

УДК 519.718.2

Б. П. Подкопаев, А. С. Якшин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Функциональное диагностирование узлов радиосистем со статическими нелинейностями

Рассмотрена задача функционального диагностирования узлов, входящих в состав радиотехнических систем, имеющих статическую нелинейность и допускающих декомпозицию на компоненты со скалярными входами и выходами. Показано, что в этом случае можно построить средства функционального диагностирования в виде банка наблюдателей, позволяющего решить задачу не только обнаружения, но и локализации ошибок с максимально возможной глубиной. Предложен алгоритм синтеза средств диагностирования, работа которого проиллюстрирована примером.

Объект диагностирования, средства диагностирования, обнаружение и локализация ошибок, наблюдатель состояний, вектор состояния, матрица соответствия

Современные радиотехнические системы, как правило, имеют в своем составе электромеханические и механические узлы, предназначенные, к примеру, для поворота антенн радиолокаторов, вращения гониометров в пеленгаторах и т. п. Надежностные характеристики таких узлов обычно хуже, чем у электронных блоков, а потеря работоспособности хотя бы одним из них нередко вызывает полный отказ системы. Указанное обстоятельство заставляет при проектировании радиосистем использовать технические решения, позволяющие существенным образом повысить надежность упомянутых узлов, оставаясь при этом в рамках допустимых затрат. Одним из наиболее эффективных мероприятий, позволяющим повысить надежность восстанавливаемых систем, принято считать введение в их состав средств диагностирования, в частности средств функционального диагностирования (ФД). Последние позволяют в режиме штатной работы производить мониторинг технического состояния систем в реальном масштабе времени, а также в любом случае повышают достоверность их функционирования.

Применительно к электромеханическим и механическим узлам радиосистем решение задачи ФД обладает определенной спецификой. С одной стороны, с точки зрения теории они являются частным случаем динамических систем, следовательно, решение необходимо искать в классе либо неполноразмерных, либо полноразмерных диагностических моделей [1]. Упомянутые модели обычно реализуются на базе компонентов, составляющих объект диагностирования (ОД). Однако такой подход неприемлем для механических

и электромеханических узлов по причинам экономического и энергетического характера. Другой вариант реализации предполагает построение средств ФД в виде программных модулей, реализуемых на компьютерах. В этом случае в ОД вводятся датчики для отслеживания поведения его компонентов, векторов состояний и выхода. При этом средства ФД могут иметь размерность (порядок), равную размерности ОД или даже превышающую ее. Ввиду относительно малой стоимости и экономичности современных компьютеров высокий порядок реализованных с их помощью диагностических моделей не приводит к существенному росту экономических и энергетических затрат.

Рассматриваемые ОД обладают свойством, существенно облегчающим ФД: их можно подвергнуть декомпозиции на ряд звеньев, имеющих скалярные входы и выходы, т. е. каждое звено имеет один вход и один выход. Техническая реализация ОД, как правило, является совокупностью таких звеньев, связанных между собой в соответствии с некоторой структурной схемой. Элементы (звенья) схемы могут иметь статическую нелинейность, их выходы z_i являются компонентами вектора состояний z ОД, причем поведение этого вектора может быть задано во временной области системой интегральных уравнений или в области комплексных частот системой изображений по Лапласу. В последнем случае линейные узлы описываются передаточной функцией W , а нелинейные – некоторой нелинейной функцией φ . На структурной схеме комплексная переменная p обычно опускается (рис. 1).

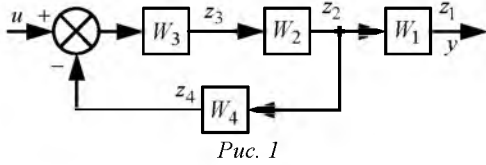


Рис. 1

Структурная схема на рис. 1 описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} y(p) = z_1(p); \\ z_1(p) = W_1(p)z_2(p); \\ z_3(p) = W_3(p)u(p) - W_3(p)z_4(p); \\ z_4(p) = W_4(p)z_2(p), \end{cases}$$

в которой все переменные представляют собой изображения по Лапласу входных и выходных сигналов отдельных звеньев.

Изложенные положения позволяют поставить задачу ФД следующим образом.

Пусть узел радиотехнической системы (ОД) задан структурной схемой, представляющей собой совокупность звеньев со скалярными входами и выходами, причем законы функционирования звеньев в области комплексных частот известны. Необходимо построить для такого ОД устройство ФД (УФД) в виде совокупности средств ФД отдельных звеньев (банка наблюдателей), обеспечивающее обнаружение произвольных ошибок в паре ОД–УФД и их локализацию с максимально возможной глубиной, в идеальном случае – с точностью до звена.

Будем считать, что ОД состоит из n узлов, а его вектор управления \mathbf{u} имеет размер l . Тогда в соответствии с [2] и [3] после перехода в область комплексных частот его поведение в пространстве состояний определяется матричным уравнением вида

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

где компоненты вектора \mathbf{z} размера n представляют собой сигналы на выходах отдельных звеньев; F и G – матрицы с размерами $n \times n$ и $n \times l$ соответственно, содержащие передаточные функции (ПФ) отдельных звеньев и статические нелинейности (СН); $\mathbf{\Theta} = \{\Theta_i\}$, $\Theta_i \in 0, 1$ – вектор, фиксирующий наличие ошибок в ПФ и СН: если в i -й ПФ или СН возник дефект, породивший ошибку на ее выходе, то его i -й компонент $\Theta_i = 1$, в противном случае $\Theta_i = 0$.

Ненулевые элементы матрицы F связывают между собой компоненты вектора \mathbf{z} , получаемые на выходах одних звеньев и подаваемые на входы каких-либо других звеньев структурной схемы.

Отметим, что в (1) компоненты матричного произведения $F(p, \mathbf{\Theta})\mathbf{z}(p)$ интерпретируются нетривиальным образом: если элемент F_{ij} матрицы F , стоящий на пересечении i -й строки и j -го столбца, – передаточная функция, компонента $F_{ij}z_j(p)$ понимается как обычное произведение ПФ $F_{ij}(p)$ на переменную $z_j(p)$, если же F_{ij} – статическая нелинейность, то $F_{ij}z_j(p)$ – нелинейная функция F_{ij} с аргументом $z_j(p)$, где z_j – j -я компонента вектора \mathbf{z} .

Как уже указывалось, для наблюдения за состояниями ОД в него вводятся датчики, формирующие некоторый вектор выхода \mathbf{y} . В результате задача ФД решается путем анализа векторов \mathbf{u} и \mathbf{y} . При этом j -я компонента \mathbf{y} связывается с k -й компонентой \mathbf{z} функцией h_j , которая может быть нелинейной, но, как правило, монотонна [4]. В последнем случае существует обратная функция h_j^{-1} : если $y_j(p) = h_j[z_k(p)]$, то $z_k(p) = h_j^{-1}[y_j(p)]$.

Трактуя матричное произведение так же, как в (1), получим $\mathbf{y}(p) = H_y\mathbf{z}(p)$ и $\mathbf{z}^*(p) = H_y^{(-1)}\mathbf{y}(p)$, где H_y – матрица с размерами $m \times n$ ($m \leq n$ – размер вектора выхода \mathbf{y}), j -я строка которой содержит h_j в k -й позиции и нули во всех остальных; $\mathbf{z}^*(p)$ – вектор, составленный из наблюдаемых компонент вектора $\mathbf{y}(p)$; $H_y^{(-1)}$ – матрица с размерами $m \times m$, псевдообратная к H_y : ее ненулевые элементы h_{jj}^{-1} находятся только в главной диагонали, каждый из них равен h_j^{-1} (j – номер строки).

Поскольку $h_j h_j^{-1} = 1$, справедливо соотношение

$$H_y^{(-1)}H_y\mathbf{z}(p) = H\mathbf{z}(p) = \mathbf{z}^*(p), \quad (2)$$

где H – матрица с размерами $m \times n$, в которую переходит H_y после замены ненулевых элементов на 1.

Если $m = n$ и $j = k$, то H_y и $H_y^{(-1)}$ взаимно обратны, а H – единичная матрица E .

Задачу построения УФД в виде наблюдателя состояний для линейного ОД можно решить преобразованием исходной системы в каноническую форму Кронекера, содержащую m подсистем, сумма раз-

меров которых равна размеру исходной системы. Алгоритм такого преобразования изложен, в частности, в [4]. При этом каждая компонента вектора состояния преобразованной системы в общем случае может представлять собой линейную комбинацию аналогичных компонент исходной системы.

В рассматриваемом случае ОД содержит нелинейности, поэтому переход к канонической форме Кронекера, где компоненты вектора состояния подвергаются нетривиальным линейным преобразованиям, может оказаться некорректным. В принятой постановке задачи, где УФД представляет собой банк, состоящий из m наблюдателей, сумма их размеров может превышать размер ОД, причем задача синтеза такого банка в первую очередь включает в себя задачу построения некоторой матрицы соответствия T , устанавливающей связь между компонентами векторов состояния ОД и наблюдателей. Эта матрица должна выделять из исходной системы (т. е. ОД) необходимую подсистему, поэтому каждая ее строка будет содержать только один ненулевой элемент, равный единице, в некоторой позиции. Справедливость данного положения следует из того, что наличие в составе любой строки матрицы T хотя бы двух ненулевых элементов приводит к тому, что соответствующая компонента вектора состояния УФД становится комбинацией двух компонент вектора z . Это, в свою очередь, приведет к преобразованию выражения $F_{ij}(z_k) + F_{ij}(z_l)$ в описании ОД к виду $F_{ij}(z_k + z_l)$, что при нелинейности F_{ij} недопустимо.

Найдем матрицу T и УФД, считая, что каждый наблюдатель из банка задан уравнениями вида

$$\begin{cases} \mathbf{z}^*(p) = F^*(p)\mathbf{z}^*(p) + \\ \quad + G^*(p)\mathbf{u}(p) + S(p)\mathbf{y}(p); \\ \mathbf{y}^*(p) = H^*\mathbf{z}^*(p), \end{cases} \quad (3)$$

в которых символом "*" отмечены описывающие его матрицы и векторы, а матрица S определяет вклад вектора выхода \mathbf{y} в формирование наблюдателя и подлежит определению. При отсутствии ошибок в ОД должно выполняться равенство

$$\mathbf{r}(p) = \mathbf{y}^*(p) - R\mathbf{y}(p) = 0, \quad (4)$$

где $\mathbf{r}(p)$ – вектор ошибки (невязки), на основе анализа которого принимается решение о наличии или отсутствии дефектов в ОД; R – постоянная матрица-строка.

Потребуем, чтобы при отсутствии ошибок для искомой матрицы соответствия T с размерами $k \times n$ ($k \leq n$) выполнялось равенство

$$T\mathbf{z}(p) = \mathbf{z}^*(p). \quad (5)$$

Положив, что все матрицы в (4) и (5) содержат только передаточные функции, можно, исходя из соотношений (1), (3)–(5), получить известные матричные уравнения [4]:

$$T \cdot F = F^* \cdot T + S \cdot H; \quad G^* = T \cdot G; \quad R \cdot H = H^* \cdot T. \quad (6)$$

При наличии в (1) статических нелинейностей для обоснования справедливости первого из уравнений (6) заметим, что из соотношений (1), (3) и (5) следует равенство $(T \cdot F)\mathbf{z} = (F^* \cdot T)\mathbf{z} + (S \cdot H)\mathbf{z}$. Если $(T \cdot F)_{ij}^1$ – статическая нелинейность, то, как отмечено ранее, произведение $(T \cdot F)_{ij} z_j(p)$ понимается как нелинейная функция $(T \cdot F)_{ij}$ с аргументом $z_j(p)$. Тогда согласно правилам определения разности двух нелинейных функций:

$$(T \cdot F)_{ij} z_j - (F^* \cdot T)_{ij} z_j = (T \cdot F - F^* \cdot T)_{ij} z_j.$$

Таким образом, из равенства $(T \cdot F)\mathbf{z} = (F^* \cdot T)\mathbf{z} + (S \cdot H)\mathbf{z}$ следует $T \cdot F = F^* \cdot T + S \cdot H$, т. е. соотношение (5) справедливо и при рассматриваемом типе нелинейности.

Искомый наблюдатель строится в два этапа:

1. Анализируется возможность реализации его в виде, когда на вход наблюдателя поступает только вектор \mathbf{u} , а вектор выхода ОД используется лишь для генерации невязки согласно (4). В этом случае ОД и наблюдатель связаны отношением гомоморфизма [1].

2. При невозможности такой реализации производится достройка наблюдателя.

На первом этапе этой процедуры матрица S принимается равной нулю и выражение для определения матрицы F^* принимает вид

$$T \cdot F = F^* \cdot T. \quad (7)$$

Для определения матрицы F^* воспользуемся тем обстоятельством, что в каждой строке матрицы T , как отмечено ранее, содержится не более одного ненулевого элемента, равного единице. Этот факт, а также соотношение между числом строк и столбцов матрицы T ($k \leq n$) приводят к

¹ Здесь, как и ранее, $(T \cdot F)_{ij}$ – элемент произведения $(T \cdot F)$, стоящий на пересечении i -й строки и j -го столбца.

справедливости выражения $T \cdot T^T = E$, где T^T – операция транспонирования; E – единичная матрица. Таким образом, матрица T^T является правой обратной для T . Исходя из этого, выражение (7) преобразуется следующим образом:

$$F^* = T \cdot F \cdot T^T. \quad (8)$$

Для выяснения возможности варианта реализации наблюдателя с полученной матрицей F^* необходимо проверить справедливость равенства (7). На практике оно выполняется достаточно редко, поэтому, как правило, приходится возвращаться к общему случаю, когда справедливо первое равенство в (6). Перепишем его в виде

$$S \cdot H = T \cdot F - F^* \cdot T.$$

Для определения матрицы S воспользуемся формулой для правой псевдообратной матрицы H^+ [5]. Формула для ее определения вида $H^+ = H^T (H \cdot H^T)^{-1}$ справедлива, если матрица H вещественна, имеет полный ранг и число ее строк меньше числа столбцов. Поскольку матрица H имеет специальный вид (см. (2)), то все эти условия соблюдаются.

Таким образом, окончательно получим:

$$S = (T \cdot F - F^* \cdot T) \cdot H^+. \quad (9)$$

Из второго равенства в (6) по известной матрице R находится H^* :

$$H^* = R \cdot H \cdot T^T. \quad (10)$$

Таким образом, для построения наблюдателя необходимо определить матрицы T и R , а затем, используя выражения (6), (8)–(10), получить матрицы описания УД.

Если j -й датчик имеет нелинейную характеристику, т. е. $y_j = h_j(z_k)$, а $Ry = y_j$, то соотношение $y^* = H^* z^*$ примет вид $y^* = h_j(H^* z^*) = h_j(z_1^*)$, поскольку при выбранном способе определения матрицы H^* (10) произведение $H^* z^*$ выделяет первую компоненту вектора z_1^* . Кроме того, все вхождения компоненты y_j в наблюдатели, построенные в предположении линейности характеристики этого датчика, заменяются на $h_j^{-1}(y_j)$, $j = \overline{1, m}$.

Для определения матриц T и R предлагается алгоритм, построенный по аналогии с известным

в теории линейных систем разложением системы на m подсистем в соответствии с инвариантами Кронекера. В отличие от известного алгоритма предложенный не предполагает нетривиальных линейных преобразований вектора состояния. Считается, что выход каждой из определенных подсистем совпадает с некоторым выходом ОД, а ее входами являются входы и выходы исходной системы. Известно [6], что инварианты Кронекера для линейных систем могут быть получены на основе матриц управляемости и наблюдаемости. Для задачи, рассмотренной в настоящей статье, воспользуемся аналогом матрицы наблюдаемости.

Алгоритм включает следующие операции:

1. Для каждой строки матрицы H определяется номер столбца, содержащего ненулевой элемент. Этот номер вносится во множество N . Положить $j = 1$.

2. Для j -й строки матрицы H определяются номера ненулевых элементов. Эти номера включаются во множество M .

3. Вводится матрица $H_0 = H \cdot F$.

4. Для j -й строки матрицы H_0 образуется множество M_0 из номеров столбцов, содержащих ненулевые элементы.

5. Определяются совпадающие элементы множеств M_0 и N .

6. В j -й строке матрицы H_0 обнуляются элементы, соответствующие найденным совпадающим элементам.

7. Из множества M_0 исключаются элементы, совпадающие с элементами множества N .

8. Определяются совпадающие элементы множеств M_0 и M .

9. В j -й строке матрицы H_0 обнуляются элементы, соответствующие найденным в п. 8 совпадающим элементам.

10. Из множества M_0 исключаются элементы, совпадающие с элементами множества M .

11. Если $H_{0j} \neq 0$, множество M дополняется элементами из множества M_0 . Выполняются переопределение $H_0 = H_0 \cdot F$ и переход к п. 5.

12. Если $H_{0j} = 0$, определяются матрицы T и R . Матрица-строка R имеет число столбцов, равное количеству выходов системы, и содержит единицу в j -й позиции, в остальных – нули. Количество строк матрицы T равно мощности множе-

ства M , количество столбцов – числу n ; i -я строка этой матрицы содержит единицу в позиции, номер которой равен i -му элементу множества M , остальные элементы строки – нули.

13. Согласно выражениям (6), (8)–(10) рассчитываются матрицы описания наблюдателя G^* , F^* , S , H^* .

14. Если $j = m$ – конец процедуры. Иначе положить $j = j + 1$ и перейти к п. 2.

Алгоритм выполняется для каждой строки отдельно до обнуления элементов строк.

Поясним отдельные шаги алгоритма. Множество N содержит номера компонент вектора z , совпадающих с компонентами вектора выхода системы; будем называть их измеряемыми компонентами.

Операция определения совпадающих элементов множеств M_0 и N позволяет выяснить, какие компоненты вектора z , выделенные на текущем шаге алгоритма, являются измеряемыми. Обнуление элементов j -й строки матрицы H_0 исключает из дальнейшей процедуры поиска такие компоненты.

Операция определения совпадающих элементов множеств M_0 и M позволяет выяснить, какие компоненты вектора z , выделенные на текущем шаге алгоритма, уже выбраны для построения текущего наблюдателя. Исключение этих компонент позволяет построить наблюдатели для систем, содержащих ненаблюдаемые петли обратной связи. Как и в предыдущей операции, обнуление элементов j -й строки матрицы H_0 исключает из дальнейшей процедуры поиска такие компоненты и препятствует закликиванию алгоритма.

Если $H_{0j} = 0$, то выделенная в результате работы алгоритма j -я подсистема в качестве входов имеет только входы и выходы ОД и, следовательно, может быть использована в качестве j -го наблюдателя. Аналогичный результат получен в [7] для линейных динамических систем, заданных в пространстве состояний.

На основе блок-схемы предложенного алгоритма (рис. 2) разработана программная реализация с использованием пакета Matlab + Simulink фирмы "MathWork Inc".

В качестве примера построим УФД для азимутального канала электросилового следящего привода (ЭСП) антенного устройства радиотелескопа в режиме "автосопровождение" (рис. 3). Аппаратура ЭСП обеспечивает наведение антенного устройства по азимуту с заданной скоростью и ускорением.

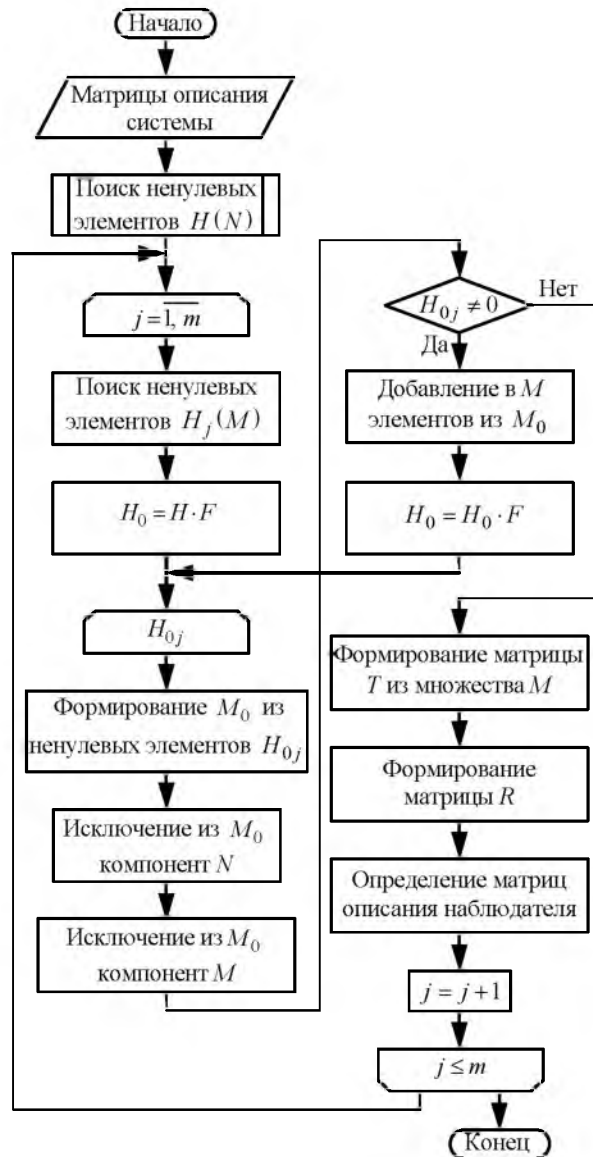


Рис. 2

Схема содержит 19 динамических элементов и 7 замкнутых контуров обратной связи. Динамические свойства объекта диагностирования описываются следующими передаточными функциями:

$$W_1 = \frac{1}{0.0013p^2}; W_2 = 0.000798p + 0.208; W_3 = \frac{1}{p};$$

$$W_4 = \frac{125}{p}; W_5 = 0.12; W_6 = \frac{0.667}{0.046p + 1};$$

$$W_7 = \frac{1}{0.02p^2 + 0.2p + 1}; W_8 = 100; W_9 = 1.7;$$

$$W_{10} = \frac{0.6p + 0.26}{p}; W_{11} = 120; W_{12} = 1.2;$$

$$W_{13} = 1.4p + 0.7; W_{14} = 0.0015; W_{15} = 270;$$

$$W_{16} = \frac{0.74p}{3p + 1}; W_{17} = 0.955; W_{18} = 0.053;$$

$$W_{19} = 0.001.$$

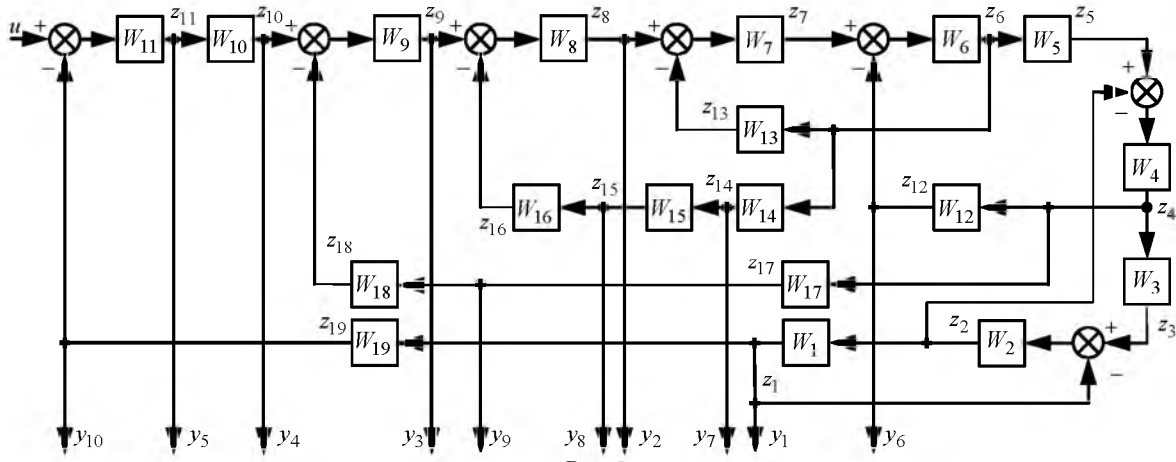


Рис. 3

Матрицы уравнения (1) для рассматриваемой системы имеют большие размеры и являются сильно разреженными, поэтому зададим их ненулевыми элементами. Поскольку матрица G содержит ПФ W_{11} , введем переменную

$$z_{20}(p) = u(p) - z_{19}(p).$$

Тогда $z_{11}(p) = W_{11}z_{20}(p)$.

Матрица F с размерами 20×20 содержит следующие ненулевые элементы:

$$\begin{aligned} F_{1,2} = W_1; \quad F_{2,3} = W_2; \quad F_{2,1} = -W_2; \quad F_{3,4} = W_3; \\ F_{4,5} = W_4; \quad F_{4,2} = -W_4; \quad F_{5,6} = W_5; \quad F_{6,7} = W_6; \\ F_{6,12} = -W_6; \quad F_{7,8} = W_7; \quad F_{7,13} = -W_7; \quad F_{8,9} = W_8; \\ F_{8,16} = -W_8; \quad F_{9,10} = W_9; \quad F_{9,18} = -W_9; \quad F_{10,11} = W_{10}; \\ F_{11,20} = W_{11}; \quad F_{12,4} = W_{12}; \quad F_{13,6} = W_{13}; \quad F_{14,6} = W_{14}; \\ F_{15,14} = W_{15}; \quad F_{16,15} = W_{16}; \quad F_{17,4} = W_{17}; \\ F_{18,17} = W_{18}; \quad F_{19,1} = W_{19}; \quad F_{20,19} = -1. \end{aligned}$$

Ненулевыми элементами матрицы H с размерами 10×20 являются:

$$\begin{aligned} H_{1,1} = 1; \quad H_{2,8} = 1; \quad H_{3,9} = 1; \quad H_{4,10} = 1; \quad H_{5,11} = 1; \\ H_{6,12} = 1; \quad H_{7,14} = 1; \quad H_{8,15} = 1; \quad H_{9,17} = 1; \\ H_{10,19} = 1. \end{aligned}$$

Единственный ненулевой элемент матрицы G с размерами $20 \times 1 - G_{20,1} = 1$.

В результате реализации предложенного алгоритма получим набор множеств:

$$\begin{aligned} M_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 13\}; \quad M_2 = \{8, 16\}; \\ M_3 = \{9, 18\}; \quad M_4 = \{10\}; \quad M_5 = \{11, 20\}; \\ M_6 = \{12, 4, 2, 5, 3, 6, 7, 13\}; \quad M_7 = \{14, 6, 13\}; \\ M_8 = \{15\}; \quad M_9 = \{17, 4, 2, 5, 3, 6, 7, 13\}; \\ M_{10} = \{19\}. \end{aligned}$$

Эти множества содержат номера компонент вектора z , ошибочные значения которых обнаружит разрабатываемый наблюдатель.

На основе множеств $M_1 - M_{10}$ по описанной методике получим матрицы, задающие составляющие банка наблюдателей (3), а затем и их структурные схемы (рис. 4).

Для оценки способности УД к различению неисправностей составим на основе множеств M_i таблицу значений индикаторов (табл. 1) и таблицу соответствия неисправностей различным значениям индикаторов (табл. 2). Индикаторы принимают значения 1, в случае если i -й наблюдатель чувствителен к неисправности рассматриваемого звена, и 0 – в противном случае.

Полученные таблицы характеризуют достигнувшую в результате решения задачи диагностирования глубину поиска. Из анализа таблиц следует, что удастся различить неисправности в звеньях 1, 10, 11, 12, 14, 15, 17, 19; неисправности в группах $\{2, 3, 4, 5\}$, $\{6, 7, 13\}$, $\{8, 16\}$, $\{9, 18\}$ остались неразличимы. Таким образом, для рассматриваемого примера построенное УФД позволяет различить 12 классов дефектов для ОД, состоящего из 19 звеньев.

Диагностическое моделирование азимутально-го канала ЭСП антенного устройства радиотелескопа с построенным банком наблюдателей производилось с помощью пакета Matlab + Simulink фирмы "MathWork Inc". Для него были использованы номинальные параметры, соответствующие исправному объекту диагностирования. Неисправность вводилась как событие, вызывающее в момент времени $t = 1$ скачкообразное изменение параметров объекта на 10 %, что вызывало соответствующую реакцию банка наблюдателей. Так, при указанной неисправности звена W_6 возникала невязка между выходами первого (r_1), шестого (r_6),

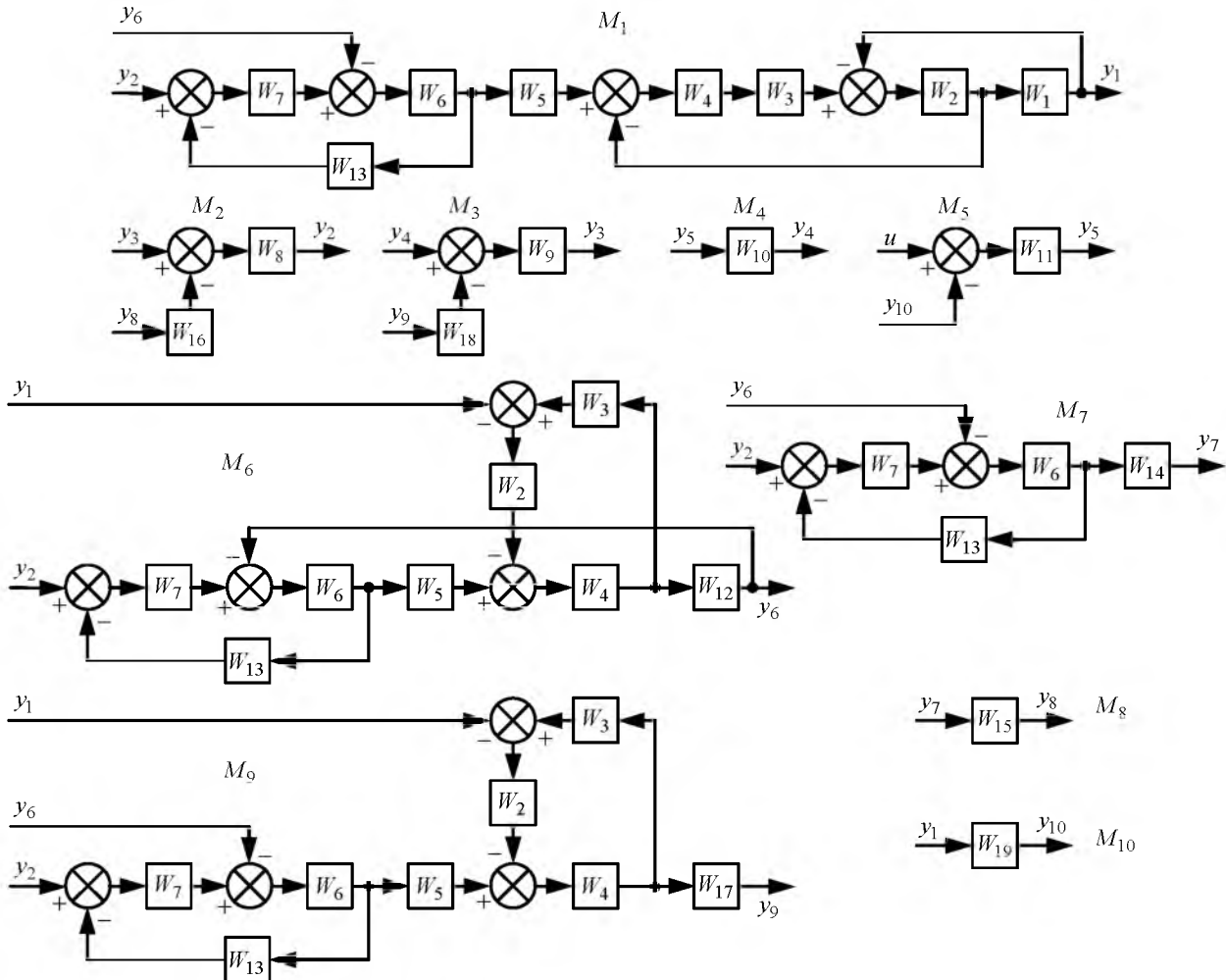


Рис. 4

Таблица 1

Наблюдатели	Звенья объекта диагностирования																		
	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	W_{10}	W_{11}	W_{12}	W_{13}	W_{14}	W_{15}	W_{16}	W_{17}	W_{18}	W_{19}
1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Таблица 2

№	Индикатор	Звенья	№	Индикатор	Звенья	№	Индикатор	Звенья
1	1000000000	W_1	5	0010000000	W_9, W_{18}	9	0000001000	W_{14}
2	1000010010	W_2, W_3, W_4, W_5	6	0001000000	W_{10}	10	0000000100	W_{15}
3	1000011010	W_6, W_7, W_{13}	7	0000100000	W_{11}	11	0000000010	W_{17}
4	0100000000	W_8, W_{16}	8	0000010000	W_{12}	12	0000000001	W_{19}

седьмого (r_7) и девятого (r_9) наблюдателей и соответствующими выходами ОД (рис. 5). Второй, третий, четвертый, пятый, восьмой и десятый наблюдатели к такой ситуации инвариантны.

Преобразование полученного десятикомпонентного вектора невязки, переводящее его из метрики Евклида в метрику Хэмминга, формирует третий индикатор ошибки (табл. 2), соответ-

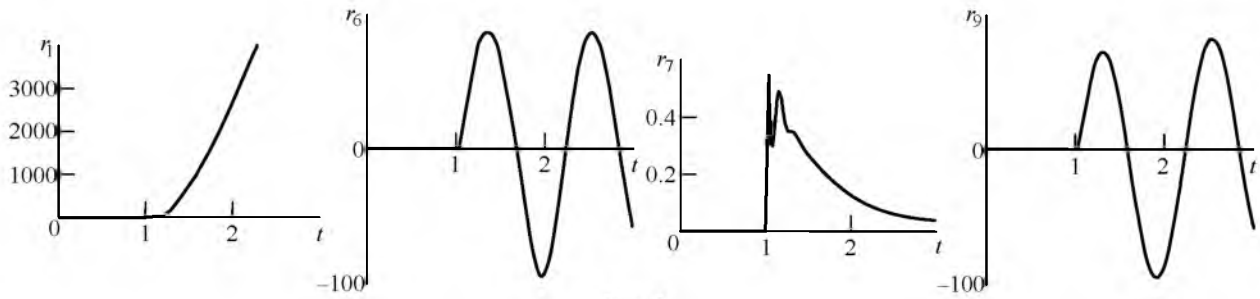


Рис. 5

ствующий наличию неисправности в хотя бы одном из трех звеньев W_6 , W_7 или W_{13} .

В заключение отметим, что предложенный в настоящей статье метод позволяет, используя однотипные преобразования, построить УФД как для линейных, так и нелинейных объектов при условии их реализации в виде совокупности ком-

понентов, входы и выходы которых скалярны, и статическом характере нелинейностей. Поскольку механические и электромеханические узлы радиосистем указанным условиям соответствуют, результаты работы, по мнению авторов, могут быть использованы при решении прикладных задач в области диагностики таких систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подкопаев Б. П. Алгебраическая теория функционального диагностирования динамических систем: в 2 ч. Ч. 2: Системные алгебры, алгебраическая модель функционального диагностирования, реализация модели функционального диагностирования. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 132 с.
2. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. М.; СПб.: Изд-во МГУ-ГРИФ, 1998. 256 с.
3. Жирабок А. Н., Якшин А. С. Диагностирование технических систем, заданных структурными схема-

ми с нелинейными звеньями // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 9. С. 36–44.

4. Андреев Ю. Н. Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976. 424 с.

5. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления. М: Наука, 1984. 320 с.

6. Мироновский Л. А. Аналоговое и гибридное моделирование. Многомерные системы. Л.: Изд-во ЛИАП, 1986. 87 с.

7. Бритов, Г. С., Мироновский Л. А. Критерии избыточности динамических систем // Изв. АН СССР. Сер. Техническая кибернетика. 1980. № 1. С. 149–155.

В. Р. Podkopaev, A. S. Yakshin

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

The Diagnosis of Functional Nodes of Radio Systems with Static Nonlinearities

The problem of diagnosis of functional nodes that are part of radio systems with a static nonlinearity and allowing for the decomposition into components with scalar inputs and outputs. It is shown that in this case it is possible to construct means of functional diagnosis in the form of a Bank of observers, allowing to solve the task not only of detection but also the localization of errors to the maximum possible depth. Offered an appropriate synthesis algorithm means of diagnosis, which is illustrated by an example

Object of diagnosis, means of diagnosis, detection and localization errors, the observer States, state vector, matrix of compliance

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2016 г.