

УДК 621.396

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО АНАЛИЗА

Г. В. Безмен,

ведущий инженер

Н. В. Колесов,

доктор техн. наук, профессор

ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»

Предлагается метод диагностирования линейных динамических систем, основанный на предположении об отсутствии четкой границы между работоспособным и неработоспособным техническими состояниями как системы, так и ее элементов и использующий банк взаимодействующих наблюдателей.

Ключевые слова — функциональное диагностирование, динамическая система, банк наблюдателей.

Введение

Вопросам диагностирования линейных динамических систем посвящено достаточно много публикаций, среди которых, в частности, [1–5]. Тем не менее, исследования в данной области продолжают, несмотря даже на то, что реальные системы, как правило, нелинейные. Можно назвать ряд причин сохраняющегося интереса к вопросам диагностирования динамических систем в целом и линейных динамических систем в частности, но, прежде всего, это принципиальная возможность декомпозиции любой технической системы на совокупность динамических. Это означает возможность соответствующей декомпозиции задачи диагностирования, которую далее приемами линеаризации можно свести к задаче диагностирования линейных систем. При этом обращаем внимание на существующие возможности линеаризации также в рамках обсуждаемого ниже нечеткого подхода с использованием модели Такаги—Сугено [6].

Данная работа посвящена проблеме функционального диагностирования, т. е. диагностирования на рабочих воздействиях при функционировании системы по прямому назначению. В настоящее время в рамках этой проблемы одним из наиболее разрабатываемых направлений является учет различного рода неопределенностей, сопровождаемых решением конкретных практических задач. Источниками неопределенности мо-

гут быть различные причины. Обычно это неадекватность используемой при диагностировании модели исходной системы, модели возмущений ее динамики и выхода. Неадекватность может возникнуть либо из-за недостаточной информированности разработчика, либо из-за произведенной в целях упрощения редукции используемой модели системы. Кроме неадекватности модели как на источники неопределенности можно указать на шумы измерения, а также на нечеткость в трактовке технического состояния системы и ее элементов. Последнему фактору ниже будет уделено наибольшее внимание. В литературе описаны подходы, позволяющие в той или иной степени решить эти проблемы. Следует отметить, что различные подходы зачастую используют различные типы модели системы, среди которых детерминированные [1–5], интервальные [7], стохастические [8], нечеткие [9–11]. Возможны и смешанные, в частности, интервально-стохастические подходы с использованием, например, результатов работы [12]. Выбор того или иного подхода, как правило, определяется содержанием имеющейся в распоряжении разработчика средств диагностирования априорной информации о свойствах системы и возникающих в ней отказах. Так, если разработчик располагает вероятностной информацией о поведении системы и ее отказах, то может быть применен стохастический подход. Если такой информации нет, но есть эмпирическое представление разработчика

о сопровождающих задачу неопределенностях, можно воспользоваться нечетким подходом, отразив это представление в соответствующих функциях принадлежности. Наконец, если и такой путь вызывает затруднения, то можно прибегнуть к услугам детерминированного подхода, где информация о неопределенностях сведена к минимуму.

В настоящей статье в рамках нечеткого подхода предлагается метод диагностирования линейных динамических систем, отличающийся от многих известных методов двумя основными особенностями. Во-первых, предположением об отсутствии четкой границы между работоспособным и неработоспособным техническими состояниями как системы, так и ее элементов. Это позволяет уточнить правило принятия решения при диагностировании отказов, опираясь лишь на эмпирическое представление разработчика о работоспособном и неработоспособном технических состояниях элементов диагностируемой системы. Вторая особенность данного метода состоит в том, что в отличие от других известных методов, предложенных в рамках нечеткого подхода и использующих банк независимых наблюдателей, здесь применяется банк взаимодействующих наблюдателей.

Постановка задачи

Коротко постановка задачи может быть сформулирована следующим образом. Пусть задана линейная стационарная динамическая система

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{H}\mathbf{x}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{x} — n -мерный вектор состояния; \mathbf{u} — m -мерный вектор входа; \mathbf{y} — p -мерный вектор выхода; \mathbf{F} — $n \times n$ -матрица динамики; \mathbf{G} — входная $n \times m$ -матрица; \mathbf{H} — выходная $p \times n$ -матрица. Задача состоит в синтезе средств функционального диагностирования в пространстве сигналов системы (1) при использовании модели нечеткого технического состояния и с включением в состав средств банка наблюдателей.

Прокомментируем рассматриваемую постановку задачи. По классификации, приведенной в работе [2], различают две основные обобщенные постановки задачи при синтезе средств функционального диагностирования для поиска отказов, обозначаемых как диагностирование в пространстве сигналов и диагностирование в пространстве параметров. Постановки задачи различаются, прежде всего, используемой моделью отказа.

В первом случае отказ моделируется как дополнительное слагаемое δ в уравнении динамики:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{u}(t) + \delta; \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{H}\mathbf{x}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

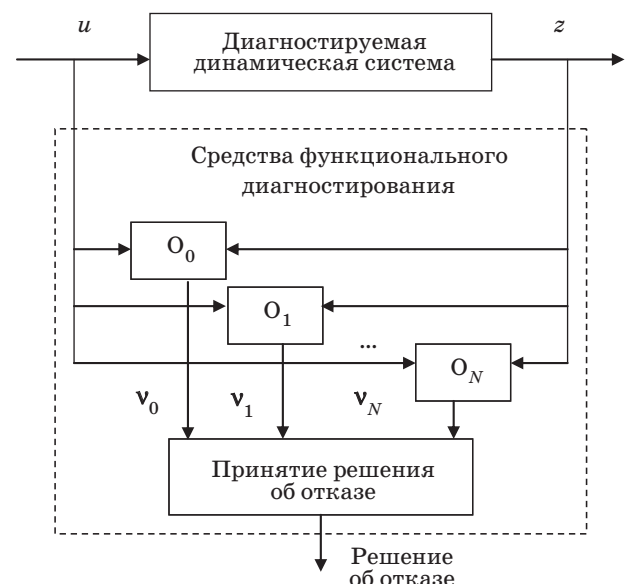
При этом число типов N однократных отказов равно размерности n вектора состояния диагностируемой системы. Первый тип моделируется дополнительным слагаемым в первом уравнении динамики, второй тип — во втором уравнении и т. д.; отказы внутри типа различаются уровнем слагаемого δ .

Во втором случае отказ моделируется как отклонение значений элементов системных матриц от номинала:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= (\mathbf{F} + \Delta\mathbf{F})\mathbf{x}(t) + (\mathbf{G} + \Delta\mathbf{G})\mathbf{u}(t); \\ \mathbf{y}(t) &= (\mathbf{H} + \Delta\mathbf{H})\mathbf{x}(t). \end{aligned}$$

При этом число типов N однократных отказов равно числу элементов системных матриц \mathbf{F} , \mathbf{G} , \mathbf{H} .

Далее при построении средств диагностирования будет использована известная структура [4, 7–10], упрощенно представленная на рис. 1, которая основана на банке наблюдателей (банке фильтров Калмана в стохастическом случае). Каждый наблюдатель O_i настроен на одну из модифициций диагностируемой системы (исправную — O_0 , неисправную с 1-м отказом — O_1 , неисправную со 2-м отказом — O_2 и т. д.). Формируются в общем случае векторные невязки $\mathbf{v}_0, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_N$ между наблюдаемым выходом динамической системы и выходом каждого из наблюдателей. По результатам их анализа принимается решение о техническом состоянии диагностируемой системы.



■ Рис. 1. Структура системы диагностирования

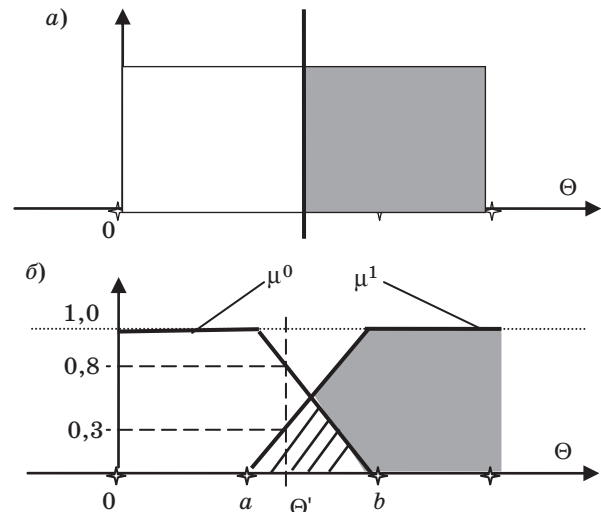
Можно считать, что для модели «четкого» технического состояния процедуры синтеза средств диагностирования с использованием банка наблюдателей достаточно хорошо изучены, однако для нечеткой модели технического состояния требуются дополнительные уточнения. Заметим также, что при любой трактовке понятия «техническое состояние» реализация средств диагностирования с банком наблюдателей может быть различной. В частности, могут использоваться как взаимодействующие при обработке информации наблюдатели [9], так и независимые наблюдатели [7, 8, 10].

Обсудим понятие технического состояния и, как следствие, отказа, которые далее определяются несколько иначе, нежели это обычно принято. Главное отличие состоит в предположении отсутствия четкой границы между работоспособным и неработоспособным техническими состояниями как системы, так и ее элементов. Представляется, что используемое ниже понятие нечеткого технического состояния достаточно хорошо отражает сложившийся на практике инженерный подход. Действительно, инженер, руководствуясь значением параметра, который определяет техническое состояние объекта, может считать, что объект работоспособен, если значение этого параметра находится в некотором диапазоне. Причем в зависимости от конкретного значения этого параметра инженер может считать, что объект работоспособен и соответственно неработоспособен в разной степени.

Определим *нечеткое техническое состояние объекта* по параметру Θ как лингвистическую переменную, характеризующуюся, например, двумя термами (нечеткими множествами) — работоспособное и неработоспособное технические состояния, которые описываются соответствующими функциями принадлежности μ^0 и μ^1 .

В случае «четкого» технического состояния объекта (рис. 2, а) области значений определяющего параметра Θ , соответствующие работоспособному и неработоспособному техническим состояниям объекта (на рисунке они обозначены прямоугольниками разной окраски), разделены четкой границей. В другом случае (рис. 2, б) эти области пересекаются (область пересечения отмечена штриховкой) и описываются соответствующими функциями принадлежности с параметрами a и b . В результате при любом значении определяющего параметра $\Theta = \Theta'$ техническое состояние объекта может быть соотнесено с нечетким множеством как работоспособных ($\mu^0 = 0,8$), так и неработоспособных ($\mu^1 = 0,3$) состояний.

В дальнейшем при рассмотрении вопросов диагностирования в пространстве сигналов будем опираться на две группы параметров, определяю-



■ Рис. 2. Иллюстрация понятий «четкого» (а) и «нечеткого» (б) технических состояний

щих техническое состояние динамической системы: невязки v_i , $i = 0, N$, формируемые при сопоставлении выходов системы с выходами наблюдателей, а также оценки δ_i , $i = 0, N$ дополнительных слагаемых в правой части уравнений (2), вычисляемые в соответствующих наблюдателях.

Будем предполагать, что невязка v_i , $i = 0, N$, формируемая при сопоставлении выходов системы и i -го наблюдателя, может быть представлена лингвистической переменной с двумя термами — «малая» и «большая», для которых заданы функции принадлежности $\mu_{v_i}^0$ и $\mu_{v_i}^1$, $i = 0, N$. Терм «малая» соответствует ситуации, когда модель, использованная при синтезе наблюдателя, адекватна текущему техническому состоянию диагностируемой системы. Появление хотя и малого, но не нулевого значения этой невязки объясняется переходными процессами, сопровождающими оценивание, отсутствием на практике полной адекватности используемой при синтезе наблюдателя модели диагностируемой системы, неучтенными возмущениями ее динамики или выхода. Терм «большая» соответствует ситуации, когда модель, использованная при синтезе наблюдателя, существенно неадекватна текущему техническому состоянию диагностируемой системы. Так бывает, если, например, диагностируемая система находится в i -м техническом состоянии, а наблюдатель настроен на j -е техническое состояние. При этом параметры $\{a_i, b_i | i = 0, N\}$ функций принадлежности определяются равенствами

$$a_i = \min_i \{v_i | S_j, j \neq i\};$$

$$b_i = \max_i \{v_i | S_j, j = i\}.$$

В отношении слагаемого, моделирующего отказ, будем также предполагать, что оно описывается лингвистической переменной с двумя термами — «работоспособно» и «неработоспособно», для которых заданы соответствующие функции принадлежности $\mu_{\delta_i}^0$ и $\mu_{\delta_i}^1$, $i = \overline{1, N}$.

Синтез средств диагностирования с независимыми наблюдателями

Банк наблюдателей

Как следует из рис. 1, в данном случае в задаче синтеза средств диагностирования можно выделить две части — синтез наблюдателей и формирование правила принятия решений.

Наблюдатели могут быть синтезированы по разным правилам, вытекающим из различий в постановке задачи. При диагностировании в пространстве сигналов эта процедура достаточно проста, однако для полноты изложения приведем ее основные моменты. Отличительной особенностью структуры наблюдателя в этом случае является наличие обратной связи по невязке $\mathbf{v} = \mathbf{y} - \mathbf{y}^*$ [9, 13]:

$$\dot{\mathbf{x}}_i^*(t) = \mathbf{F}_i^* \mathbf{x}_i^*(t) + \mathbf{G}_i^* \mathbf{u}(t) + \mathbf{L}_i (\mathbf{y} - \mathbf{y}_i^*);$$

$$\mathbf{y}_i^*(t) = \mathbf{H}_i^* \mathbf{x}_i^*(t).$$

При этом вектор \mathbf{x}_i^* состояния наблюдателя O_i , $i = \overline{0, N}$ образуется путем добавления в вектор \mathbf{x} состояния диагностируемой системы переменной δ_i , моделирующей отказ, т. е. $\mathbf{x}_i^{*T} = [\mathbf{x}^T \ \delta_i^T]$. Причем с учетом предположения о постоянстве значения δ_i уравнение для нее имеет вид $\dot{\delta}_i = 0$.

В результате матрицы диагностируемой системы при наличии в ней i -го отказа принимают вид

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & \mathbf{F}_0 & & & \\ & \dots & & & \\ & \mathbf{1} & & & \\ & \dots & & & \\ & \dots & & & \\ \mathbf{0} \dots \mathbf{0} & \mathbf{0} & & & \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ \mathbf{0} \dots \mathbf{0} & & & & \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} 0 & & & & \\ & \mathbf{H}_0 & & & \\ & \dots & & & \\ & \dots & & & \\ & \dots & & & \\ & \dots & & & \\ \mathbf{0} \dots \mathbf{0} & & & & \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где в матрице динамики единица последнего столбца размещается в i -й строке. Для единообразия номинальные матрицы диагностируемой системы также можно записать как образованные из исходных матриц путем добавления нулевых строк или столбцов. Основные матрицы наблюдателей будут совпадать с матрицами (3). При этом если в диагностируемой системе в процессе работы возникает i -й отказ, то в наблюдателе формируется оценка этого составного вектора, в том

числе формируется и оценка $\hat{\delta}_i$ значения переменной δ_i .

Для завершения синтеза наблюдателей необходимо определить матрицы \mathbf{L}_i обратной связи. Для случая, когда исходная система стационарна и наблюдаема, алгоритм выбора этой матрицы известен и достаточно прост [13]. Он исходит из требования устойчивости матрицы $\mathbf{F}_0^* - \mathbf{L}_0 \mathbf{H}_0^*$:

1. Определить характеристический многочлен $\varphi_{\mathbf{F}_i^*}(\lambda) = \lambda^n + \alpha_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_0$ для матрицы \mathbf{F}_i^* .

2. Определить желаемые с точки зрения длительности переходного процесса характеристические числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ для матрицы $\mathbf{F}_i^* - \mathbf{L}_i \mathbf{H}_i^*$ и соответствующий им характеристический многочлен

$$\varphi_{\mathbf{F}_i^* - \mathbf{L}_i \mathbf{H}_i^*}(\lambda) = \prod_{j=1}^n (\lambda - \lambda_j) = \lambda^n + \alpha'_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + \alpha'_0.$$

3. Определить матрицу (вектор) \mathbf{L}_i обратной связи с использованием выражения $\mathbf{l}_j = \alpha'_j - \alpha_j$, $j = \overline{1, n}$.

Правило принятия решений об отказе

Обсуждая правило принятия решения об отказе, следует иметь в виду следующее. На практике средства диагностирования характеризуются не только ненулевыми значениями невязок, формируемых в наблюдателях, настроенных на текущее техническое состояние системы, но и ошибками при формировании оценки $\hat{\delta}_i$. Эти факты имеют общие причины в виде переходных процессов, сопровождающих оценивание, и отсутствия на практике полной адекватности используемой при синтезе наблюдателя модели диагностируемой системы. В связи с этим решение об отказе целесообразно принимать не упрощенно, например по критерию минимума взвешенной нормы невязки, т. е.

$$i^* = \arg \min_i (\mathbf{v}_i^T \mathbf{M} \mathbf{v}_i),$$

где \mathbf{M} — весовая матрица невязки, а по более сложному нечеткому правилу. Это правило основано на использовании определяемого ниже понятия коэффициента уверенности K_i в i -м техническом состоянии. Правило требует достижения заданного уровня A коэффициентом уверенности K_i для доминирующего по значению этого коэффициента технического состояния, т. е. должно выполняться

$$K^* = \max_i \{K_i\} \geq A.$$

Для получения коэффициентов уверенности $\{K_i | i = \overline{0, N}\}$ предварительно определяются так называемые обобщенные степени принадлежности

сти $\{\tilde{\mu}_i^1 | i = \overline{0, N}\}$ технического состояния диагностируемой системы к каждому из возможных нечетких технических состояний. Эти характеристики обобщают информацию о техническом состоянии системы по всем наблюдателям и формируются на основе множеств значений двух диагностических показателей — невязки $\{v_i | i = \overline{0, N}\}$ и оценки ошибки $\{\hat{\delta}_i | i = \overline{1, N}\}$. Выражение для обобщенной степени принадлежности $\tilde{\mu}_i^1$ формируется в соответствии со следующим логиколингвистическим выражением, записанным в терминах определенных выше лингвистических переменных и отражающим ожидаемую реакцию средств диагностирования при техническом состоянии S_i :

$$S_i \leftrightarrow (\text{невязка } i\text{-го наблюдателя} = \text{малая}) \wedge (\text{оценка ошибки в } i\text{-м наблюдателе} = \text{большая}) \wedge \left[\bigwedge_{j \neq i} (\text{невязка } j\text{-го наблюдателя} = \text{большая}) \right].$$

Объяснение этого выражения очевидно. Действительно, наблюдатель, адекватный техническому состоянию системы, будет формировать малую невязку, остальные же наблюдатели — большую. При этом говорить о соответствующем отказе можно лишь в том случае, когда величина δ_i — большая. Пока исключим из рассмотрения ситуации, когда среди рассматриваемых отказов присутствуют эквивалентные или малоразличимые. Следуя этому выражению и воспользовавшись соответствующими функциями принадлежности, запишем выражение для $\tilde{\mu}_i^1$:

$$\tilde{\mu}_i^1 = \mu_{v_i}^1 \mu_{\hat{\delta}_i}^1 \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^N \mu_{v_j}^0.$$

Далее коэффициент уверенности K_i для каждого технического состояния S_i вычисляется по правилу «весовых коэффициентов» путем определения вклада обобщенной степени принадлежности $\tilde{\mu}_i^1$ в сумму этих степеней для всех состояний:

$$K_i = \frac{\tilde{\mu}_i^1}{\sum_{j=0}^N \tilde{\mu}_j^1}.$$

Моделирование

Рассмотрим пример системы, заимствованный из работы [2], характеризующийся матрицами

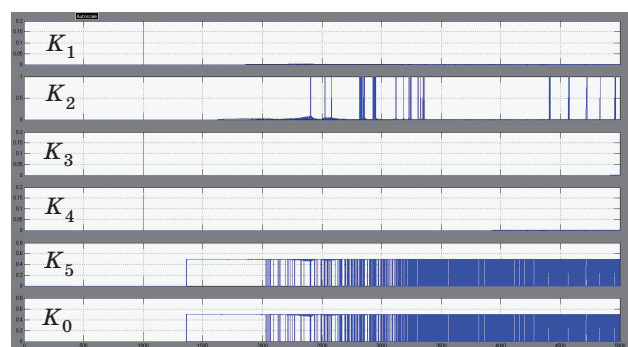
$$F = \begin{bmatrix} -0,0061 & 0,5122 & -0,0579 & 0,029 & 0,0377 \\ -0,5122 & -0,1868 & 0,6803 & -0,1417 & -0,2028 \\ -0,0579 & -0,6803 & -0,7645 & 0,7531 & 0,8508 \\ -0,29 & -0,1417 & -0,7531 & -0,3258 & -0,5974 \\ -0,0377 & -0,2028 & -0,8508 & -0,5974 & -1,242 \end{bmatrix};$$

$$G = \begin{bmatrix} 0,0452 \\ 0,2335 \\ 0,2779 \\ 0,09742 \\ 0,1329 \end{bmatrix};$$

$$H = [0,0452 \quad -0,2334 \quad 0,2779 \quad -0,09743 \quad -0,1329].$$

По смыслу данная система представляет собой редуцированную модель контура управления самолетом по высоте, которая была получена линеаризацией уравнений движения самолета в окрестностях номинальной траектории. Полученная модель была редуцирована путем приведения к сбалансированной канонической форме и отбрасыванием наименее значимых переменных состояния. Это описание охватывает управляемый объект, сервопривод управления рулем, датчик высоты и регулятор.

Для этого примера в среде Simulink было проведено моделирование задачи диагностирования в пространстве сигналов. Поскольку размерность пространства состояний равна 5, то использовался банк из шести наблюдателей. Отказ моделировался в виде скачка единичного уровня в первом интеграторе на 1000-м шаге моделирования. На вход системы подавался синусоидальный сигнал с амплитудой 0,5. На рис. 3 представлены временные диаграммы полученных коэффициентов уверенности. Видно, что средства диагностирования не формируют ожидаемого результата, когда до появления отказа коэффициент K_0 должен принимать устойчивое значение, близкое к еди-



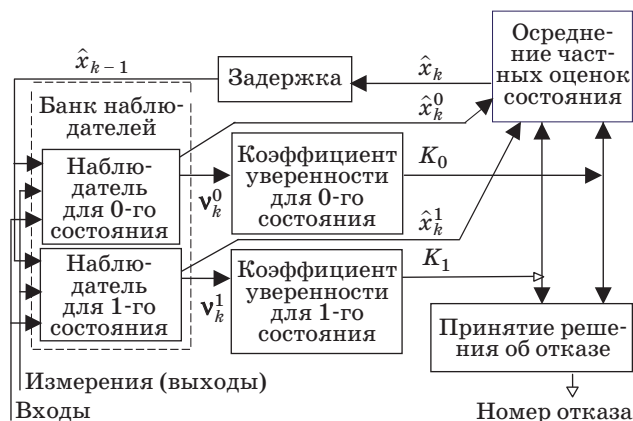
■ Рис. 3. Коэффициенты уверенности при независимых наблюдателях

нице, а остальные коэффициенты — значения, близкие к нулю. После появления отказа коэффициент K_1 должен принимать устойчивое значение, близкое к единице, а остальные коэффициенты — значения, близкие к нулю. При больших уровнях нарушения работа средств диагностирования приобретает устойчивый характер.

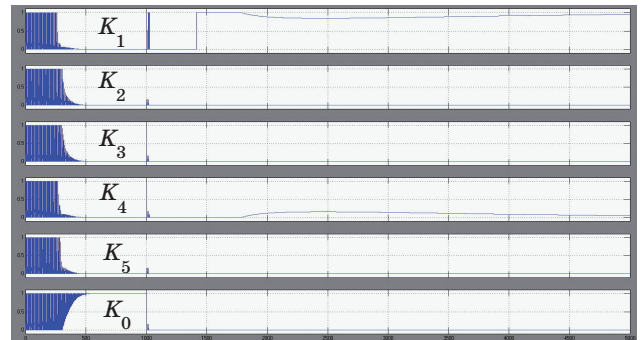
Синтез средств диагностирования с взаимодействующими наблюдателями

Банк наблюдателей

В настоящем разделе предлагается алгоритм диагностирования, предполагающий использование банка взаимодействующих наблюдателей. При этом применяется прежнее правило принятия решения об отказе. Как будет показано ниже, эффективность рассматриваемого алгоритма существенно выше, нежели у предыдущего. В случае алгоритма для простейшего варианта одного отказа (рис. 4) техническое состояние может принимать только два значения. В результате в средствах диагностирования применяются два наблюдателя. Как и прежде, на основании невязок, формируемых при сопоставлении выходов наблюдателей и диагностируемой системы, определяются коэффициенты уверенности. Основная особенность алгоритма заключается в том, что на каждом очередном шаге вычислений каждый из наблюдателей опирается не на автономно сформированную им частную оценку вектора состояния, а на оценку состояния, полученную в результате осреднения частных оценок по всем наблюдателям. Причем в качестве весовых коэффициентов при осреднении выступают текущие значения сформированных на данном шаге коэффициентов уверенности. В результате из-за использования осреднения достоверность этой оценки возрастает. При этом определение весовых коэффициентов



■ Рис. 4. Структура алгоритма диагностирования с взаимодействующими наблюдателями



■ Рис. 5. Коэффициенты уверенности при взаимодействующих наблюдателях

(коэффициентов уверенности) производится достаточно точно благодаря вычислению их во всех наблюдателях при одном и том же состоянии по результатам одного шага моделирования.

При другой интерпретации структурных блоков можно заметить сходство данного алгоритма с известным алгоритмом диагностирования стохастической системы, использующим гауссову аппроксимацию апостериорной плотности вероятности [8].

Моделирование

Результаты моделирования задачи диагностирования для приведенного выше примера с использованием взаимодействующих наблюдателей показаны на рис. 5. Видно, что средства диагностирования формируют ожидаемый результат. Так, на интервале времени до появления отказа коэффициент уверенности K_0 для работоспособного технического состояния после переходного процесса, связанного с начальным оцениванием, принимает значение, равное единице. После появления отказа на 1000-м шаге моделирования соответствующий ему коэффициент уверенности сначала кратковременно, а затем через 400 шагов устойчиво принимает значение, близкое единице.

Дополнительно было произведено моделирование задачи диагностирования для случая, когда модель, используемая в наблюдателях, не вполне адекватна реальной системе. При этом был принят уровень неадекватности по всем элементам матрицы динамики, равный 10 %. В результате моделирования было установлено сохранение синтезированными средствами качества диагностирования.

Заключение

В настоящей работе рассматриваются методы диагностирования линейных динамических систем, основанные на использовании банка наблю-

дателей и нечеткого анализа при принятии решения об отказе. Посредством моделирования в среде Simulink проанализированы два метода — с независимыми и взаимодействующими наблюдателями. Показано, что при использовании вто-

рого варианта достигается более высокое качество диагностирования.

Работа проводилась при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 08-08-00215а.

Литература

1. **Игнатъев М. Б. и др.** Контроль и диагностика робототехнических систем / ЛИАП. — Л., 1985. — 160 с.
2. **Мироновский Л. А.** Функциональное диагностирование динамических систем. М.-СПб.: Изд-во МГУ-ГРИФ, 1998. — 256 с.
3. **Frank P. M.** Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy — A survey and some new results // *Automatica*. 1990. Vol. 26. P. 459–474.
4. **Жирабок А. Н., Шумский А. Е.** Методы и алгоритмы функционального диагностирования сложных технических систем. — Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. — 134 с.
5. **Колесов Н. В.** Многоуровневое проектирование средств тестового и функционального диагностирования специализированных вычислительных комплексов / ЦНИИ «Румб». — Л., 1992. — 70 с.
6. **Takagi T., Sugeno M.** Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1985. Vol. 15. N 1. P. 116–132.
7. **Stancu A., Puig V., Quevedo J.** Passive robust fault detection using interval observers: application to the damadics benchmark problem // *10th IEEE interna-*
8. **Дмитриев С. П., Колесов Н. В., Осипов А. В.** Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем / ЦНИИ «Электроприбор». — СПб., 2003. — 206 с.
9. **Блинов А. Н., Осипов А. В.** Диагностирование параметрических отказов методами нечеткой логики // X Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям, Санкт-Петербург, 23–27 июня 2007 г. С. 224–229.
10. **Mendouca L. et al.** Fault isolation using fuzzy model-based observers / *6th IFAC symp. on Fault Detection*. 2006. Beijing. P. R. China. P. 142–150.
11. **Ракитянская А. Б., Ротштейн А. П.** Диагностика на основе нечетких отношений // *Автоматика и телемеханика*. 2007. № 12. С. 162–177.
12. **Chen G., Wang J., Shien L. S.** Interval Kalman filtering // *IEEE Transaction on aerospace and electronic systems*. 1997. Vol. 33. N 1. P. 250–257.
13. **Андреев Ю. Н.** Управление конечномерными линейными объектами. — М.: Наука, 1976. — 424 с.