

© 2019 г. Б.П. ПОДКОПАЕВ, д-р техн. наук (bprodkopaev@mail.ru)
(ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)),
А.С. ЯКШИН, канд. техн. наук (yakshin_as@mail.ru)
(ФГКВОУ ВО Военная академия материально-технического обеспечения
им. генерала армии А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации,
Санкт-Петербург)

ПОИСК ОШИБОК В УЗЛАХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ СТАТИЧЕСКИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Представлен метод решения задачи функционального диагностирования для систем управления, заданных структурными схемами. Подход позволяет проводить поиск и локализацию ошибок без учета искажения параметров внутри звеньев и строить устройства диагностирования, не превосходящие по сумме компонент исходную систему.

Ключевые слова: функциональное диагностирование, структурная схема, статические нелинейности, банк диагностических наблюдателей, избыточность.

DOI: 10.1134/S0005231019080075

1. Введение и постановка задачи

Повышение важности задач, решаемых современными техническими комплексами, приводит к ужесточению требований к качеству работы всех составляющих компонентов, в частности к достоверности их функционирования [1]. Достижение этой достоверности невозможно при наличии нештатных ситуаций в системе, опасные последствия которых исключаются только при их своевременном обнаружении. С этой целью в состав технических объектов вводятся специальные средства, решающие диагностическую задачу либо в процессе регламентного обслуживания, либо непосредственно в процессе нормальной работы.

Во многих случаях перерывы на регламентное обслуживание недопустимы и диагностические задачи должны решаться в рабочих режимах объекта диагностирования (ОД) в реальном масштабе времени. Соответствующие методы решения диагностических задач принято называть методами функционального диагностирования (ФД) [2–7].

К числу объектов диагностирования, прерывание работы которых крайне нежелательно, относятся электромеханические и механические системы антенных приводов радиотелескопов и обзорных радиолокаторов, следящие системы автоматики, исполнительные механизмы робототехнических систем и многие другие. В таких объектах обычно можно выделить структуры, в которые входят динамические элементы, имеющие один вход и один выход. В линейном случае исчерпывающее задание таких структур представляет

собой совокупность схемы соединений (структурной схемы) и передаточных функций упомянутых элементов. При этом задачу ФД можно решить с помощью матричных преобразований, трансформирующих исходную структуру в каноническую форму [8]. В общем случае рассматриваемый ОД может содержать нелинейные элементы, причем если нелинейность статическая (не зависит от состояния ОД), то каждый такой элемент представим последовательным соединением безынерционного нелинейного преобразователя (статическая нелинейность) и линейного узла. Вся структура при этом также задается схемой соединений и математическими описаниями элементов с одним входом и одним выходом, однако решение задачи ФД упомянутым выше методом невозможно ввиду некорректности необходимых преобразований.

Применительно к рассматриваемому случаю задача ФД решена в упомянутых публикациях [2, 6], но реализация использованных в них методов требует повышенной избыточности: размерность устройства ФД, как правило, превышает размерность ОД. Предлагаемый в настоящей работе способ позволяет без потери диагностической способности решить ту же задачу более экономно, обеспечивая равенство размерностей ОД и средств ФД.

Поставим задачу ФД следующим образом.

Пусть ОД является стационарной системой с сосредоточенными параметрами и представим в виде декомпозиции, в которую входят линейные динамические и нелинейные статические элементы (звенья) с одним входом и одним выходом. Линейные звенья заданы передаточными функциями (ПФ), статические нелинейности (СН) – функциями одной переменной. Выходы некоторых (в пределе всех) звеньев доступны и образуют вектор выхода ОД. Считая этот вектор и управляющие воздействия на ОД доступными, найти матричное описание устройства функционального диагностирования (УФД) в виде банка наблюдателей, оценивающих вектор выхода ОД. В банке формируется эталонное значение этого вектора и фиксируются ошибки, состоящие в несоответствии (невязке) текущих значений компонент выхода ОД эталону.

2. Синтез устройства диагностирования

Положим, что ОД состоит из n звеньев и образуем n -размерный вектор \mathbf{z} , считая, что его компоненты z_j суть переменные на выходах соответствующих звеньев. Если ОД линеен и содержит динамические звенья только первого порядка, то вектор \mathbf{z} совпадает с его вектором состояния; при наличии в линейном ОД хотя бы одного звена более высокого порядка размерность вектора \mathbf{z} меньше размерности вектора состояния. В нелинейном случае для ОД, содержащих динамические звенья только первого порядка, размерность \mathbf{z} превышает размерность вектора состояния; при более высоком порядке динамических звеньев она может быть и больше, и меньше, и равной последней.

Поскольку компоненты вектора \mathbf{z} образуют совокупность как выходных, так и входных переменных звеньев, при штатной работе ОД справедливо следующее матричное уравнение:

$$(1) \quad \mathbf{z}(p) = \mathbf{F}(p)\mathbf{z}(p) + G(p)\mathbf{u}(p),$$

в котором $\mathbf{z}(p)$ – определенный выше вектор размерности n ; $\mathbf{u}(p)$ – вектор управления размерности l ; $\mathbf{F}(p)$ и $\mathbf{G}(p)$ – матрицы, содержащие ПФ и СН звеньев, размерности матриц $n \times n$ и $l \times n$ соответственно.

Ненулевые элементы матрицы $\mathbf{F}(p)$ связывают между собой компоненты вектора $\mathbf{z}(p)$, получаемые на выходах одних звеньев и подаваемые на входы каких-либо других звеньев, т.е. эта матрица, по сути, задает структуру связей ОД.

В (1) компоненты произведений матриц на векторы понимаются нетривиальным образом, к примеру, элемент произведения $\mathbf{F}(p)\mathbf{z}(p)$ вида $F_{ij}(p)z_j(p)$, если первый сомножитель – передаточная функция, считается обычным произведением ПФ на переменную, если же он – статическая нелинейность, то $F_{ij}z_j(p) = F_{ij}[z_j(p)]$, т.е. произведение трактуется как нелинейная функция F_{ij} с аргументом $z_j(p)$, здесь F_{ij} – элемент матрицы $\mathbf{F}(p)$, стоящий на пересечении i -й строки и j -го столбца, а z_j – j -я компонента вектора $\mathbf{z}(p)$.

Ниже во всех случаях, кроме вызывающих разночтения, комплексная переменная p опущена.

Будем считать, что доступные выходы звеньев образуют m -размерный вектор \mathbf{y} , который можно задать матричным произведением вида $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{z}$. Входящая в произведение матрица \mathbf{H} размерности $m \times n$ ($m \leq n$) обладает рядом особых свойств. Во-первых, она состоит из нулей и единиц, имея в каждой строке единственную единицу в некоторой позиции, во-вторых, имеет полный ранг, и, в-третьих, у нее всегда существует псевдообратная матрица Мура–Пенроуза, принимающая в рассматриваемом случае вид $\mathbf{H}^+ = \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{H}^T)^{-1}$ [9]. Эта матрица устанавливает соответствие между компонентами векторов \mathbf{y} и \mathbf{z} ($y_j = z_k$, где j и k – номера строки и столбца матрицы соответственно).

Достаточно очевидно, что максимальной обнаруживающей способностью обладает УФД, динамическая часть которого представляет собой информационный аналог ОД, т.е. устройство, способное сформировать такие же векторы \mathbf{z} и \mathbf{y} , как и ОД. Это устройство управляется как вектором \mathbf{u} , так и вектором \mathbf{y} , а $\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{z}$, поэтому его можно задать парой уравнений:

$$(2) \quad \mathbf{z}_* = \mathbf{F}_*\mathbf{z}_* + \mathbf{G}_*\mathbf{u} + \mathbf{S}\mathbf{H}\mathbf{z}, \quad \mathbf{y}_* = \mathbf{H}_*\mathbf{z}_*,$$

в которой подстрочным индексом «*» отмечены матрицы и векторы, относящиеся к УФД, но обозначенные буквами, использованными в (1).

Информационный аналог должен реагировать на вектор \mathbf{u} так же, как и ОД, поэтому в (2) $\mathbf{G}_* = \mathbf{G}$. Кроме того, всегда имеют место равенства $\mathbf{z} = \mathbf{z}_*$ и $\mathbf{y} = \mathbf{y}_*$, из чего следуют равенство $\mathbf{H}_* = \mathbf{H}$, справедливость при нулевом векторе управления \mathbf{u} соотношения

$$(3) \quad \mathbf{F}\mathbf{z} = \mathbf{F}_*\mathbf{z} + \mathbf{S}\mathbf{H}\mathbf{z}$$

и далее соотношение

$$(4) \quad \mathbf{F}_* = \mathbf{F} - \mathbf{S}\mathbf{H}.$$

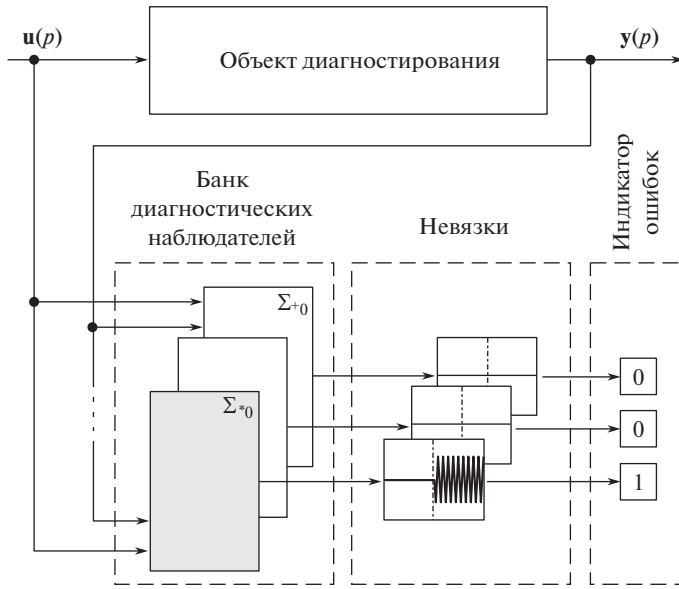


Рис. 1. Схема обнаружения и локализации ошибок.

Равенство $\mathbf{z} = \mathbf{z}_*$ определяет и специфику матрицы \mathbf{F}_* , задающей структуру связей в УФД. Дело в том, что если некоторая компонента вектора выхода ОД равна $y_j = z_k$, то входная переменная $z_{*k} = z_k$ соответствующего звена УФД заменяется переменной y_j , т.е. она участвует в формировании вектора \mathbf{z}_* соотношения (2) как компонента z_k вектора \mathbf{z} в произведении \mathbf{SHz} . При этом в произведении $\mathbf{F}_*\mathbf{z}_*$ элемент $F_{*ik}z_{*k}$ должен тождественно равняться 0 (F_{*ik} – элемент матрицы \mathbf{F}_*), что возможно, только когда k -й столбец \mathbf{F}_* состоит из нулей.

Таким образом, следует считать, что матрица \mathbf{F}_* – вырожденная матрица с нулевыми столбцами. Для таких матриц существует нетривиальное решение уравнения $\mathbf{F}_*\mathbf{z} = 0$, подставив его в (3), последовательно получим $\mathbf{Fz} = \mathbf{SHz}$, $\mathbf{F} = \mathbf{SH}$ и, умножив обе части последнего равенства на псевдообратную матрицу \mathbf{H}^+ , формулу для вычисления матрицы \mathbf{S} :

$$(5) \quad \mathbf{S} = \mathbf{FH}^+.$$

Заменяв в (2) матрицы \mathbf{G}_* и \mathbf{H}_* равными им матрицами \mathbf{G} и \mathbf{H} , а матрицы \mathbf{F}_* и \mathbf{S} правыми частями равенств (4) и (5) соответственно, окончательно получим уравнения, задающие динамическую часть УФД:

$$(6) \quad \mathbf{z}_* = (\mathbf{F} - \mathbf{FH}^+\mathbf{H}) \mathbf{z}_* + \mathbf{Gu} + \mathbf{FH}^+\mathbf{Hz}, \quad \mathbf{y}_* = \mathbf{Hz}_*.$$

Нетрудно убедиться, что построенная в соответствии с (6) система состоит из m , в общем случае взаимосвязанных, блоков, на выходе каждого из них генерируется одна компонента вектора $\mathbf{y}_* = \mathbf{y}$. Преобразование системы в банк диагностических наблюдателей состоит в добавлении к ней m устройств сравнения (вычитания) одноименных компонент. После покомпонентного вычи-

тания образуется m -размерный вектор невязок, который целесообразно преобразовать в вектор индикации ошибок, сопоставив компонентам первого с невязкой, превышающей некоторый порог, единичные компоненты второго и нулевые в противном случае, при этом конфигурация ошибок в ОД связывается со значением вектора индикации однозначным образом. В результате формируется искомое УФД, реализация которого предполагается на ЭВМ. Появление ошибки, искажающей некоторую компоненту вектора выхода ОД, приводит к появлению невязки на выходе наблюдателя, ее анализирующего (обозначен символом Σ_{*1}), при этом на выходах остальных наблюдателей (обозначены символом Σ_{*0}) невязка отсутствует. Соответствующий вектор индикации содержит единственную единицу, что позволяет не только обнаружить ошибку, но и указать звено ОД, в котором она возникла (рис. 1).

Для иллюстрации метода построим УФД для нелинейной системы из [10].

3. ФД системы автоматического управления с нелинейной обратной связью

Рассматриваемый ОД представляет собой нелинейную систему, включающую в себя ограничитель в прямой ветви и релейный элемент в цепи обратной связи (рис. 2).

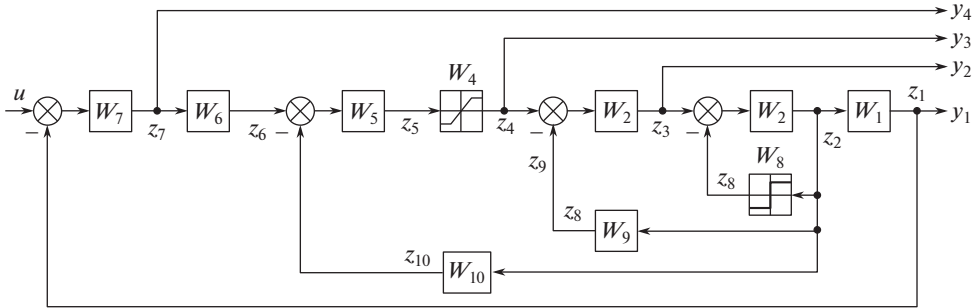


Рис. 2. Структурная схема ОД.

Матрицы, входящие в уравнения, задающие ОД, имеют следующий вид:

$$F = \begin{bmatrix} 0 & W_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_5 & 0 & 0 & 0 & -W_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_6 & 0 & 0 & 0 \\ -W_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ W_7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Используя равенства $\mathbf{G}_* = \mathbf{G}$, $\mathbf{H}_* = \mathbf{H}$ и полученные выше соотношения (4), (5), найдем матрицы, входящие в уравнения (2):

$$F_* = \begin{bmatrix} 0 & W_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -W_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & W_5 & 0 & 0 & 0 & -W_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_6 \\ -W_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad G_* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ W_7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$H_* = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

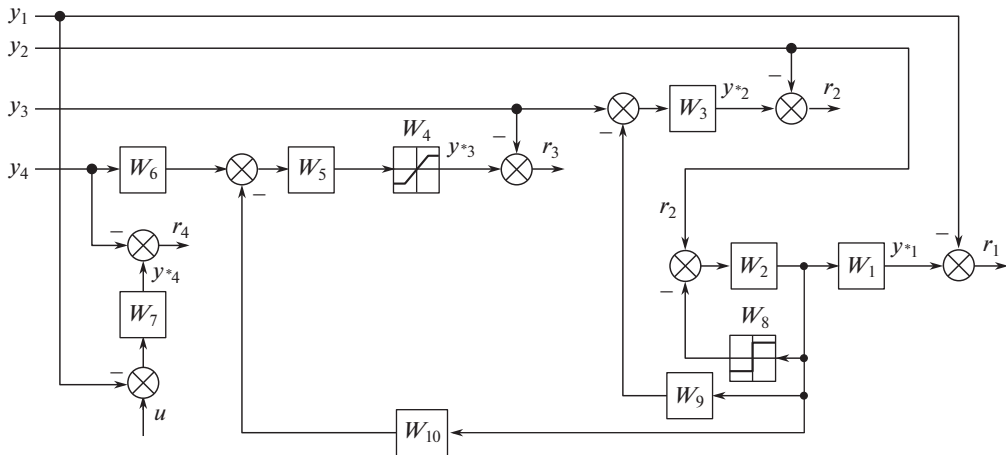


Рис. 3. Структурная схема УФД.

Полученные матрицы определяют аналитическое задание динамической части УФД и далее его структурную схему (рис. 3). Синтезированный УФД состоит из четырех наблюдателей, формирующих вектор невязок $\mathbf{r} = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$, суммарный объем которых составляет 10 звеньев. Размерности векторов состояний ОД и УФД равны, возможность обнаружения последним любых ошибок ОД очевидна.

Оценка локализирующей способности построенного УФД производится с помощью таблицы соответствия ошибок в звеньях ОД значениям вектора индикации (таблица). Соответствующие компоненты вектора равны 1, если i -й наблюдатель фиксирует ошибку рассматриваемого звена, и 0 в противном случае.

Анализируя таблицу, можно сделать вывод, что в случае однократных ошибок их локализация в звеньях W_1 и W_7 однозначна. Ошибки в звеньях $\{W_2, W_8\}$, $\{W_3, W_9\}$, $\{W_4, W_5, W_6, W_{10}\}$ локализуются с точностью до групп, внутри групп они неразличимы. Таким образом, для данного ОД, состоящего из 10 звеньев, построенное УФД позволяет различить 5 классов однократных ошибок.

Диагностическое моделирование рассматриваемой системы с построенным банком наблюдателей производилось с помощью пакета MATLAB фирмы Mathwork Inc. При синтезе УФД считалось, что линейные звенья ОД заданы

Таблица

Класс ошибок	Индикатор	Звенья
1	1000	W_1
2	1110	W_2, W_8
3	0100	W_3, W_9
4	0010	W_4, W_5, W_6, W_{10}
5	0001	W_7

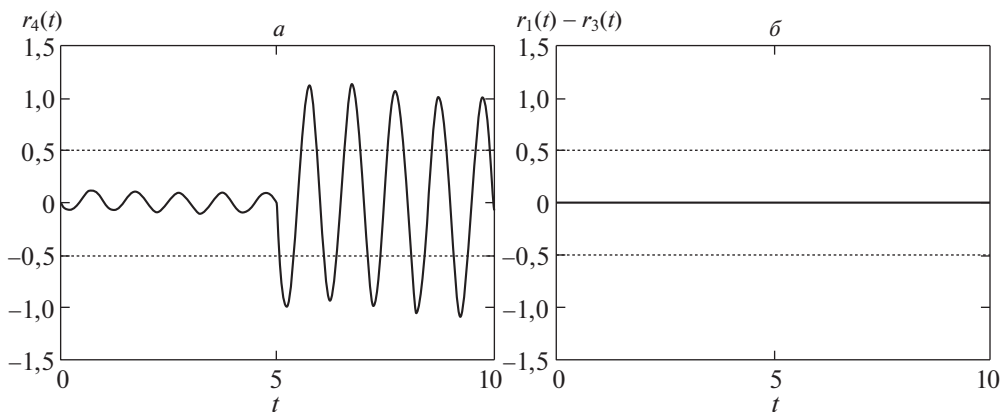


Рис. 4. Поведение сигнала невязки при наличии ошибки в звене W_7 .

передаточными функциями вида

$$W_1 = \frac{1}{p}, \quad W_2 = \frac{1}{T_2 p}, \quad W_3 = \frac{k_3}{1 + T_3 p}, \quad W_5 = \frac{k_5}{1 + T_5 p},$$

$$W_6 = \frac{1 + T_6 p}{p}, \quad W_7 = k_7, \quad W_9 = k_9, \quad W_{10} = \frac{k_{10}}{1 + T_{10} p}$$

с номинальными значениями параметров:

$$T_2 = 0,25, \quad k_3 = 0,03, \quad T_3 = 0,02, \quad k_5 = 600, \quad T_5 = 0,2,$$

$$T_6 = 0,49, \quad k_7 = 48,5, \quad k_9 = 500, \quad k_{10} = 2,03, \quad T_{10} = 0,01.$$

Нелинейные звенья представлены повторителем-ограничителем с уровнем ограничения ± 300 (W_4) и релейным элементом с зоной нечувствительности $\pm 0,1$ (W_8).

При моделировании считалось, что в начальный момент времени ОД исправен, параметры всех его звеньев, кроме W_7 , соответствуют номиналу, а выходные сигналы одноименных звеньев ОД и УФД равны. Коэффициент передачи W_7 отличался от номинала на 1%. В качестве входного воздействия u использовался синусоидальный сигнал с амплитудой 1 и частотой 2π . Неисправность моделировалась скачкообразным изменением параметров W_7 на 10% в момент времени $t = 5$.

Для обеспечения робастности процесса диагностирования к разбросу параметров и неточности начальной установки был установлен порог невязки r_4 на уровне $\pm 0,5$, т.е. допускалась вариация k_7 в пределах 5%.

Следует отметить, что задача выбора допустимого порога невязки является самостоятельной достаточно сложной задачей. Строгое ее решение основано на статистическом анализе свойств и поведения ОД, причем в случае использования для диагностики полноразмерного вектора выхода ОД величина порога от способа синтеза УФД не зависит.

Результаты моделирования показывают, что определенная выше неисправность приводит к появлению на выходе наблюдателя невязки r_4 , превышающую

щей установленный порог (рис. 4,а). Остальные компоненты вектора невязки (r_1, r_2, r_3) к такой ситуации инвариантны (рис. 4,б).

Таким образом, результаты моделирования показывают, что расчетная глубина локализации ошибок (таблица) для рассматриваемого ОД действительно достигается.

Найти равноценное с точки зрения обнаружения и локализации ошибок решение представленного примера можно и другими методами, в частности используя известный алгоритм последовательного выбора звеньев ОД [2, 6]. Несложный анализ показывает, что в получаемый при этом банк наблюдателей звенья W_2 и W_8 входят по 3 раза, в результате полный объем УФД составляет 14 звеньев, т.е. проигрыш по сравнению с предлагаемым методом составляет порядка 40%.

4. Оценка результатов и заключение

Для оценки полученных результатов сравним построенное в соответствии с (6) УФД с подобными устройствами, синтезированными другими методами.

Прежде всего, отметим, что использованный способ образования векторов \mathbf{z} и \mathbf{z}_* гарантирует равенство размерностей векторов состояний ОД и УФД. Такую же размерность имеет банк наблюдателей, построенных путем преобразования ОД в каноническую форму Кронекера [8], но это преобразование корректно только в случае линейности ОД. Следовательно, предложенный в настоящей работе метод, сохраняя вводимую избыточность неизменной, расширяет класс решаемых задач по сравнению с упомянутым.

Способ построения банка наблюдателей, пригодный для нелинейных ОД рассматриваемого вида, предложен в [2, 6]. Он состоит в выделении из ОД подсистем, каждая из которых формирует одну компоненту его вектора выхода, и используется в качестве составляющей банка наблюдателей. Число наблюдателей в банке, как и в настоящей работе, равно размерности вектора выхода ОД, но сумма размерностей наблюдателей в общем случае превышает (в лучшем случае равна) размерность ОД, поскольку некоторые звенья могут одновременно входить в состав нескольких подсистем, т.е. присутствовать в банке многократно. В результате как для линейных, так и для нелинейных ОД решение задачи ФД в соответствии с рекомендациями указанных работ, как правило, требует большей избыточности, чем при использовании предлагаемой методики [3].

Оценивая диагностическую способность построенных УФД, следует иметь в виду, что, как следует из материалов ряда публикаций, к примеру монографий [5, 7], наилучшими характеристиками в части обнаружения ошибок обладают устройства, динамическая часть которых связана с ОД отношением изоморфизма. При этом размерности векторов состояний ОД и УФД равны, в простейшем случае динамическая часть последнего является дублем ОД. Обнаружение ошибок производится путем анализа невязок между одноименными компонентами векторов выхода изоморфных систем, однако их локализация затруднительна, поскольку ошибка в одном звене может вызвать искажение нескольких и даже всех компонент вектора выхода ОД.

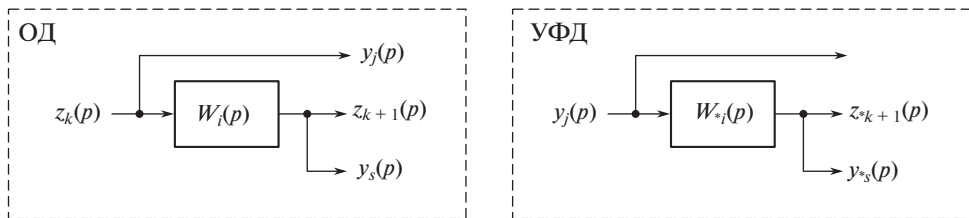


Рис. 5. Фрагмент ОД и соответствующая ему часть УФД.

В случае построения УФД с помощью предложенного в настоящей работе метода размерность его вектора состояния и способ обнаружения ошибок остаются такими же, как и при дублировании ОД, однако условия изоморфизма при этом не выполнены. В этом случае динамическая часть УФД и ОД связаны отношением моделирования (simulation), введенным для конечных систем в монографии [11] и обобщенным на произвольный случай в [4]. Особенность этого отношения состоит в том, что в паре «ОД – динамическая часть УФД» моделью является первый объект, с помощью которого моделируется второй. В частном случае моделирование переходит в гомоморфизм, причем в качестве модели выступает объект-прообраз, а в качестве моделируемого – объект-образ.

Поскольку отношение моделирования, как и отношение изоморфизма в случае дублирования, предполагает воссоздание в ОД полноразмерных векторов состояния и выхода динамической части УФД, следует считать, что в части обнаружения ошибок предлагаемый метод и метод дублирования равноценны. Однако особенности синтезируемого первым методом банка наблюдателей существенно расширяют возможность локализации звеньев с ошибками. Объясняется это тем, что динамическая часть наблюдателя, отслеживающего работу некоторого фрагмента ОД, функционирует независимо от него. По этой причине при появлении ошибки в звене W_i искажаются компоненты \mathbf{z}_{k+1} и \mathbf{y}_s , а \mathbf{z}_k и \mathbf{y}_j искажений не имеют (рис. 5).

В результате появляется невязка между \mathbf{y}_s и \mathbf{y}_{*s} , что позволяет эту ошибку обнаружить и локализовать. Если же ошибка имеет место в предшествующих звеньях (искажены \mathbf{z}_k и \mathbf{y}_j), то ввиду равенства W_i и W_{*i} упомянутая невязка не возникает и ложного обнаружения ошибки в звене W_i не происходит. Возможность локализации ошибок сохраняется и в случае многократных ошибок в ОД, когда нарушения имеются в нескольких звеньях объекта. В этом случае варианту распределения ошибок по звеньям ОД однозначно соответствует конкретное значение этого вектора. В случае равенства размерностей векторов \mathbf{z} и \mathbf{y} соответствие становится взаимно однозначным и возможна точная локализация любых ошибок ОД, в противном случае ошибки в некоторых звеньях неразличимы (см. пример).

Отношение моделирования связывает ОД с динамической частью УФД и при синтезе последнего методом последовательного выбора звеньев ОД [2, 6], поэтому по диагностической способности этот метод эквивалентен предложенному. Однако, как уже указывалось, он проигрывает последнему по избыточности.

Таким образом, приведенная оценка результатов работы позволяет утверждать, что поставленная в ней задача успешно решена. Предложенный в работе метод позволяет для определенного класса ОД достаточно просто синтезировать УФД, которые при одинаковых диагностических характеристиках обладают в нелинейном случае меньшей избыточностью, нежели построенные в соответствии с рекомендациями известных литературных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Щербаков Н.С.* Достоверность работы цифровых устройств. М.: Машиностроение, 1989.
2. *Жиравок А.Н., Якишин А.С.* Диагностирование технических систем, заданных структурными схемами с нелинейными звеньями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 9. С. 36–44.
3. *Мироновский Л.А.* Функциональное диагностирование динамических систем: Научное издание. СПб.: Изд-во МГУ-ГРИФ, 1998.
4. *Подкопаев Б.П.* Алгебраическая теория функционального диагностирования динамических систем: в 2 ч. Ч. 1. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007.
5. *Подкопаев Б.П.* Алгебраическая теория функционального диагностирования динамических систем: в 2 ч. Ч. 2. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.
6. *Подкопаев Б.П., Якишин А.С.* Функциональное диагностирование узлов радиосистем со статическими нелинейностями // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2016. Вып. 2. С. 16–23.
7. *Шумский А.Е., Жиравок А.Н.* Методы и алгоритмы диагностирования и отказоустойчивого управления динамическими системами. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009.
8. *Андреев Ю.Н.* Управление линейными конечномерными объектами. М.: Наука, 1976.
9. *Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А.* Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984.
10. *Крутько П.Д., Максимов А.И., Скворцов Л.М.* Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем. М.: Радио и связь, 1988.
11. *Hartmanis J., Stearns R.* The algebraic structure theory of sequential machines. N.Y.: Prentice Hall Inc., 1966.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.Ф. Караваем.

Поступила в редакцию 26.03.2018

После доработки 02.02.2019

Принята к публикации 07.02.2019