

For citation:

Khubeev M. K. Resource Efficient Proportional-Integrated Controller, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 723–728.

DOI: 10.17587/mau.18.723-728

References

1. **Matveikin V. G., Muromcev D. Ju.** *Teoreticheskie osnovy jenergosberegajushhego upravlenija dinamicheskimi rezhimami ustanovok proizvodstvenno-tehnicheskogo naznacheniya* (Theoretical bases of energy saving management of the dynamic modes of installations of technological appointment), Moscow, Mashinostroenie 1, 2007, 128 p. (in Russian).
2. **Petrishhev V. F.** *Jenergosberegajushhij algoritm upravlenija pereorientaciej kosmicheskogo apparata po zashumlennym izmerenijam* (Power-Efficient Algorithm for the Spacecraft Reorientation Control by Noisy Measurements), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 7, pp. 474–483 (in Russian).
3. **Raj C. T., Srivastava S. P., Agarwal P.** Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 61–70.

4. **Hensel B.** et al. A simple PI controller tuning rule for sensor energy efficiency with level-crossing sampling, *Systems, Signals and Devices (SSD), International Multi-Conference*, 2012, pp. 243–248.

5. **Zhmud' V. A., Kastornyj V. A.** *Koncepcija jenergosberegajushhih reguljatorov* (Concept of energy saving regulators), *Avtomatika i Programmaja Inzhenerija*. 2013, no. 4, pp. 14–21 (in Russian).

6. **Ickovich E. L.** *Sovremennye tendencii razvitiya avtomaticheskoy chasti system upravlenija tehnologicheskimi processami* (Current trends in the development of automatic part of process control system), *Datchiki i Sistemy*, 2015, no. 11, pp. 68–76 (in Russian).

7. **Bespalov A. V., Haritonov N. I.** *Sistemy upravlenija himiko-tehnologicheskimi processami* (Control systems of chemical-technological processes), Moscow, IKC "Akademkniga", 2007, 690 p. (in Russian).

8. **Khubeev M. K.** *Jenergosberegajushhij PI-reguljator* (Energy-saving PI-regulator), *Avtomatizatsija v Promyshlennosti*, 2015, no. 3, pp. 37–39 (in Russian).

9. **Khubeev M. K.** *Jenergosberegajushhij proporcional'no-integral'nyj reguljator* (Energy-saving proportional-integral controller), *Jeneregobezopasnost' i Jenergosberezhenie*, 2014, no. 5, pp. 29–33 (in Russian).

УДК 681.518

DOI: 10.17587/mau.18.728-733

А. Н. Жирабок, д-р техн. наук, проф., zhirabok@mail.ru, **А. Е. Шумский**, д-р техн. наук, проф.,

А. В. Зуев, канд. техн. наук, доц.,

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток,
Институт прикладной математики ДВО РАН, г. Владивосток

Подход к диагностированию линейных систем на основе скользящих наблюдателей¹

Рассматривается задача функционального диагностирования технических систем, описываемых линейными динамическими моделями. Предлагается подход, позволяющий существенно повысить степень робастности процесса диагностирования линейных систем при действии неизвестных внешних возмущений и состоящий из двух этапов: на первом этапе синтезируются скользящие наблюдатели, чувствительные к действующим на систему возмущениям и нечувствительные к дефектам, которые осуществляют оценку этих возмущений; на втором этапе полученные оценки вводятся в диагностические наблюдатели, обеспечивающие обнаружение дефектов. Представлены результаты моделирования, подтверждающие эффективность полученных теоретических результатов.

Ключевые слова: линейные модели, функциональное диагностирование, скользящие наблюдатели, робастность, декомпозиция

Введение

Функциональное диагностирование (ФД) является одним из мощных средств повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем. Оно позволяет осуществлять проверку правильности функционирования системы в процессе выполнения ею своих основных функций и оперативно поставлять информацию о возникающих сбоях и дефектах. За несколько последних десятилетий было разработано множество разнообразных методов ФД на основе диагностических наблюдателей, соотношений паритета и идентификации [1–5]. Одним из них является метод на основе скользящих наблюдателей, который за счет особенностей скользящего режима [6] активно используется на практике для идентификации дефектов и построения отказоустойчивых систем, чему посвящено большое число публикаций [7–11].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-09-00046).

В настоящей работе этот подход предлагается использовать для повышения степени робастности процесса диагностирования за счет совместного использования скользящего и диагностического наблюдателей: с помощью скользящего наблюдателя оценивается возмущение, действующее на объект диагностирования, которое затем используется в качестве исходных данных для диагностического наблюдателя. Под возмущением в данном случае понимается совокупность внешних неконтролируемых воздействий, погрешностей измерительных средств и неточностей используемых моделей.

1. Скользящие наблюдатели, основные соотношения

Рассмотрим класс технических систем, описываемых линейной моделью

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t) + Dd(t) + Lp(t), y(t) = Hx(t). \quad (1.1)$$

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода; $F \in R^{n \times n}$, $G \in R^{n \times m}$, $D \in R^{n \times q}$, $L \in R^{n \times p}$ и $H \in R^{l \times n}$ — известные посто-

янные 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; $\rho \in R^p$ — вектор, описывающий действующее на систему возмущение, $\rho(t)$ предполагается неизвестной функцией времени.

Для решения поставленной задачи коротко напомним основные результаты из работы [7], используемые в настоящей работе, полагая, что $d(t) = 0$.

Предполагается, что система (1.1) удовлетворяет следующим условиям [7]: 1) $p \leq l < n$, H и L — матрицы полного ранга; 2) $\text{rank}(HL) = p$; 3) триплет (F, L, H) — минимально-фазовый, т. е. инвариантные нули матрицы Розенброка для системы (1.1) устойчивы или отсутствуют ([11], стр. 24). Известно [11], что при этих предположениях существует

невырожденное преобразование координат $\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = Mx$ такое, что в новых координатах $z_1 \in R^{n-l}$, $z_2 \in R^l$ уравнения движения системы (1.1) распадаются на две подсистемы уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) &= F_{11}z_1(t) + F_{12}z_2(t) + G_1u(t); \\ \dot{z}_2(t) &= F_{21}z_1(t) + F_{22}z_2(t) + G_2u(t) + L_2\rho(t); \\ y(t) &= z_2(t), \end{aligned} \quad (1.2)$$

первая из которых не зависит от возмущения $\rho(t)$. Если матрица F_{11} в (1.2) устойчива, то можно построить наблюдатель, работающий в скользящем режиме [7]:

$$\begin{aligned} \hat{\dot{z}}_1(t) &= F_{11}\hat{z}_1(t) + F_{12}\hat{z}_2(t) + G_1u(t) - F_{12}e_y(t); \\ \hat{\dot{z}}_2(t) &= F_{21}\hat{z}_1(t) + F_{22}\hat{z}_2(t) + \\ &+ G_2u(t) - (F_{22} - F_{22}^*)e_y(t) + v(t); \\ \hat{y}(t) &= \hat{z}_2(t), \end{aligned} \quad (1.3)$$

где $\hat{y}(t)$ — выход наблюдателя; $\hat{z}(t) = \begin{pmatrix} \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \end{pmatrix}$ — вектор состояния наблюдателя; $e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t)$; F_{22}^* — некоторая устойчивая матрица; разрывная функция $v(t)$ определяется соотношением

$$v(t) = \begin{cases} -q\|L_2\| \frac{Pe_y(t)}{\|Pe_y(t)\|}, & \text{если } e_y(t) \neq 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $P \in R^{p \times p}$ — матрица Ляпунова для F_{22}^* , скаляр q выбирается из условия $\|p\| < q$.

Положим $e_1(t) = \hat{z}_1(t) - z_1(t)$, тогда

$$\begin{aligned} \dot{e}_1(t) &= F_{11}e_1(t); \\ \dot{e}_y(t) &= F_{21}e_1(t) + F_{22}^*e_y(t) + v(t) - L_2\rho(t). \end{aligned}$$

Известно, что скользящий режим позволяет обеспечить равенства $e_y(t) = 0$ и $\dot{e}_y(t) = 0$ за конечное время, поэтому из предыдущих уравнений следует

$$0 = F_{21}e_1(t) + v_{eq}(t) - L_2\rho(t), \quad (1.4)$$

где $v_{eq}(t)$ — сигнал, который может быть аппроксимирован переменной [7]

$$v_{\delta}(t) = -q\|L_2\| \frac{Pe_y(t)}{\|Pe_y(t)\| + \delta},$$

где δ — малое положительное число. Выражение (1.4) может быть использовано для оценки возмущения $\rho(t)$ следующим образом:

$$\rho(t) = -q\|L_2\| (L_2^T L_2)^{-1} L_2^T \frac{Pe_y(t)}{\|Pe_y(t)\| + \delta}.$$

Следует отметить, что правая часть этого выражения вычисляется в реальном времени и зависит только от ошибки $e_y(t)$.

2. Построение наблюдателя

Общее решение. Для использования изложенного выше при решении поставленной задачи строится редуцированная модель динамики системы (1.1), инвариантная к дефекту и чувствительная к возмущению, описываемая уравнением

$$\dot{x}_*(t) = F_*x_*(t) + G_*u(t) + J_*y(t) + L_*\rho(t), \quad (2.1)$$

где x_* — вектор состояния; F_* , G_* , J_* и L_* — матрицы, подлежащие определению. Предполагается [2], что при отсутствии дефектов и возмущений выполняется равенство $x_*(t) = \Phi x(t)$ для некоторой матрицы Φ , удовлетворяющей условиям

$$\Phi F = F_*\Phi + J_*H, \quad G_* = \Phi G. \quad (2.2)$$

При построении модели (2.1) матрица F_* ищется в каноническом виде:

$$F_* = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Используя формулу (2.3), получим из соотношения (2.2) уравнения для строк матриц Φ и J :

$$\Phi_i F = \Phi_{i+1} + J_* H, \quad i = 1, \dots, k-1, \quad \Phi_k F = J_k H. \quad (2.4)$$

Как показано в работе [2], уравнения (2.4) могут быть приведены к одному уравнению $\Phi_1 F^k = J_* H F^{k-1} + J_* H F^{k-2} + \dots + J_k H$. Запишем его в виде

$$(\Phi_1 - J_* H - J_* H F - \dots - J_k H F^{k-1}) V^{(k)} = 0, \quad (2.5)$$

где

$$V^{(k)} = \begin{pmatrix} F^k \\ J F^{k-1} \\ \vdots \\ H \end{pmatrix}.$$

Построение модели, инвариантной к дефекту.

Для построения модели, инвариантной к дефекту, описываемому матрицей D , необходимо выполнить

условие $\Phi D = 0$. Для его учета перепишем первое уравнение из (2.4) при $i = 2, 3$ в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Phi_2 &= \Phi_1 F - J_{*1} H, \\ \Phi_3 &= \Phi_2 F - J_{*2} H = (\Phi_1 F - J_{*1} H) F - J_{*2} H = \\ &= \Phi_1 F^2 - J_{*1} H F - J_{*2} H.\end{aligned}\quad (2.6)$$

Остальные уравнения получаются по аналогии. По аналогии с работой [12] можно показать, что условие $\Phi D = 0$ может быть представлено в виде

$$(\Phi_1 - J_{*1} - J_{*2} \dots - J_{*k}) B^{(k)} = 0, \quad (2.7)$$

где

$$B^{(k)} = \begin{pmatrix} D & FD & F^2 D & F^{k-1} D \\ 0 & HD & HFD & HF^{k-2} D \\ 0 & 0 & HD & HF^{k-3} D \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

Поскольку строка $(\Phi_1 - J_{*1} - J_{*2} \dots - J_{*k})$ удовлетворяет условию (2.5), из соотношений (2.5) и (2.7) следует уравнение

$$(\Phi_1 - J_{*1} - J_{*2} \dots - J_{*k})(V^{(k)} B^{(k)}) = 0. \quad (2.9)$$

Оно имеет нетривиальное решение, если

$$\text{rank}(V^{(k)} B^{(k)}) < lk + \text{rank}(D \quad FD \dots F^{k-1} D). \quad (2.10)$$

Для построения модели, инвариантной к дефекту, из неравенства (2.10) определяется минимальная размерность k и из уравнения (2.9) — строка $(\Phi_1 - J_{*1} - J_{*2} \dots - J_{*k})$, затем на основе (2.6) строится матрица Φ и принимается $G_* = \Phi G$ и $L_* = \Phi L$.

3. Решение проблемы

Построение скользящего наблюдателя. Для оценки возмущения $\rho(t)$ будем рассматривать построенную модель (2.1) как систему, для которой строится скользящий наблюдатель. Положим $y_*(t) = x_*(t)$ и примем в системе (1.2) $z_1 := 0$, $z_2 := x_*$, $F_{21} := 0$,

$F_{22} := F_*$, $u(t) := \begin{pmatrix} u(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$, $G_2 := (G_* \ J_*)$, $L_2 := L_*$. Так как тогда H_* — тождественная матрица, то предположения 1—3 с очевидностью выполняются. В этом случае наблюдатель (1.3) принимает вид

$$\begin{aligned}\hat{\dot{x}}_*(t) &= F_* \hat{x}_*(t) + G_* u(t) + J_* y(t) - \\ &- (F_* - F_*) e_y(t) + v(t); \\ \hat{\dot{y}}_*(t) &= \hat{x}_*(t),\end{aligned}$$

где $e_y(t) = \hat{y}_*(t) - y_*(t)$. В результате возмущение $\rho(t)$ может быть оценено следующим образом:

$$\rho(t) = -q \|L_*\| (L_*^T L_*)^{-1} L_*^T \frac{P e_y(t)}{\|P e_y(t)\| + \delta}, \quad (3.1)$$

где $P \in R^{p \times p}$ — матрица Ляпунова для F_* , которая, в свою очередь, должна быть устойчивой.

Построение диагностического наблюдателя. Для решения задачи диагностирования строится диагностический наблюдатель, чувствительный к дефекту. Если при этом он оказывается нечувствительным к возмущению, то проблема решается без обращения к скользящему наблюдателю. Такое, однако, бывает достаточно редко, и в этих случаях предлагается использовать скользящий наблюдатель для оценки значения этого возмущения в виде (3.1) и использования этой оценки при реализации процесса диагностирования.

Описание диагностического наблюдателя имеет вид, аналогичный (2.1):

$$\begin{aligned}\dot{x}_0(t) &= F_0 x_0(t) + G_0 u(t) + J_0 y(t) + L_0 \rho(t), \\ y_0(t) &= H_0 x_0(t),\end{aligned}\quad (3.2)$$

матрицы, входящие в (3.2), подчиняются уравнениям

$$RH = H_0 \Phi', \quad \Phi' F = F_0 \Phi' + J_0 H, \quad G_0 = \Phi' G, \quad L_0 = \Phi' L \quad (3.3)$$

для некоторой матрицы Φ' . Невязка, используемая для принятия решений о том, возник дефект или нет, ищется в виде $r(t) = Ry(t) - y_0(t)$. Обратная связь в наблюдателе для простоты не рассматривается. Слагаемое $L_0 \rho(t)$ показано в (3.2) в целях демонстрации уровня возмущений, действующих на наблюдатель, и для введения оцененного скользящим наблюдателем возмущения.

Как и в разделе 2, матрица F_0 ищется в каноническом виде (2.3), матрица H_0 принимается в виде $H_0 = (1 \ 0 \dots 0)$. В этом случае можно показать [2], что матрицы R и J_0 удовлетворяют уравнению

$$RHF^k = J_{01} HF^{k-1} + J_{02} HF^{k-2} + \dots + J_{0k} H. \quad (3.4)$$

Для получения чувствительности к дефекту должно выполняться условие $\Phi' L \neq 0$. Обеспечить выполнение этого условия можно, например, таким способом. Пусть матрица D^T линейно выражается через строки матрицы H , т. е. $D^T = RH$ для некоторой матрицы R . Так как из вида матрицы H_0 и соотношений (3.3) следует $\Phi'_1 = RH$, то $\Phi'_1 D = RHD = D^T D \neq 0$ для ненулевой матрицы D .

В ряде случаев проблема обеспечения чувствительности к дефекту решается выбором $R = (1 \ 1 \dots 1)$.

Зная матрицу R , из (3.4) можно найти минимальную размерность k и матрицу J_0 , затем на основе (3.3) найти остальные матрицы, описывающие наблюдатель. Поскольку оценка (3.1) является приближенной, полную развязку от возмущения получить не удастся, но степень робастности решения задачи диагностирования существенно повышается.

4. Пример

Рассмотрим линеаризованную модель электропривода [13]:

$$\dot{x}_1 = k_1 x_2;$$

$$\dot{x}_2 = k_2 x_3 + \rho;$$

$$\dot{x}_3 = k_3 x_2 + k_4 x_3 + k_5 u,$$

где $x_1 = \alpha_n$, $x_2 = \dot{\alpha}$, $x_3 = I$, $k_1 = 1/i_p$, $k_2 = k_M/J$, $k_3 = -k_\omega/L$, $k_4 = -R/L$, $k_5 = k_y/L$; I — ток якоря; R — активное сопротивление цепи якоря; L — индуктивность цепи якоря; k_ω — коэффициент противоЭДС; k_y — коэффициент усиления усилителя мощности; k_M — коэффициент крутящего момента; J — момент инерции вала электродвигателя и вращающихся частей редуктора; α_n — угол поворота выходного вала редуктора; $\dot{\alpha}$ — скорость вращения ротора электродвигателя; i_p — передаточное отношение редуктора; u — напряжение на входе усилителя мощности.

Полагая, что измеряемыми являются переменные x_1 и x_3 , а дефект моделируется изменением коэффициента k_4 , что соответствует изменению активного сопротивления цепи якоря электродвигателя (например, при его значительном нагреве), рассматриваемую модель опишем следующими матрицами:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 \\ 0 & k_3 & k_4 \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_5 \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, L = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

При наличии возмущения $\rho(t)$, представленного матрицей L , наблюдатель, обнаруживающий описанный дефект и нечувствительный к возмущению, традиционными методами построить не удастся, поэтому необходимо использовать предложенный в работе метод. Для этого вначале построим модель, инвариантную к дефекту. Можно проверить, что условие (2.10) выполняется при $k = 2$. Непосредственные вычисления дают:

$$V^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & k_1 k_2 \\ 0 & k_2 k_3 & k_2 k_4 \\ 0 & k_3 k_4 & k_4^2 + k_2 k_3 \\ 1 & k_1 & 0 \\ 0 & k_3 & k_4 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, FD = \begin{pmatrix} 0 \\ k_2 \\ k_4 \end{pmatrix}, B^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & k_2 \\ 1 & k_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Можно проверить, что уравнение (2.9) имеет решение при

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \end{pmatrix}, J = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & k_1 k_2 \end{pmatrix}.$$

Тогда $G^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$, $L^* = \begin{pmatrix} 0 \\ k_1 \end{pmatrix}$, и редуцированная

модель с $F^* = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ описывается уравнениями

$$\dot{x}_{*1} = x_{*2};$$

$$\dot{x}_{*2} = k_1 k_2 y_2 + k_1 \rho;$$

$$y_* = x_*,$$

где $x_{*1} = x_1$, $x_{*2} = k_1 x_2$.

Для построения скользящего наблюдателя примем $F^* = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$, тогда $P = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 \end{pmatrix}$ и

$F^* - F^* = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. Его описание имеет следующий вид:

$$\hat{\dot{x}}_{*1} = \hat{\dot{x}}_{*2} - e_{1y} + v_1;$$

$$\hat{\dot{x}}_{*2} = k_1 k_2 y_2 - e_{2y} + v_2;$$

$$\hat{y}_* = \hat{x}_*,$$

где $e_{1y} = \hat{y}_{*1} - y_{*1} = \hat{y}_{*1} - x_{*1}$, $e_{2y} = \hat{y}_{*2} - y_{*2} = \hat{y}_{*2} - x_{*2}$,

$$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = -q k_1 \frac{P e_y}{\|P e_y\|} =$$

$$= -q k_1 \frac{1}{\sqrt{(0,5 e_{y1})^2 + (0,5 e_{y2})^2}} \begin{pmatrix} 0,5 e_{y1} \\ 0,5 e_{y2} \end{pmatrix}.$$

При построении диагностического наблюдателя примем $R = (0 \ 1)$. Уравнение (3.4) при минимальном $k = 2$ имеет решение в виде

$$J_0 = \begin{pmatrix} k_3 k_4 / k_1 & 0 \\ 0 & k_4^2 + k_2 k_3 \end{pmatrix},$$

откуда $\Phi' = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -k_3 k_4 / k_1 & k_3 & k_4 \end{pmatrix}$, $L_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ k_3 \end{pmatrix}$, $G_0 = \begin{pmatrix} k_5 \\ k_4 k_5 \end{pmatrix}$.

Диагностический наблюдатель описывается следующими уравнениями:

$$\dot{x}_{01} = x_{02} + k_3 k_4 y_1 / k_1 + k_5 u;$$

$$\dot{x}_{02} = (k_4^2 + k_2 k_3) y_2 + k_4 k_5 u + k_3 \rho;$$

$$y_0 = x_{01}, \quad (4.1)$$

где $\rho = -q \frac{0,5 e_{y2}}{\sqrt{(0,5 e_{y1})^2 + (0,5 e_{y2})^2} + \delta}$, невязка формируется в виде $r = y_2 - y_0$.

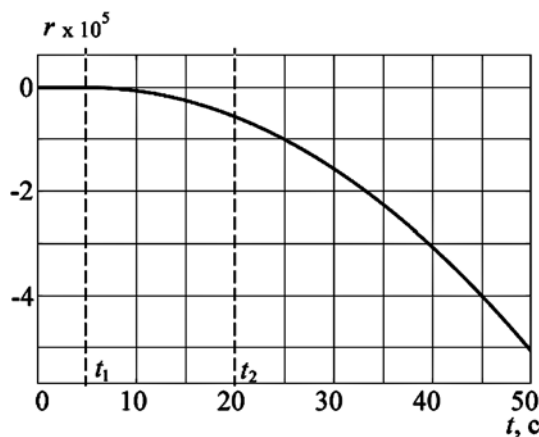


Рис. 1. Невязка при действии постоянного возмущения без его учета в наблюдателе

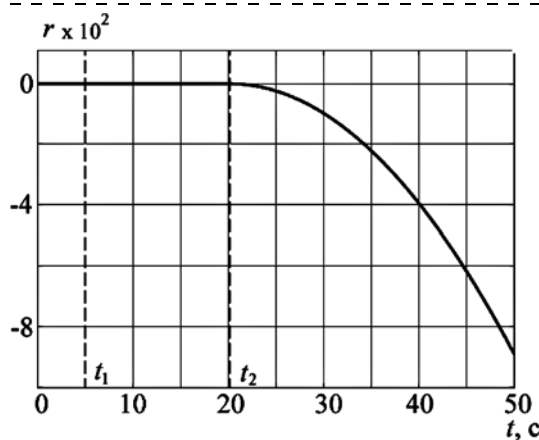


Рис. 2. Невязка при действии постоянного возмущения с его учетом в наблюдателе (4.1)

При моделировании задавались следующие параметры электропривода: $J = 0,0001 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$, $k_{\omega} = 0,02 \text{ В} \cdot \text{с}$, $k_y = 100$, $R = 0,4 \text{ Ом}$, $L = 0,004 \text{ Гн}$, $k_M = 0,02 \text{ Н} \cdot \text{м/А}$, $i = 100$. На электропривод подавалось управление $u(t) = 2\sin t$, дефект имитировался скачкообразным изменением значения активного сопротивления на 50 % в момент времени $t_2 = 20 \text{ с}$. Возмущение моделировалось двумя способами: скачкообразным изменением значения ρ от нуля до 100 в момент времени $t_1 = 5 \text{ с}$ и в виде переменной $\rho(t) = 100\sin t$ при $t \geq 5$. Моделировалась работа робастного (с учетом полученной оценки возмущения) и обычного (без ее учета) наблюдателей. Поведение полученных невязок r показано на рис. 1—4.

Из представленных рисунков видно, что до момента t_1 , когда на систему начинает действовать возмущение ρ , невязки, формируемые обычным и робастным наблюдателями, равны 0. При появлении как постоянного, так и переменного возмущения в обычном наблюдателе невязка начинает изменяться, что приводит к ложным срабатываниям системы диагностирования и не позволит правиль-

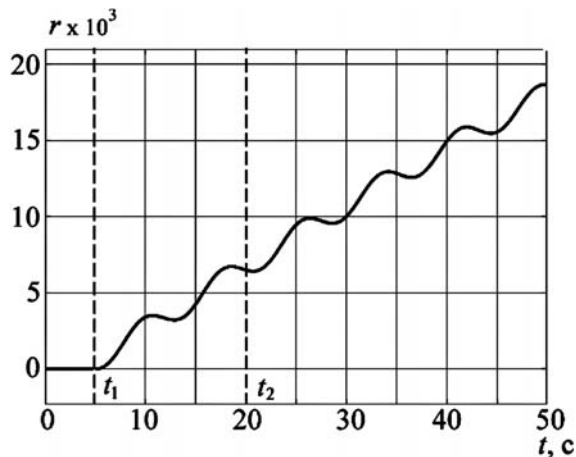


Рис. 3. Невязка при действии переменного возмущения без его учета в наблюдателе

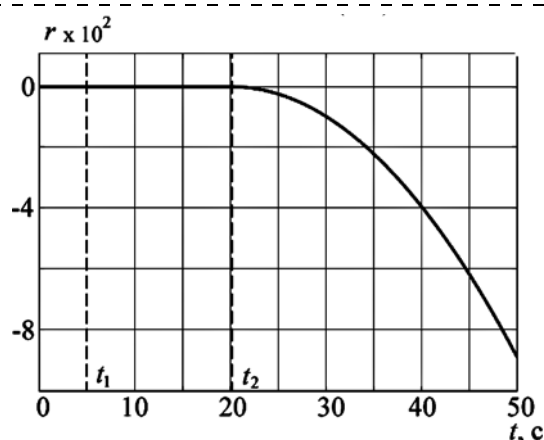


Рис. 4. Невязка при действии переменного возмущения с его учетом в наблюдателе (4.1)

но определить момент появления дефекта. Невязка, которую формирует робастный наблюдатель, остается нулевой до момента появления дефекта.

Таким образом, результаты моделирования показали работоспособность и высокую эффективность предложенного в работе метода повышения робастности процедуры диагностирования.

Заключение

В работе предложен новый метод обеспечения робастности при диагностировании технических систем, описываемых линейными моделями. Метод основан на построении редуцированной модели исходной системы, синтезе для нее скользящего наблюдателя, оценивающего действующее на систему возмущения, и дальнейшем использовании этой оценки для работы диагностического наблюдателя.

Список литературы

1. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: МГУ-ГРИФ, 1998.

2. Шумский А. Е., Жирабок А. Н. Методы и алгоритмы диагностики и отказоустойчивого управления динамическими системами. Владивосток: Изд. ДВГТУ, 2009.
3. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
4. Ding S. *Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems*. London: Springer-Verlag, 2014.
5. Simani S., Fantuzzi C., Patton R. *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
6. Уткин В. И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974.
7. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding mode observers for fault detection and isolation // *Automatica*. 2000. Vol. 36. P. 541—553.
8. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer // *Int. J. Control*. 2004. Vol. 77. P. 622—629.

9. Halim Alwi H., Edwards C. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation // *Automatica*. 2008. Vol. 44. P. 1859—1866.
10. He J., Zhang C. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems // *Mathematical Problems in Engineering*. 2012. P. 1—22.
11. Нелинейная динамика и управление: сборник статей. Вып. 6 / Под ред. С. В. Емельянова, С. К. Коровина. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 340 с.
12. Жирабок А. Н., Соляник С. П., Павлов С. В. Подход к диагностированию линейных систем непараметрическим методом // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. № 8. С. 507—515.
13. Филаретов В. Ф. Самонастраивающиеся системы управления приводами манипуляторов. Владивосток: ДВГТУ, 2000. 304 с.

Approach to Fault Diagnosis in Linear Systems by Non-Parametric Method

A. N. Zhirabok, zhirabok@mail.ru✉, A. E. Shumsky, A. V. Zuev,
Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, Russian Federation

Corresponding author: Zhirabok Aleksey N., Professor
of Far Eastern Federal University, 690950, Vladivostok, Russian Federation
e-mail: zhirabok@mail.ru

Accepted on August 04, 2017

The problem of fault diagnosis in technical systems described by linear dynamic models is studied. The suggested method of diagnosis is based on sliding mode observers estimating the disturbances that then is used for diagnostic observer operation. As a result, a degree of robustness of the diagnostic process is increased significantly. To realize the suggested method, three steps have to be fulfilled. Firstly, the reduced model of the system under consideration invariant with respect to the faults and sensitive to the disturbances is constructed. Based on this model, the sliding mode observer estimating the disturbances is obtained. The feature of such an observer is that a sliding motion takes place forcing the estimation error equal to zero in finite time therefore the disturbances can be estimated. Finally, the diagnostic observer sensitive to the faults and the disturbances and using the estimated disturbances as the known input is designed. This observer generates a residual which is used for decision making about faults. Since the disturbances are used now as the known input, a degree of robustness is increased significantly. Theoretical results are illustrated by practical example of the general electric servomotor of manipulation robots under absence of the external loading moment.

Keywords: linear models, fault diagnosis, reducing model, sliding mode observer, diagnostic observer, robustness, decomposition

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 16-09-00046).

For citation:

Zhirabok A. N., Shumsky A. E., Zuev A. V. Approach to Fault Diagnosis in Linear Systems by Non-Parametric Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 728—733.

DOI: 10.17587/mau.18.728-733

References

1. Mironivskii L. A. *Functionalnoe diagnostirovanie dinamicheskikh sistem* (Functional diagnosis in dynamic systems), Moscow, Publishing house of MSU, 1998 (in Russian).
2. Shumsky A., Zhirabok A. *Metody i algoritmy diagnostirovaniya i otkazoustoichivogo upravleniya dinamicheskimi sistemami* (Methods and algorithms for fault diagnosis and fault tolerant control in dynamic systems), Vladivostok, Publishing house of FESTU, 2009 (in Russian).
3. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, Berlin, Springer-Verlag, 2006.
4. Ding S. *Data-driven Design of Fault Diagnosis and Fault-tolerant Control Systems*, London, Springer-Verlag, 2014.
5. Simani S., Fantuzzi C., Patton R. *Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2002.

6. Utkin V. I. *Skolzyaschie rezhimy i ih isoilzovanie v sistemah s peremennoi strukturoi* (Sliding modes and their applications in systems with variable structure), Moscow, Nauka, 1974 (in Russian).
7. Edwards C., Spurgeon S., Patton R. Sliding mode observers for fault detection and isolation, *Automatica*, 2000, vol. 36, pp. 541—553.
8. Floquet T., Barbot J., Perruquetti W., Djemai M. On the robust fault detection via a sliding mode disturbance observer, *Int. J. Control*, 2004, vol. 77, pp. 622—629.
9. Halim Alwi H., Edwards C. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation, *Automatica*, 2008, vol. 44, pp. 1859—1866.
10. He J., Zhang C. Fault Reconstruction Based on Sliding Mode Observer for Nonlinear Systems, *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, pp. 1—22.
11. Emelyanov S. V., Korovin S. K. eds. *Nelineynaya dinamika i upravlenie* (Nonlinear dynamics and control), vol. 6, Moscow, Fizmatlit, 2008, 340 p. (in Russian).
12. Zhirabok A. N., Solyanik S. P., Pavlov S. V. *Podkhod k diagnostirovaniyu lineinykh sistem neparametricheskim metodom* (The approach to diagnosis in linear systems by nonparametric method), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, pp. 507—515 (in Russian).
13. Filaretov V. F. *Samonastrayayushchiesya sistemy upravleniya privodami manipulyatorov* (Self-tuning control systems of servo actuators of manipulators), Vladivostok, Publishing house of FESTU, 2000, 304 p. (in Russian).