

а также составим уравнения для сопряженной переменной и переменной состояния:

$$\dot{z}(t) = \frac{\partial H}{\partial \lambda} \Rightarrow Az + Dv + Bu = Az - DR^{-1}D^T \lambda + Bu, \quad z(t_0) = x_0,$$

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H}{\partial z} \Rightarrow \dot{\lambda}(t) = -A^T \lambda - C^T QCz + C^T QCx.$$

Последнее соотношение можно записать в векторно-матричном виде

$$\begin{bmatrix} \dot{z}(t) \\ \dot{\lambda}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -DR^{-1}D^T \\ -C^T QC & -A^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ C^T Q \end{bmatrix} y. \quad (5)$$

Общий случай задания граничных условий. Рассмотрим общий случай ненулевых граничных условий $z(t_0) \neq 0$, $z(t_f) \neq 0$. С учетом линейности системы (5) предположим, что состояние и сопряженная переменная линейно связаны зависимостью вида

$$z(t) = M(t)\lambda(t) + g(t), \quad (6)$$

где $M(t)$ – невырожденная матрица, $g(t)$ – некоторая вектор-функция. Отметим, преобразование (6) называют преобразованием Риккати, оно эффективно при вычислении плохо обусловленных двухточечных краевых задач [20]. Аналогичный подход используется в [21, 22] для специфических задач терминального управления.

Подставим (6) в (5) и получим

$$\begin{aligned} v(t) &= -R^{-1}D^T M(t)^{-1}(z(t) - g(t)), \\ (-\dot{M}(t) + AM(t) + M(t)A^T - DR^{-1}D^T + M(t)C^T QCM(t))\lambda(t) &= \\ &= \dot{g}(t) - Ag(t) - Bu(t) - M(t)C^T QCg(t) + M(t)C^T Qy(t). \end{aligned}$$

Перенеся члены второго уравнения в левую часть, имеем

$$\begin{aligned} (-\dot{M}(t) + AM(t) + M(t)A^T - DR^{-1}D^T + M(t)C^T QCM(t))\lambda(t) - \\ \dot{g}(t) - Ag(t) - Bu(t) - M(t)C^T QCg(t) + M(t)C^T Qy(t) = 0. \end{aligned}$$

Последнее соотношения должно быть справедливо для любого значения $\lambda(t)$, что приводит к системе уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{M}(t) &= AM(t) + M(t)A^T - DR^{-1}D^T + M(t)C^T QCM(t), \\ \dot{g}(t) &= Ag(t) + Bu(t) + M(t)C^T QCg(t) - M(t)C^T Qy(t). \end{aligned} \quad (7)$$

При $t = t_0$ из (6) имеем $z(t_0) = M(t_0)\lambda(t_0) + g(t_0)$, а поскольку $\lambda(t_0)$ не известна, то для удовлетворения начальных условий нужно принять $M(t_0) = 0$, $z(t_0) = g(t_0)$.

При $t = t_f$ из (6) имеем $z(t_f) = M(t_f)\lambda(t_f) + g(t_f)$, а поскольку $\lambda(t_f)$ также является неизвестным, то для удовлетворения граничных условий также следует принять $M(t_f) = 0$, $z(t_f) = g(t_f)$.

Подставляя (7) в (4), окончательно для управления $v(t)$ имеем:

$$v(t) = -R^{-1}D^T M(t)^{-1}(z(t) - g(t)). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (2), получаем следующее выражение для диагностического наблюдателя

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) - DR^{-1}D^T M(t)^{-1}(z(t) - g(t)) + Bu(t), \quad z(t_0) = x_0, \\ y_z(t) &= Cz(t), \end{aligned} \quad (9)$$

где $M(t)$ и $g(t)$ определяются как решение уравнений (7) с начальными условиями $M(t_0) = 0$, $z(t_0) = g(t_0)$. Устойчивость наблюдателя (9) может быть обеспечена за счет введения обратной связи по сигналу $e(t) = y_z(t) - y(t)$; этот вопрос требует самостоятельного рассмотрения.

Чтобы получить решение задачи (2), (3) при $t_f \rightarrow \infty$ в соотношениях (7), (8) нужно принять $t_f \rightarrow \infty$. Решение матричного уравнения (7) для $M(t)$ при условии управляемости и наблюдаемости системы (2) стремится к установившемуся значению \bar{M} , которое является решением алгебраического уравнения [21, 22]

$$0 = A\bar{M} + \bar{M}A^T - DR^{-1}D^T + \bar{M}C^T Q C \bar{M}, \quad (11)$$

а функция $g(t)$ – это решение дифференциального уравнения

$$\dot{\bar{g}} = A\bar{g} + Bu + \bar{M}C^T Q C \bar{g} - \bar{M}C^T Q y, \quad \bar{g}(t_0) = z(t_0). \quad (12)$$

Диагностический наблюдатель на бесконечном интервале времени будет иметь вид (9), в котором g и M заменены на \bar{g} и \bar{M} соответственно.

Пример применения для идентификации дефектов в электроприводе. Предложенный метод демонстрируется на решении задачи идентификации дефектов в электроприводе постоянного тока. Ниже дано описание электропривода на основе двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Уравнение электрической цепи:

$$L_d \frac{di(t)}{dt} + R_d i(t) + k_\omega \omega(t) = k_y U(t).$$

Уравнение механической цепи:

$$M_d \dot{\omega}(t) = k_m I(t) = J_d \dot{\omega}(t),$$

где $\omega(t)$, $\dot{\omega}(t)$ – соответственно, скорость и ускорение вращения ротора электродвигателя; I_a – ток якоря электродвигателя; R_d – активное сопротивление цепи якоря; L_d – индуктивность цепи якоря; k_ω – коэффициент противо-э.д.с.; k_y – коэффициент усиления усилителя мощности; M_d – общий момент, развиваемый электродвигателем; k_m – коэффициент крутящего момента; J_d – момент инерции ротора электродвигателя и вращающихся частей редуктора, приведенный в этому ротору; $U(t)$ – входное напряжение электропривода;

После введения фазовых координат $x_1(t) = \alpha_n(t)$, $x_2(t) = \omega(t)$ и $x_3(t) = I(t)$, модель можно представить в нормальной форме

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= \frac{1}{i_p} x_2(t), \quad \dot{x}_2(t) = \frac{k_m}{J_d} x_3(t), \\ \dot{x}_3(t) &= -\frac{k_\omega}{L_d} x_2(t) - \frac{R_d}{L_d} x_3(t) + \frac{k_y}{L_d} u(t). \end{aligned}$$

Далее модель можно переписать в матричной форме

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (14)$$

где $A \in R^{3 \times 3}$ – матрица динамических свойств электропривода; $x(t) \in R^{3 \times 1}$ – вектор фазовых координат; $B \in R^{3 \times 1}$ – матрица-столбец коэффициентов усиления при управляющих воздействиях; $y(t) \in R^{1 \times 1}$ – измеряемые датчиками фазовые коор-

динаты; $C \in R^{l \times 1}$ – матрица выхода, связывающая вектор фазовых координат с вектором измерений; v – количество фазовых координат (порядок); l – количество датчиков, измеряющих фазовые координаты

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1/i_p & 0 \\ 0 & 0 & k_M/J_\partial \\ 0 & -k_\omega/L_\partial & -R_\partial/L_\partial \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_y/L_\partial \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \alpha_H \\ \dot{\alpha} \\ I \end{bmatrix}, \quad u = U,$$

Эксперимент 1 (полные измерения состояния системы). Предполагаем, что в системе наблюдаемы все переменные состояния, т.е. $y = x$. Система управляется некоторым регулятором по первой переменной состояния, заданное значение равно единице. При этом предполагаем, что возмущение, инициированное дефектом, может возникнуть в любом из трех уравнений состояния, в такой ситуации выберем $B_v = E$, где E – единичная 3×3 матрица.

Общий вид вектор-функции $d(t)$, описывающей дефекты, приведен на рис. 1, при этом матрица распределения сигналов дефектов в системе (1) сгенерирована случайным образом и равна

$$D = \begin{bmatrix} 0.965 & 0.957 & 0.142 \\ 0.158 & 0.485 & 0.422 \\ 0.971 & 0.8 & 0.916 \end{bmatrix}.$$

Для исследования влияния матриц штрафов Q , R в критерии качества наблюдения (2) примем матрицы равными единичным соответствующих размерностей, результат моделирования показан на рис. 2, откуда видно, что качество оценки дефектов неудовлетворительное.

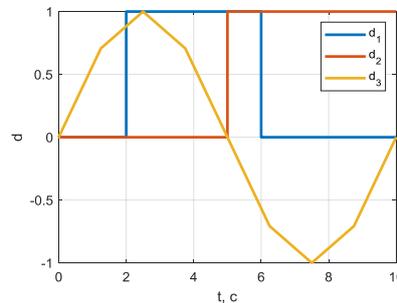


Рис. 1. Вид вектор-функции $d(t)$

Увеличим коэффициенты штрафа на отклонение между выходом реальной системы и диагностического наблюдателя – $Q = \text{diag}(1,1,1) \cdot 10^2$, $R = \text{diag}(1,1,1) \cdot 10^5$, и проведем моделирование повторно. Из результатов (рис. 3) видно, что качество оценки влияния дефекта в первом и втором уравнениях существенно улучшилось, т.е. можно сделать вывод, что добиться нужной точности оценки диагностического наблюдателя для системы (14) можно путем увеличения коэффициентов штрафа в матрице Q . При этом видно, что оценка влияния дефекта в третьем уравнении практически не изменилась.

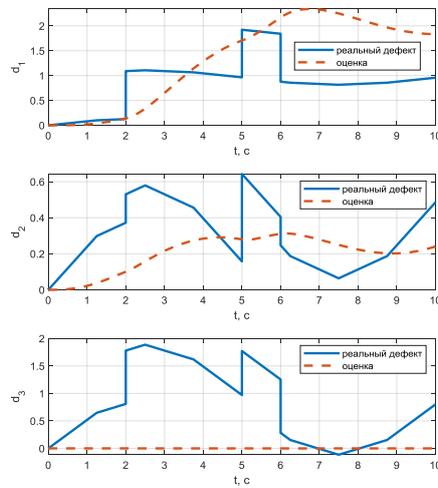


Рис. 2. Результат работы наблюдателя при единичных Q, R

Для повышения качества этой оценки увеличим отдельно третий диагональный коэффициент штрафа в матрице Q (), и также выполним дополнительную настройку параметров штрафа в матрице R , соответствующих третьему элементу вектор-функции дефекта. Применив наблюдатель (13) с настроенными таким образом параметрами, получим оценку вектор-функции дефекта (рис. 4). Видно, что функция дефекта в третьем уравнении оценивается с небольшим перерегулированием (около 10 %), качество оценки приемлемое.

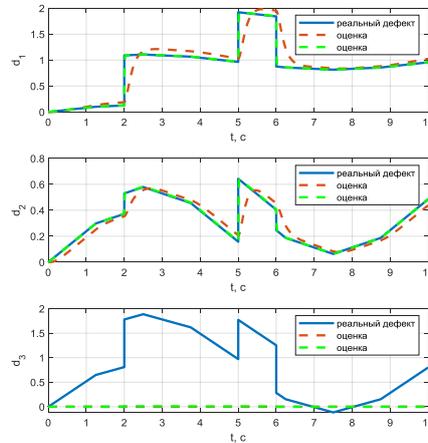


Рис. 3. Результат работы наблюдателя при разных значениях $Q = \text{diag}(1,1,1)10^2$, $Q = \text{diag}(1,1,1)10^5$.

Эксперимент 2 (неполные измерения состояния системы). Предполагаем, что в системе наблюдаемы только первая и вторая переменные состояния, т.е. $y=Cx$. Как и в первом эксперименте предполагаем, что возмущение, инициированное дефектом, может возникнуть в любом из трех уравнений состояния, в такой ситуации выберем $B_v = E$, где E – единичная 3×3 матрица, общий вид вектор-функции $d(t)$, описывающей дефекты, приведен на рис. 1.

Настройку коэффициентов штрафов возьмем из эксперимента 1. Результат моделирования показан на рис. 5, откуда видно, что оценка дефекта в первом и втором уравнениях по-прежнему хорошего качества, а в уравнении 3 – неудовлетворительного. При этом если сравнить состояния системы и диагностического наблюдателя при влиянии указанных дефектов (рис. 6), видно, что они практически совпадают, т.е. вероятно дефект в третьем уравнении практически не влияет на состояние системы, потому что при неполных измерениях не идентифицируется.

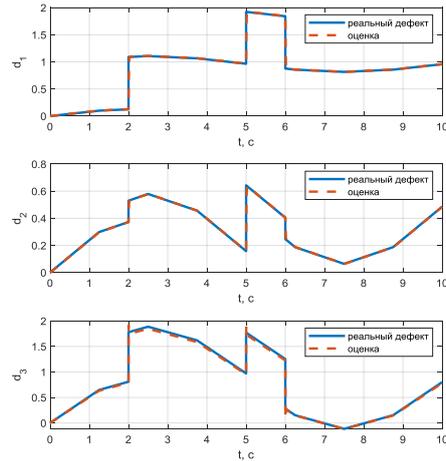


Рис. 4. Результат работы наблюдателя при разных значениях, $Q = \text{diag}(1,1,1)10^5$, $Q = \text{diag}(1,1,1)10^5$, R

Предполагаем, что в системе наблюдаемы только первая и третья переменные состояния, т.е. $y = Cx$. Как и в первом эксперименте предполагаем, что возмущение, инициированное дефектом, может возникнуть в любом из трех уравнений состояния, в такой ситуации выберем $B_v = E$, где E – единичная 3×3 матрица, общий вид вектор-функции $d(t)$, описывающей дефекты, приведен на рис. 1.

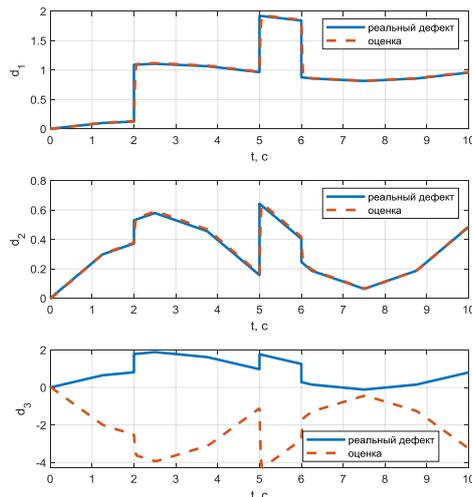


Рис. 5. Результат работы наблюдателя при разных значениях при измерениях первой и второй переменных состояния

Результат показан на рис. 7, видно, что качество идентификации дефекта в первом и во втором уравнениях неудовлетворительное, а в третьем уравнении приемлемое. Здесь специальной настройкой параметров наблюдателя можно добиться приемлемого качества по некоторым из каналов. Требуется дополнительные исследования.

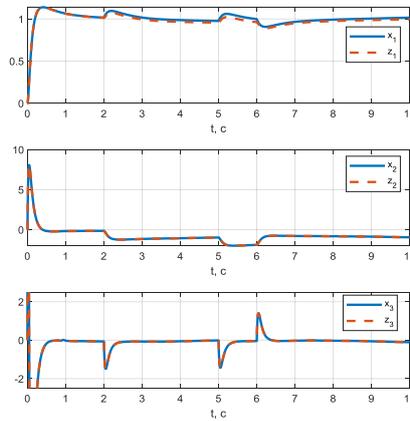


Рис. 6. Графики состояния системы и диагностического наблюдателя

Качество идентификации с использованием оптимального диагностического наблюдателя (9), (11), (12) зависит от выбора матриц штрафов Q и R . При их выборе можно руководствоваться следующими рекомендациями. Недиагональные элементы в этих матрицах отражают перекрестные связи между соответствующими переменными вектора выхода и дефектов. При отсутствии информации о перекрестных связях между дефектами матрицу R рекомендуется выбирать диагональной, эта рекомендация также относится и к матрице Q при отсутствии перекрестных связей наблюдаемых выходов. Если восстановленный сигнал, идентифицирующий дефект, имеет большую амплитуду, то соответствующие диагональные элементы R требуется уменьшить. При больших амплитудах невязки $e(t) = x(t) - z(t)$ следует увеличить соответствующие элементы Q .

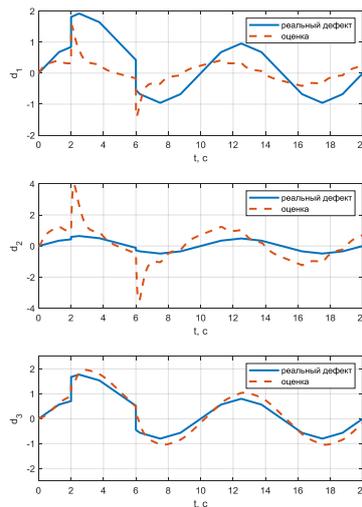


Рис. 7. Результат работы наблюдателя при разных значениях при измерениях первой и третьей переменных состояния

Заключение. В работе решена задача идентификации дефектов в системах, описываемых линейными динамическими моделями. Показан пример идентификации дефектов для электропривода на базе двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. На основе полученного решения вспомогательной задачи оптимального управления предложен диагностический наблюдатель дефектов. Будущие исследования будут направлены на поиск условий, гарантирующих сходимость вспомогательного оптимального управления к функции дефекта при неполных измерениях системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение Минобрнауки РФ № 075-03-2021-092/5 от 29.09.2021, FEFM-2021-0014 № 121111600136-3, а также Программа «Приоритет2030».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Utkin V.* Sliding modes in control optimization. – Berlin: Springer, 1992. – 264 p.
2. *Chan J., Tan C., Trinh H.* Robust fault reconstruction for a class of infinitely unobservable descriptor systems // *Int. J. Systems Science.* – 2017. – Vol. 48 (8). – P. 1646-1655.
3. *Edwards C., Spurgeon S., Patton R.* Sliding mode observers for fault detection and isolation // *Automatica.* – 2000. – Vol. 36. – P. 541-553.
4. *Tan E., Edwards C.* Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor fault // *Int. J. Robust and Nonlinear Control.* – 2003. – Vol. 13 (5). – P.443-463.
5. *Tan C.P., Edwards C.* Robust fault reconstruction using multiple sliding mode observers in cascade: development and design // *Proc. American Contr. Conf., St. Louis, USA, 2009.* – P. 3411-3416.
6. *Yan X., Edwards C.* Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding modes observer // *Automatica.* – 2007. – Vol. 43. – P. 1605-1614.
7. *Alwi H., Edwards C.* Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation // *Automatica.* – 2008. – Vol. 44. – P. 1859-1866.
8. *Edwards C., Alwi H., and Tan C.* Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control with application to aerospace systems // *Int. J. Applied Mathematics and Computer Sciences.* – 2012. – Vol. 22. – P. 109-124.
9. *Zhirabok A., Zuev A., Shumsky A.* Fault diagnosis in linear systems via sliding mode observers // *Int. J. Control.* – 2021. – Vol. 94. – P. 327-335.
10. *Жирабок А.Н., Зюев А.В., Филаретов В.Ф., Шумский А.Е.* Идентификация дефектов на основе скользящих наблюдателей с ослабленными условиями существования // *Известия вузов. Приборостроение.* – 2021. – Т. 64, № 4. – С. 167-172.
11. *Defoort M., Veluvolu K., Rath J., Djemai M.* Adaptive sensor and actuator fault estimation for a class of uncertain Lipschitz nonlinear systems // *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing.* – 2016. – Vol. 30. – P. 271-283.
12. *Bejarano F., Fridman L.* High-order sliding mode observer for linear systems with unbounded unknown inputs // *Int. J. Control.* – 2010. – Vol. 83. – P. 1920-1929.
13. *Floquet T., Edwards C., Spurgeon S.* On sliding mode observers for systems with unknown inputs // *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing.* – 2007. – Vol. 21. – P. 638-656.
14. *Fridman L., Levant A., Davila J.* Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding modes // *Int. J. Systems Science.* – 2007. – Vol. 38. – P. 773-791.
15. *Yang J., Zhu F., Sun X.* State estimation and simultaneous unknown input and measurement noise reconstruction based on associated observers // *Int. J. Adapt Control and Signal Processing.* – 2013. – Vol. 27. – P. 846-858.
16. *Bejarano F., Fridman L., Pozhyak A.* Unknown input and state estimation for unobservable systems // *SIAM J. Control Opt.* – 2009. – Vol. 48. – P. 1155-1178.
17. *Wang X., Tan C., Zhou D.* A novel sliding mode observer for state and fault estimation in systems not satisfying matching and minimum phase conditions // *Automatica.* – 2017. – Vol. 79. – P. 290-295.
18. *Дубовик С.А., Кабанов А.А.* Функционально устойчивые системы управления: асимптотические методы синтеза: монография. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 249 с.

19. *Кабанов А.А., Дубовик С.А.* Численные методы контроля редких событий в нелинейных стохастических системах // *Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2021. – Т. 22, № 6. – С. 291-297.
20. *Mufti I.H., Chow C.K., Stock F.T.* Solution of ill-conditioned linear two-point boundary value problems by the Riccati transformation // *SIAM Rev.* – 1969. – Vol. 11 (4). – P. 616-619.
21. *Брайсон А., Хо Ю-шун.* Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
22. *Naidu D.S.* Optimal control systems. *Electrical Engineering Handbook.* – Florida, Boca Raton: CRC Press, 2003. – 275 p.

REFERENCES

1. *Utkin V.* Sliding modes in control optimization. Berlin: Springer, 1992, 264 p.
2. *Chan J., Tan C., Trinh H.* Robust fault reconstruction for a class of infinitely unobservable descriptor systems, *Int. J. Systems Science*, 2017, Vol. 48 (8), pp. 1646-1655.
3. *Edwards C., Spurgeon S., Patton R.* Sliding mode observers for fault detection and isolation, *Automatica*, 2000, Vol. 36, pp. 541-553.
4. *Tan E., Edwards C.* Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor fault, *Int. J. Robust and Nonlinear Control*, 2003, Vol. 13 (5), pp.443-463.
5. *Tan C.P., Edwards C.* Robust fault reconstruction using multiple sliding mode observers in cascade: development and design, *Proc. American Contr. Conf., St. Louis, USA, 2009*, pp. 3411-3416.
6. *Yan X., Edwards C.* Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding modes observer, *Automatica*, 2007, Vol. 43, pp. 1605-1614.
7. *Alwi H., Edwards C.* Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation, *Automatica*, 2008, Vol. 44, pp. 1859-1866.
8. *Edwards C., Alwi H., and Tan C.* Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control with application to aerospace systems, *Int. J. Applied Mathematics and Computer Sciences*, 2012, Vol. 22, pp. 109-124,
9. *Zhirabok A., Zuev A., Shumsky A.* Fault diagnosis in linear systems via sliding mode observers, *Int. J. Control*, 2021, Vol. 94, pp. 327-335.
10. *Zhirabok A., Zuev A., Filaretov V.F., Shumsky A.* Identifikaciya defektov na osnove skol'zyashchikh nablyudateley s oslablennymi usloviyami sushchestvovaniya [Identification of defects based on sliding observers with weakened existence conditions], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2021, Vol. 64 (4), pp. 167-172.
11. *Defoort M., Veluvolu K., Rath J., Djemai M.* Adaptive sensor and actuator fault estimation for a class of uncertain Lipschitz nonlinear systems, *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 2016, Vol. 30, pp. 271-283.
12. *Bejarano F., Fridman L.* High-order sliding mode observer for linear systems with unbounded unknown inputs, *Int. J. Control*, 2010, Vol. 83, pp. 1920-1929.
13. *Floquet T., Edwards C., Spurgeon S.* On sliding mode observers for systems with unknown inputs, *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 2007, Vol. 21, pp. 638-656.
14. *Fridman L., Levant A., Davila J.* Observation of linear systems with unknown inputs via high-order sliding modes, *Int. J. Systems Science*, 2007, Vol. 38, pp. 773-791.
15. *Yang J., Zhu F., Sun X.* State estimation and simultaneous unknown input and measurement noise reconstruction based on associated observers, *Int. J. Adapt Control and Signal Processing*, 2013, Vol. 27, pp. 846-858.
16. *Bejarano F., Fridman L., Pozhyak A.* Unknown input and state estimation for unobservable systems, *SIAM J. Control Opt.*, 2009, Vol. 48, pp. 1155-1178.
17. *Wang X., Tan C., Zhou D.* A novel sliding mode observer for state and fault estimation in systems not satisfying matching and minimum phase conditions, *Automatica*, 2017, Vol. 79, pp. 290-295.
18. *Dubovik S.A., Kabanov A.A.* Funktsional'no ustoychivye sistemy upravleniya: asimptoticheskie metody sinteza [Functionally stable control systems: asymptotic methods of synthesis]. М.: INFRA-M, 2019, 249 p.
19. *Kabanov A.A., Dubovik S.A.* Chislennyye metody kontrolya redkikh sobytiy v nelineynykh stokhasticheskikh sistemakh [Numerical methods for monitoring rare events in nonlinear stochastic systems], *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2021, Vol. 22 (6), pp. 291-297.

20. *Mufti I.H., Chow C.K., Stock F.T.* Solution of ill-conditioned linear two-point boundary value problems by the Riccati transformation, *SIAM Rev.*, 1969, Vol. 11 (4), pp. 616-619.
21. *Bryson A., Ho Yu-shih.* *Prikladnaya teoriya optimal'nogo upravleniya* [Applied theory of universal control]. Moscow: MIR, 1972, 544 p.
22. *Naidu D.S.* Optimal control systems. Electrical Engineering Handbook. Florida, Boca Raton: CRC Press, 2003, 275 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. А.В. Малолетов.

Кабанов Алексей Александрович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет»; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; г. Севастополь, Россия; тел.: +79787622582; зав. кафедрой; к.т.н.; доцент.

Крамарь Вадим Александрович – e-mail: kramarv@mail.com.com; тел: +79787927340; г.н.с.; д.т.н. профессор.

Зуев Александр Валерьевич – Институт проблем морских технологий ДВО РАН»; e-mail: zuev@dvo.ru; г. Владивосток, Россия; тел.: +79149617735; зав. лабораторией; к.т.н.; доцент.

Филаретов Владимир Федорович – e-mail: filaretov@inbox.ru; тел. +79146890082; зав. лабораторией; д.т.н.; профессор.

Жиравок Алексей Нилович – Дальневосточный федеральный университет; e-mail: zhirabok@mail.ru; г. Владивосток, Россия; д.т.н.; профессор.

Kabanov Aleksei Alexandrovich – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University"; e-mail: kabanovaleksey@gmail.com; Sevastopol, Russia; phone: +79787622582; head of the department; cand. of eng. sc.; associate hrofessor.

Kramar Vadim Alexandrovich – e-mail: kramarv@mail.com.com; phone: +79787927340; Chief researcher; dr. of eng. sc; professor.

Zuev Aleksandr Valerievich – Institute of Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: zuev@dvo.ru; Vladivostok, Russia; phone: +79149617735; head of the laboratory; cand. of eng. sc.; associate professor.

Filaretov Vladimir Fedorovich – e-mail: filaretov@inbox.ru; phone: +79146890082; head of the laboratory; dr. of eng. sc; professor.

Zhirabok Aleksei Nilovich – Far Eastern Federal University; e-mail: zhirabok@mail.ru; Vladivostok, Russia; dr. of eng. sc; professor.

УДК 621.317.39.084.2

DOI 10.18522/2311-3103-2022-1-204-217

Р.А. Жигалов, С.А. Матюнин, А.А. Иголкин

БЕСКОНТАКТНЫЙ ФЕРРОЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КЛАПАНА

Целью исследования является разработка бесконтактного феррозондового датчика положения для контроля открытого/закрытого состояния клапана. Существует немало примеров использования в современной технике элементов или устройств, взаимодействующих с магнитным полем. Одной из актуальнейших задач является использование влияния магнитного поля в качестве средства контроля или составляющей управляющей среды. Применение магнитооптических датчиков для контроля функционирования технических объектов обусловлено их бесконтактным способом измерения, возможностью измерения не только магнитных, но и других различных физических величин, относительной простотой, надежностью и дешевой конструкцией чувствительного элемента, гибкостью в применении, эксплуатацией в низкотемпературных и высокотемпературных средах. Одним из датчиков подобного типа является феррозондовый преобразователь маг-