УДК 681.326

ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ БИЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ[1]

А. Н. Жирабок, А. А. Летенко

Для решения задачи диагностирования динамических систем, описываемых билинейными моделями, предложено применять логико-динамический подход, предполагающий следующую последовательность действий: преобразование билинейной составляющей к соответствующему виду; удаление преобразованной билинейной составляющей; построение наблюдателя для полученной линейной модели с некоторым дополнительным ограничением; преобразование полученного линейного наблюдателя в билинейного.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из действенных средств повышения эффективности эксплуатации сложных технических систем является применение методов диагностирования, позволяющих проверять правильность функционирования системы в процессе выполнения ею своих функций на рабочих управляющих сигналах. Разработано значительное число различных методов решения диагностических задач, объединенных концепцией аналитической избыточности [1], согласно которой диагностирование осуществляется на основе проверки аналитических зависимостей, которые существуют между измеряемыми на определенном интервале времени управляющими и выходными сигналами диагностируемой системы.

В настоящей работе решается задача диагностирования систем, описываемых билинейной моделью вида

$$\dot{x}(t) = F^0x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^{m} u_i(t)F^ix(t) + Lf(t) + E\rho(t), \qquad (1)$$

$$y(t) = Hx(t).$$

Здесь $x \in X \subset R^n$, $y \in Y \subset R^l$, $u \in Y \subset R^m$ — векторы состояния, измеряемого выхода и управления, соответственно; u_i — i-я компонента вектора u; F^0, G, F^i, $i = 1, 2, ..., m$, H, L и E — известные постоянные матрицы соответствующих размеров. Слагаемое $Lf(t)$ описывает влияние дефектов на диагностируемую систему; предполагается, что если дефекты отсутствуют, то $f(t) = 0$, при появлении дефекта $f(t)$ становится неизвестной функцией времени. Слагаемое $E\rho(t)$ описывает вклад дестабилизирующих факторов, под которыми будем понимать погрешности моделирования и неконтролируемые внешние воздействия на диагностируемую систему. Векторная функция $\rho(t)$ считается неизвестной, матрица E указывает на то, каким образом дестабилизирующие факторы действуют на систему.

Билинейные модели занимают промежуточное положение между линейными и нелинейными. Достоинство их состоит в том, что они используют матричное описание и, следовательно, задачи анализа и синтеза таких систем, в частности, задачи диагностирования, могут быть решены на основе хорошо разработанных методов линейной алгебры. В то же время, билинейными моделями описывается множество разнообразных технических систем и процессов, например, системы управления ядерными реакторами, гидравлические управляющие системы, системы сжигания газа в промышленных печах, процессы нагрева и др.

Требуется построить диагностический наблюдатель, чувствительный к дефектам и нечувствительный к дестабилизирующим факторам. Эта задача рассматривалась в работах [2, 3], где был развит подход на основе так называемых наблюдателей с неизвестным входом, первоначально разработанный для линейных систем [4]. Его особенность состоит в том, что при построении наблюдателя задается матрица F_*^0, описывающая его динамику, остальные матрицы зависят от нее и должны заново рассчитываться при изменении этой матрицы, когда, например, требуется изменить показатели устойчивости системы.

В настоящей работе предлагается другой подход, не требующий таких перерасчетов. Он основан на так называемом логико-динамическом под-

[1] Работа поддержана грантом РФФИ.

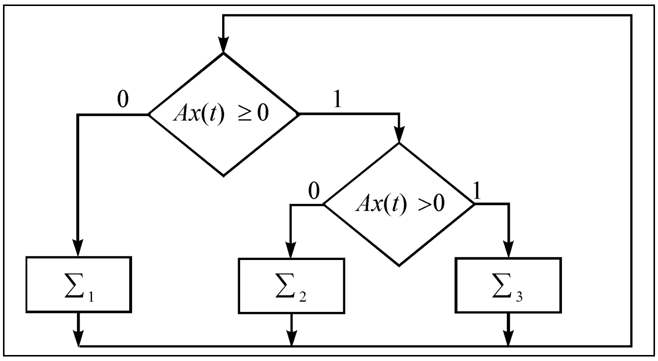
ходе, предложенном в работах [5, 6]. Объясним его на примере системы, представленной моделью вида

$$\dot{x}(t) = F^0x(t) + G'u(t)\mathrm{sign}(Ax(t)) + Gu(t), \quad (2)$$
$$y(t) = Hx(t)$$

где G' — матрица, A — матрица-строка. Суть этого подхода состоит в том, что исходная нелинейная система преобразуется в некоторую логико-динамическую систему, которая представляет собой совокупность линейных подсистем и логических условий. На рисунке представлена структура логико-динамической системы для модели (2), где подсистема Σ_1 имеет линейное описание с матрицами F^0, H и $G - G'$, подсистема Σ_2 — с матрицами F^0, H и G, подсистема Σ_3 — с матрицами F^0, H и $G + G'$. Важно, что матрицы F^0 и H у этих подсистем одинаковы, поскольку именно они используются при синтезе наблюдателя. После такого преобразования решается задача диагностирования для линейной системы с матрицами F^0 и H и дополнительным (по отношению к традиционной задаче диагностирования линейных систем) ограничением линейного характера и строится линейный логико-динамический наблюдатель, который затем преобразуется в нелинейный. Более детально этот подход будет описан далее.

В работе [5] показано, что логико-динамический подход может быть применен к другим типам нелинейности, когда в модели (2) вместо функции sign используются функции sin, cos, ln и др. Для этого соответствующая нелинейность вносится в наблюдатель вместо функции sign. В этом случае дополнительное ограничение при построении наблюдателя отражает уже не совокупность логических условий объекта диагностирования и наблюдателя, а соответствие их нелинейных частей. Кроме того, таких нелинейностей может быть несколько, и тогда матрица A будет содержать несколько строк.

В рассматриваемом билинейном случае нелинейная составляющая отсутствует, матрица A составляется из строк всех матриц F^i, матрица G' выделяет нужную компоненту вектора управления u. Фактически в процедуре решении задачи диагностирования билинейных систем последняя матрица не участвует, поскольку необходимые компоненты вектора u определяются индексами используемых матриц F^i.



Логико-динамическая структура нелинейной истемы (2)

1. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Предлагаемый метод решения задачи диагностирования для системы, описываемой моделью (1), включает в себя следующие шаги.

1. Преобразование билинейной составляющей к виду, допускающему возможность применения логико-динамического подхода.

2. Удаление преобразованной билинейной составляющей.

3. Построение наблюдателя для полученной линейной модели с некоторым дополнительным ограничением, имеющим также линейный характер.

4. Преобразование полученного линейного наблюдателя в билинейный.

На первом шаге динамическая часть модели (1) преобразуется к виду

$$\dot{x}(t) = F^0x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^{m} u_i(t) \sum_{j=1}^{m} C^jF^{ij}x(t) + $$
$$+ Lf(t) + E\rho(t),$$

где F^{ij} — j-я строка матрицы F^i, $G^1 = [1\ 0\ ...\ 0]^T$, $G^2 = [0\ 1\ ...\ 0]^T$, $G^n = [0\ 0\ ...\ 1]^T$.

После удаления билинейной составляющей получается линейная модель:

$$\dot{x}(t) = F^0x(t) + Gu(t) + Lf(t) + E\rho(t),$$
$$y(t) = Hx(t).$$

Третий шаг в соответствии с логико-динамическим подходом заключается в синтезе линейного наблюдателя. Из линейной теории диагностирования известно [4—6], что в этой процедуре главную роль играет матрица Ф, которая в случае отсутствия дефектов связывает состояния исходной линейной системы и наблюдателя:

$$x_*(t) = \Phi x(t).$$

Здесь x_* — вектор состояния наблюдателя, описываемого уравнениями

$$\dot{x}_*(t) = F_*^0x_*(t) + G_*u(t) + Jy(t), \quad (3)$$
$$y_*(t) = H_*x_*(t),$$

y_* — выходной сигнал наблюдателя, F_*^0, G_*, J и H_* — подлежащие определению матрицы. Наблюдатель генерирует невязку $r(t) = Cy(t) - y_*(t)$, где C — некоторая матрица-строка, также подлежащая определению. При отсутствии дефектов невязка должна быть равна нулю, т. е. быть нечувствительной к дестабилизирующим факторам. При появлении дефекта равенство $r(t) = 0$ нарушается.

Матрицы диагностируемой системы и наблюдателя связаны известными соотношениями [4—6]:

$$CH = H_*\Phi, \quad \Phi F^0 = F_*^0\Phi + JH, \quad \Phi G = G_*. \qquad (4)$$

Условия чувствительности невязки к дефектам и нечувствительности к дестабилизирующим факторам имеют вид

$$\Phi L \neq 0, \quad \Phi E = 0. \qquad (5)$$

Предполагается, что структура модели билинейного наблюдателя аналогична модели (1), поэтому в соответствии с логико-динамическим подходом [5] введем семейство матриц-строк $\{F_*^{ij}\}$ такое, что выполняется условие

$$F^{ij}x(t) = F_*^{ij}x_*(t) \; i = 1, 2, ..., m, j = 1, 2, ..., n.$$

Так как $x_*(t) = \Phi x(t)$, то $F^{ij} = F_*^{ij}\Phi$, т. е. каждая строка матрицы F^i линейно выражаются через строки матрицы Φ, откуда следует, что равенство $F^{ij} = F_*^{ij}\Phi$ эквивалентно равенству

$$\mathrm{rank}(\Phi) = \mathrm{rank}\begin{bmatrix}\Phi\\ F^i\end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, ..., m, \qquad (6)$$

являющимся дополнительным ограничением на матрицу Φ, о чем было сказано во Введении.

2. УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Для возможности построения наблюдателя, нечувствительного к дестабилизирующим факторам, должны выполняться определенные условия; получим их, введя несколько необходимых для дальнейшего элементов.

Известно [5—7], что линейный наблюдатель может быть реализован в каноническом виде с матрицами

$$F_*^0 = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & \Lambda & ... & 0\\ 0 & 0 & 1 & \Lambda & ... & 0\\ & ... & & \Lambda & & ...\\ 0 & 0 & 0 & \Lambda & ... & 0\end{bmatrix}, \quad H_* = [1 \; 0 \; 0 \; \Lambda \; 0] \qquad (7)$$

без увеличения его размерности. Пусть E_* — матрица максимального ранга, удовлетворяющая равенству $E_*E = 0$. Из ее определения следует, что условие $\Phi E = 0$ можно записать в виде $\Phi = NE_*$ для некоторой матрицы N.

Анализ начнем с первого из соотношений (4), которое с учетом вида матрицы H_* из канонической формы (7) и условия $\Phi = NE_*$ можно записать в виде $CH = N_1E_*$ или $CH - N_1E_* = 0$, где N_1 — первая строка матрицы N. Перепишем последнее равенство в блочной форме:

$$[C| - N_1] \cdot \begin{bmatrix}H\\ E_*\end{bmatrix} = 0. \qquad (8)$$

Отсюда следует, что между строками матриц H и E_* имеется линейная зависимость, откуда нетрудно заключить, что это равенство эквивалентно ранговому неравенству

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix}H\\ E_*\end{bmatrix} < \mathrm{rank}(H) + \mathrm{rank}(E_*). \qquad (9)$$

Если оно выполняется (это можно проверить с помощью математических пакетов, например, MATLAB), то решая однородное алгебраическое уравнение (8), можно определить матрицы C_0 и N_1^0, строки которых представляют собой все линейно независимые решения этого уравнения; число таких решений равно $n - \mathrm{rank}\begin{bmatrix}H\\ E_*\end{bmatrix}$. Сами матрицы C и N_1 будут являться линейной комбинацией строк этих матриц, т. е. $C = RC^0$ и $N_1 = RN_1^0$ для некоторой матрицы R. Невыполнение условия (9) означает, что наблюдатель, нечувствительный к дестабилизирующим факторам, построить невозможно.

Перейдем к анализу второго из соотношений (4). Умножая обе его части на матрицу E справа и учитывая условия $\Phi = NE_*$ и $\Phi E = 0$, получим в итоге соотношение $NE_*F^0E = JHE$ или в блочной форме

$$[N| - J] \cdot \begin{bmatrix}E_*F^0E\\ HE\end{bmatrix} = 0. \qquad (10)$$

Как и ранее, можно показать, что это равенство эквивалентно ранговому неравенству

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix}E_*F^0E\\ HE\end{bmatrix} < \mathrm{rank}(E_*F^0E) + \mathrm{rank}(HE). \qquad (11)$$

Пусть выполняется условие (11), т. е. для некоторых матриц N и J справедливо соотношение (10); представим тогда его в виде $(NE_*F^0 - JH)E = 0$, откуда согласно определению матрицы E_* следует, что для некоторой матрицы K выполняется равенство

$$NE_*F^0 - JH = KE_*. \qquad (12)$$

Поскольку матрица K может быть выбрана произвольным образом, примем ее в виде $K = F_*^0N$ для некоторой матрицы F_*^0, не обязательно совпадающей с приведенной в выражении (7). Тогда если положить $NE_* = \Phi$, то получим $KE_* = F_*^0NE_* = F_*^0\Phi$, и равенство (12) совпадет со вторым из соотношений (4). Последнее означает следующее. Из уравнения (10) могут быть определены матрицы N^0 и J^0, строки которых представляют собой все линейно независимые решения этого уравнения. Эти матрицы можно использовать в качестве основы для построения наблюдателя; при этом, однако, возникают задачи определения минимально возможной размерности наблюдателя и построения матриц N и J при реализации наблюдателя минимальной размерности. Мы выберем для построения наблюдателя другой путь, воспользовавшись канонической формой матрицы F_*^0, что даст определенные преимущества при решении этой задачи.

Невыполнение условия (11) означает, что наблюдатель, нечувствительный к дестабилизирующим факторам, построить невозможно.

Получим еще одно условие возможности построения наблюдателя, непосредственно не связанное с дестабилизирующими факторами. В качестве решения уравнений (8) и (10) (при условии их разрешимости) выше были определены матрицы N_1^0 и N^0. Поскольку эти уравнения независимы друг от друга, их решения также будут линейно независимыми. Напомним, что линейная комбинация строк матрицы N_1^0 должна быть первой строкой матрицы N в соответствии с приведенным выше соотношением $N_1 = RN_1^0$. Поскольку строки матрицы N формируются как линейные комбинации строк матрицы N^0, то для некоторой матрицы Q должно выполняться равенство $N_1 = RN_1^0 = QN^0$. Как и выше, можно показать, что это равенство эквивалентно ранговому неравенству

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} N_1^0 \\ N^0 \end{bmatrix} < \mathrm{rank}(N_1^0) + \mathrm{rank}(N^0), \qquad (13)$$

которое можно назвать условием согласования уравнений (8) и (10).

Последнее условие возможности построения наблюдателя связано с его нелинейным характером, оно может быть получено следующим образом. Как было показано выше, для матриц F^{ij}, F_*^{ij} и Ф выполняется соотношение $F^{ij} = F_*^{ij}\Phi$, $j = 1, 2, ..., n$, или $F^j = F_*^i\Phi$; поскольку $\Phi = NE_*$, то $F^i = F_*^i NE_*$, $i = 1, 2, ..., m$. Полученное равенство можно рассматривать как условие возможности построения билинейного наблюдателя, нечувствительного к дестабилизирующим факторам; в ранговой форме оно выглядит следующим образом:

$$\mathrm{rank}(E_*) = \mathrm{rank}\begin{bmatrix} E_* \\ F^i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, ..., m. \qquad (14)$$

3. СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Перед началом процедуры синтеза наблюдателя, который должен быть нечувствителен к дестабилизирующим факторам, необходимо проверить условия (9), (11), (13) и (14). Если хотя бы одно из них не выполняется, то такой наблюдатель построить невозможно; в этом случае необходимо обратиться к робастным методам, обеспечивающим минимальную чувствительность к этим факторам; они изложены, в частности, в работе [8].

Пусть указанные выше условия выполняются; известно [5, 6], что используя каноническую форму (7) матриц F_*^0 и H_*, первое и второе из соотношений (4) можно привести к виду

$$\Phi_1 = CH,\ \Phi_i F^0 = \Phi_{i+1} + J_i H,$$
$$i = 1, 2, ..., k - 1,\ J_k H = \Phi_k F^0, \qquad (15)$$

где Φ_i и J_i — i-е строки матриц Ф и J, соответственно, k — размерность наблюдателя. Как было отмечено ранее, в случае, когда уравнение (8) имеет несколько линейно независимых решений, матрицу-строку C первого из равенств (15) можно определить в виде $C = RC^0$. С учетом последнего выражения соотношения (15) можно свернуть в одно уравнение:

$$RC^0H(F^0)^k = J_1H(F^0)^{k-1} + J_2H(F^0)^{k-2} + ...$$
$$... + J_kH. \qquad (16)$$

Для определения минимальной размерности наблюдателя и описывающих его матриц, предлагается следующий алгоритм, являющийся модификацией алгоритма, предложенного в работах [5, 6].

Шаг 1. Положим $k = 1$.

Шаг 2. Если уравнение (16) разрешимо для некоторых матриц-строк R, J_1, J_2, ..., J_k (это можно проверить с помощью пакета MATLAB), переходим к шагу 4.

Шаг 3. Положим $k = k + 1$ и перейдем к шагу 2.

Шаг 4. Рассчитаем строки матрицы Ф: $\Phi_1 = RC^0H$, $\Phi_{i+1} = \Phi_iF - J_iH$, $i = 1, 2, ..., k - 1$. Если матрица Ф не удовлетворяет условиям (5) и (6), находим другое решение уравнения (16), в противном случае переходим к шагу 3.

Шаг 5. Положим $G_* = \Phi G$ и найдем матрицы F_*^{ij} из линейного алгебраического уравнения $\Phi^T F_*^{ijT} = F^{ijT}$, $G_*^j = \Phi G_j$, $i = 1, 2, ..., m$, $j = 1, 2, ..., n$.

На третьем шаге решения задачи полученный линейный наблюдатель преобразуется в билинейный. Для этого в модель (3) добавляется нелинейная составляющая

$$\sum_{i=1}^{m} u_i(t) \sum_{j=1}^{n} G_*^j F_*^{ij} x_*(t);$$

в результате получается модель диагностического наблюдателя для билинейной системы:

$$\dot{x}_*(t) = F_*^0 x_*(t) + G_* u(t) + Jy(t) + \\ + \sum_{i=1}^{m} u_i(t) \sum_{j=1}^{n} G_*^j F_*^{ij} x_*(t), \quad y_*(t) = H_* x_*(t). \quad (17)$$

4. УСТОЙЧИВОСТЬ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Наблюдатель (17) с матрицей F_*^0 из соотношения (7) будет неустойчивым. Чтобы обеспечить его устойчивость, необходимо сделать устойчивой эту матрицу, для чего в наблюдатель вводится обратная связь и соответствующим образом корректируется матрица J. А именно, если $\beta_1, \beta_2, ..., \beta_k$ — коэффициенты обратной связи, обеспечивающие необходимую устойчивость матрицы F_*^0, то i-я строка J_i матрицы J заменяется строкой $J_i - \beta_i C$, $i = 1, 2, ..., k$. Очень важно, что матрица Ф не изменяется в этом случае, следовательно, основные свойства наблюдателя (нечувствительность к дестабилизирующим факторам и чувствительность к дефектам) также не изменяются. Действительно, рассмотрим i-ю ($i < k$) строку второго из матричных уравнений (4) с матрицей F_*^0 в форме

$$F_*^0 = \begin{bmatrix} \beta_1 & 1 & 0 & \Lambda & ... & 0 \\ \beta_2 & 0 & 1 & \Lambda & ... & 0 \\ & ... & & & & ... \\ \beta_k & 0 & 0 & \Lambda & ... & 0 \end{bmatrix}$$

и строки матрицы J_i заменим на $J_i - \beta_i C$:

$$\beta_i \Phi_1 + \Phi_{i+1} + (J_i - \beta_i C)H = \Phi_i F^0.$$

Так как $CH = \Phi_1$, то отсюда следует второе из равенств (15); аналогичный результат будет и при $i = k$. Следовательно, матрица Ф, найденная по алгоритму, остается неизменной при описанных изменениях в матрице F_*^0. Таким образом, проблемы нечувствительности наблюдателя к дестабилизирующим факторам и устойчивости матрицы F_*^0 могут быть решены независимо, матрицы G_* и F_*^i при изменении показателей устойчивости не меняются. Эти обстоятельства и составляют преимущества предлагаемого метода перед известными [2, 3], о чем было сказано во Введении.

5. МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА

1. Дополнительное ограничение (6) на матрицу Ф может быть ослаблено расширением вектора $x_*(t)$ за счет вектора $y(t)$ путем замены уравнения $F^i x(t) = F_*^i x_*(t)$ на $F^i x(t) = F_*^i \begin{bmatrix} x_*(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = F_*^i \begin{bmatrix} \Phi x(t) \\ Hx(t) \end{bmatrix}$. В результате условие (6) принимает вид

$$\operatorname{rank}\begin{bmatrix} \Phi \\ H \end{bmatrix} = \operatorname{rank}\begin{bmatrix} \Phi \\ H \\ F^i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, ..., m,$$

что позволяет получить наблюдатель меньшей размерности. Кроме того, ослабляется условие (14), которое теперь принимает вид

$$\operatorname{rank}\begin{bmatrix} E_* \\ H \end{bmatrix} = \operatorname{rank}\begin{bmatrix} E_* \\ H \\ F^i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, ..., m.$$

Оно, однако, становится только необходимым, поскольку из того, что строки матрицы F^i выражаются через строки матриц E_* и H, не следует, что они будут выражаться и через строки матриц $\Phi = NE_*$ и H.

2. Известно [1, 5], что для дискретной и непрерывной линейных систем все основные соотношения, связанные с построением наблюдателей, одинаковы. Поскольку процедура построения билинейного наблюдателя основана на линейной процедуре, то все изложенное ранее будет справедливым и для дискретной билинейной модели вида

$$x(t+1) = F^0 x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^{m} u_i(t) F^i x(t) + \\ + Lf(t) + E\rho(t), \quad y(t) = Hx(t).$$

3. Хотя изложенное выше относилось к задаче обнаружения дефектов, нетрудно распространить это на задачу поиска дефектов, когда система описывается моделью

$$\dot{x}(t) = F^0 x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^{m} u_i(t) F^i x(t) + \\ + \sum_{j=1}^{p} L_j f_j(t) + E\rho(t), \quad y(t) = Hx(t),$$

где слагаемое $L_j f_j(t)$ описывает влияние j-го дефекта на систему. Диагностирование в этом случае осуществляется банком наблюдателей, каждый из которых должен быть чувствителен к одной группе дефектов и нечувствителен к другой, а также к дестабилизирующим факторам. В отличие от более простой задачи обнаружения дефектов здесь возникает ряд новых задач, в частности, установление отношения частичного порядка на множестве дефектов; выбор групп дефектов, к которым отдельные наблюдатели должны быть чувствительны и, напротив, нечувствительны; вопросы построения специальной матрицы, устанавливающей систему соотношений между дефектами и невязками, на основе которой принимается решение о том, какой именно дефект возник в диагностируемой системе. Поскольку эти вопросы детально рассмотрены в работе [9], мы не будем на них останавливаться. Отметим только, что если j-й наблюдатель должен быть чувствителен к дефектам с номерами $j_1, j_2, ..., j_q$, то вместо матрицы L в описанном выше подходе необходимо использовать блочную матрицу $L_j = [L_{j_1}|L_{j_2}|...|L_{j_q}]$, вместо матрицы E — блочную матрицу $[E|\bar{L}_j]$, где L_{j_i} — столбец матрицы L с номером j_i, $\bar{L}_j$ — матрица, содержащая все столбцы матрицы L с номерами, отличными от $j_1, j_2, ..., j_q$.

4. Если дефекты проявляются через входящие в описание диагностируемой системы параметры, описанный в работе подход полностью сохраняется; покажем это в случае одного параметра. Пусть динамика диагностируемой системы описывается моделью

$$\dot{x}(t) = F^0(\gamma)x(t) + G(\gamma)u(t) + \sum_{i=1}^{m} u_i(t)F^i x(t) + E\rho(t), \tag{18}$$

где γ — параметр. Предполагается, что при появлении дефекта параметр отклоняется от своего номинального значения γ_0 и становится неизвестной функцией времени. Для приведения этой задачи к рассмотренному выше случаю разложим матричные функции $F^0(\gamma)$ и $G(\gamma)$ в ряд Тейлора в окрестности номинального значения параметра γ_0, ограничившись только его линейной частью:

$$F^0(\gamma) = F^0(\gamma_0) + \frac{dF^0}{d\gamma}(\gamma - \gamma_0) = F^0 + K(\gamma - \gamma_0),$$

$$G(\gamma) = G(\gamma_0) + \frac{dG}{d\gamma}(\gamma - \gamma_0) = G + \Gamma(\gamma - \gamma_0)$$

и подставим полученные выражения в уравнение (18) вместо матриц $F^0(\gamma)$ и $G(\gamma)$:

$$\dot{x}(t) = F^0 x(t) + Gu(t) + \sum_{i=1}^{m} u_i(t)F^i x(t) + [K|\Gamma]\begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}(\gamma - \gamma_0) + E\rho(t). \tag{19}$$

Сравнивая полученное уравнение с моделью (1), нетрудно заключить, что роль матрицы L в настоящем случае играет блочная матрица $[K|\Gamma]$, роль функции $f(t)$ — векторная функция $\begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}(\gamma - \gamma_0)$. При наличии нескольких — p — параметров каждому из них в выражении (19) будет соответствовать слагаемое вида $[K_i|\Gamma_i]\begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}(\gamma_i - \gamma_{i0})$, $i = 1, 2, ..., p$, где матрицы K_i и Γ_i представляют собой частные производные от матричных функций $F^0(\gamma)$ и $G(\gamma)$ по i-й компоненте γ_i вектора γ, соответственно, γ_{i0} — номинальное значение i-го параметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное преимущество предложенного в работе логико-динамического подхода к диагностированию билинейных систем состоит в том, что проблемы нечувствительности наблюдателя к дестабилизирующим факторам (вместе с чувствительностью к дефектам) и устойчивости матрицы F_*^0 могут быть решены независимо друг от друга. При этом остальные матрицы, описывающие наблюдатель, не меняются при изменении его показателей устойчивости. Полученные условия возможности построения наблюдателя, нечувствительного к дестабилизирующим факторам, могут быть применены к линейным системам, а также системам с нелинейностями вида sign, sin, cos, ln и другим, для которых может быть использован логико-динамический подход.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мироновский Л. А.* Функциональное диагностирование динамических систем. — М.; СПб.: Изд-во МГУ-ГРИФ, 1998. — 256 с.
2. *Shields D. N.* Fault diagnosis in bilinear systems — A survey // Proc. European Control Conference ECC'95. — Rome, 1995. — P. 360—366.
3. *Shields D. N.* Qualitative approaches for fault diagnosis based on bilinear system // Proc. 13-th World Congress IFAC. — San Francisco, — 1996. — Vol. N. — P.151—156.
4. *Frank P. M.* Fault diagnosis in dynamic system using analytical and knowledge-based redundancy — A survey and some results // Automatica. — 1990. — Vol. 26. — P. 459—474.
5. *Жирабок А. Н., Усольцев С. А.* Линейные методы при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 7. — С. 149—159.
6. *Zhirabok A., Usoltsev S.* Fault diagnosis in nonlinear dynamic systems via linear methods // CD ROM Proc. 15 IFAC World Congress. — Barcelona, Spain, 2002.
7. *Мироновский Л. А.* Функциональная диагностирование линейных динамических систем // Автоматика и телемеханика. — 1979. — № 8. — С. 120—128.
8. *Lou X. C., Willsky A. S., Verghese G. C.* Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems // Automatica. — 1996. — Vol. 22. — P. 333—344.
9. *Жирабок А. Н.* Поиск дефектов в нелинейных системах методом функционального диагностирования на основе обобщенных алгебраических инвариантов // Автоматика и телемеханика. — 1994. — № 7. — С. 160—169.

☎ *(4232) 45-08-64*

e-mail: zhirabok@mail.ru ❑