УДК 681.326.74

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Г. С. Бритов,
канд. техн. наук, доцент
Л. А. Мироновский,
доктор техн. наук, профессор
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрено автоматизированное проектирование устройств функционального диагностирования линейных систем автоматического управления. Описан алгоритм синтеза устройств диагностирования, использующий только процедуры и операции линейной алгебры. Приведено программное обеспечение для расчета параметров устройств функционального диагностирования. Показаны результаты его тестирования.

Ключевые слова *— автоматизированное проектирование, функциональное диагностирование, линейные системы автоматического управления, алгоритм синтеза, устройство функционального диагностирования, тестирование программ.*

Введение

Задача функционального диагностирования динамических систем важна для многих приложений. В статье рассматривается организация автоматизированного проектирования устройства функционального диагностирования (УФД), представляющего собой линейную динамическую систему минимальной размерности. В качестве объекта диагностирования выступает линейная система автоматического управления (САУ).

Простейшее функциональное диагностирование может осуществляться методом контроля по модели [1, 2], в котором диагностические признаки получаются как отклонения выходных сигналов объекта диагностирования (ОД) от соответствующих сигналов модели объекта. Другой метод связан с модальным диагностированием, когда моделируется не весь объект, а только одна его мода [2]. Возможен также параметрический контроль, предполагающий идентификацию одного или нескольких параметров объекта по входным и выходным сигналам [3].

В работах [2, 4] была поставлена и решена задача минимизации размерности УФД, т. е. общего порядка описывающей его системы дифференциальных уравнений. Процедура синтеза УФД минимальной размерности, используемая в указанных работах, основывается на концепции алгебраических инвариантов [2] и требует достаточно сложных матричных вычислений.

В настоящей статье предлагается автоматизировать эту процедуру, построив систему для быстрого и надежного вычисления параметров УФД. Эта задача решается известными методами [1, 2] для различных видов математического описания ОД. Преимуществом излагаемого подхода является упрощение процедуры расчета УФД за счет автоматизации рутинных матричных операций.

Устройство функционального диагностирования

Обозначим векторы входных и выходных сигналов проверяемой САУ через $\mathbf{u}(t)$ и $\mathbf{y}(t)$. Все они считаются доступными для измерения. Целью автоматизированного проектирования является получение математического описания УФД. Будем рассматривать УФД как линейную динамическую систему, на вход которой подаются входные и выходные сигналы проверяемой САУ, а на выходе формируется диагностический признак $\Delta(t)$ (рис. 1).

Диагностирование будет осуществляться проверкой равенства

$$\Delta(t) = 0. \qquad (1)$$

В процессе функционирования САУ диагностический признак непрерывно проверяется на равенство

■ ***Рис. 1.*** *Устройство функционального диагностирования*

(1). При отсутствии дефектов оно выполняется с заданной точностью. Его нарушение говорит о возникновении дефектов.

Рассмотрим две постановки задачи синтеза УФД: когда математическое описание САУ задано и когда неизвестно.

В первом случае исходным материалом для синтеза УФД служит математическая модель ОД. Рассмотрим три варианта ее задания: матричное, операторное и структурное.

1. *Матричное описание.* Модель САУ задана уравнениями состояния

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t),\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \qquad (2)$$

где $\mathbf{x}(t)\in R^n$ — вектор состояния; $\mathbf{u}(t)\in R^r$, $\mathbf{y}(t)\in R^s$ — векторы входов и выходов; $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ — постоянные матрицы.

Дефекты САУ приводят к нарушению правильного движения в пространстве состояний, определенного уравнениями (2). Необходимо по матрицам $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ рассчитать УФД так, чтобы при отсутствии дефектов в рабочем режиме выполнялось равенство (1). При этом УФД, вырабатывающее сигнал диагностического признака, должно быть максимально простым и не сводиться, в частности, к обычному дублированию. Это означает, что порядок УФД должен быть минимально возможным.

2. *Операторное описание.* Модель САУ задана матричной передаточной функцией (ПФ) $\mathbf{W}(p)$. Используя введенные обозначения, можно записать уравнение САУ в виде

$$\mathbf{y} = \mathbf{W}(p)\mathbf{u}, \qquad (3)$$

где $\mathbf{W}(p) = [W_{ij}(p)]$, $W_{ij}(p) = \dfrac{B_{ij}(p)}{A_{ij}(p)}$ — скалярные дробно-рациональные ПФ.

Матричная ПФ связана с матрицами описания в пространстве состояний уравнением

$$\mathbf{W}(p) = \mathbf{C}(p\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B},$$

причем переход от $\mathbf{W}(p)$ к описанию в пространстве состояний неоднозначен.

3. *Структурное описание.* Математическая модель САУ может быть задана блок-схемой, которая состоит из линейных блоков с известными ПФ и сумматоров, связывающих указанные блоки. В этом случае уравнения модели можно записать следующим образом:

$$\mathbf{z} = \mathbf{Q}(p)\mathbf{v},\ \mathbf{v} = \mathbf{F}\mathbf{z} + \mathbf{G}\mathbf{u},\ \mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{z}, \qquad (4)$$

где $\mathbf{v}$, $\mathbf{z}$ — входы и выходы линейных блоков; $\mathbf{u}$, $\mathbf{y}$ — входы и выходы САУ; $\mathbf{Q}(p)$ — диагональная матрица ПФ блоков; $\mathbf{F}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{H}$ — матрицы связей.

От структурного описания можно перейти к матричной ПФ с помощью формулы

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{E} - \mathbf{Q}(p)\mathbf{F})^{-1}\mathbf{Q}(p)\mathbf{G}\mathbf{u} = \mathbf{W}(p)\mathbf{u}.$$

Все три рассмотренных варианта задания САУ эквивалентны в том смысле, что, зная один из них, можно перейти к другим. Поэтому для решения задачи автоматизированного синтеза УФД достаточно разработать алгоритмическое и программное обеспечение для одного из вариантов, например для описания в пространстве состояний, дополнив его процедурами перехода к этому виду описания.

Во втором случае постановки задачи синтеза УФД математическое описание априорно неизвестно, однако имеется возможность проводить эксперименты с реальной системой путем подачи на нее некоторых входных сигналов и регистрации выходных сигналов. Здесь можно использовать два подхода к синтезу УФД. Первый, наиболее очевидный подход состоит в получении математического описания САУ с помощью одного из методов идентификации. В литературе описано большое число подобных методов [5], позволяющих найти ПФ либо описание в пространстве состояний. Главный недостаток такого подхода — трудность решения задачи идентификации для систем высокого порядка. Известно, что практические возможности идентификации ограничиваются скалярными объектами третьего порядка.

Определенные шансы преодолеть этот недостаток дает второй подход, в котором не требуется полной идентификации ОД, а сразу определяются параметры УФД, порядок которого существенно меньше порядка объекта. Таким образом, при втором подходе задача идентификации ОД порядка n заменяется более простой задачей идентификации УФД порядка k, причем в типичной ситуации $k = n/s$, где s — число выходов САУ.

Действительно, из рис. 1 следует, что реальные значения всех входов и выходов УФД известны (могут быть измерены), т. е. имеется вся необходимая информация для его идентификации. Исходными данными для решения этой задачи будут две матрицы измерений сигналов

$$\mathbf{U}d = [\mathbf{u}(0), \mathbf{u}(1), \ldots, \mathbf{u}(Nd)];$$

$$\mathbf{Y}d = [\mathbf{y}(0), \mathbf{y}(1), ..., \mathbf{y}(Nd)], \tag{5}$$

где Nd — число отсчетов при измерении входных и выходных сигналов объекта.

Следовательно, при неизвестном математическом описании САУ по результатам измерений можно, используя любой из методов идентификации, найти параметры УФД, минуя этап получения полной математической модели системы.

Алгоритмы расчета УФД

При решении задачи синтеза УФД будем рассматривать его как линейную динамическую систему k-го порядка, структурная схема которой показана на рис. 2. Она содержит последовательную цепочку из k интеграторов, на входы которых через матричные усилители $\boldsymbol{\alpha}_i$, $\boldsymbol{\beta}_i$ поступают входы и выходы проверяемой САУ $\mathbf{u}$, $\mathbf{y}$.

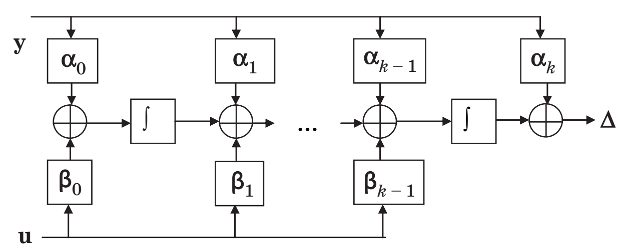
Выходной сигнал УФД $\boldsymbol{\Delta}$ определяется формулой

$$\Delta = \boldsymbol{\alpha}_k\mathbf{y} + \frac{1}{p}(\boldsymbol{\alpha}_{k-1}\mathbf{y} + \boldsymbol{\beta}_{k-1}\mathbf{u}) + \\ + \ldots + \frac{1}{p^k}(\boldsymbol{\alpha}_0\mathbf{y} + \boldsymbol{\beta}_0\mathbf{u}). \tag{6}$$

Синтезу УФД при заданном математическом описании уделено достаточно внимания в работах [1, 2, 6]. Все они опираются на описание ОД в пространстве состояний. Исходными данными соответствующего алгоритма синтеза УФД служат матрицы $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ описания САУ в пространстве состояний. Главным блоком алгоритма является вычисление минимального порядка k УФД. Для этого анализируются ранги частных матриц наблюдаемости САУ, построенных на основе матриц $\mathbf{A}$, $\mathbf{C}$. Расчет вектора-строки коэффициентов $\boldsymbol{\alpha} = [\boldsymbol{\alpha}_0, ..., \boldsymbol{\alpha}_k]$, с которыми выходные сигналы САУ $\mathbf{y}$ поступают на вход УФД, осуществляется путем решения системы уравнений

$$\boldsymbol{\alpha}\mathbf{H}_k = 0. \tag{7}$$

Здесь $\mathbf{H}_k$ — минимальная по размеру частная матрица наблюдаемости САУ, для которой уравнение (7) имеет решение.



■ ***Рис. 2.*** *Схема устройства функционального диагностирования*

Обозначим последний подвектор $\boldsymbol{\alpha}_k$ вектора $\boldsymbol{\alpha}$ через $\mathbf{M}$ и будем называть его вектором контроля, так как он непосредственно участвует в формировании диагностического признака:

$$\boldsymbol{\Delta}(t) = \mathbf{M}\mathbf{y}(t) + \mathbf{z}(t) = 0,$$

где $\mathbf{z}(t)$ — выходной сигнал последнего интегратора УФД (см. рис. 2).

При анализе системы уравнений (7) следует различать два случая: вектор контроля $\mathbf{M}$ задается заранее и может выбираться в процессе синтеза произвольным образом.

Это учитывается при решении системы (7).

Для вычисления вектора коэффициентов $\boldsymbol{\beta}$, с которыми входные сигналы САУ $\mathbf{u}$ подаются на вход УФД, используется формула

$$\boldsymbol{\beta} = -\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{H}_{k-1}\mathbf{B}, \tag{8}$$

где $\boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \ldots & \alpha_k \\ 0 & \alpha_2 & \ldots & \alpha_k \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & \ldots & \alpha_k \end{bmatrix}$ — блочно-треугольная матрица из элементов вычисленного ранее вектора $\boldsymbol{\alpha} = [\boldsymbol{\alpha}_0, ..., \boldsymbol{\alpha}_k]$.

Этим завершается расчет УФД при заданном математическом описании САУ.

Рассмотрим теперь расчет УФД при неизвестном описании САУ. В этом случае исходной информацией служат сигналы результатов измерений входов и выходов (5). Как указывалось выше, для идентификации коэффициентов УФД можно использовать различные методы. Будем ориентироваться на простейший.

При отсутствии дефектов и нулевых начальных условиях уравнение (6) можно записать следующим образом:

$$\boldsymbol{\alpha}_k\,\mathbf{y}_0 + \boldsymbol{\alpha}_{k-1}\,\mathbf{y}_1 + \boldsymbol{\beta}_{k-1}\,\mathbf{u}_1 + ... + \boldsymbol{\alpha}_0\,\mathbf{y}_k + \boldsymbol{\beta}_0\,\mathbf{u}_k = 0,$$

где $\mathbf{y}_i = \frac{1}{p^i}\mathbf{y}$, $\mathbf{u}_i = \frac{1}{p^i}\mathbf{u}$, $i = 0, 1, \ldots, k$.

Для определения коэффициентов этого уравнения рассмотрим его для дискретных моментов времени 0, 1, ..., Nd. Вводя обозначения $\mathbf{V} = [\mathbf{Y}_0, \mathbf{Y}_1, ..., \mathbf{Y}_k, \mathbf{U}_1, ..., \mathbf{U}_k]$, $\mathbf{U}d = [\mathbf{u}(0), \mathbf{u}(1), ..., \mathbf{u}(Nd)]$, $\mathbf{Y}d = [\mathbf{y}(0), \mathbf{y}(1), ..., \mathbf{y}(Nd)]$, приходим к системе алгебраических уравнений

$$\mathbf{V}\mathbf{x} = 0, \tag{9}$$

где $\mathbf{x} = [\boldsymbol{\alpha}_k, \boldsymbol{\alpha}_{k-1}, ..., \boldsymbol{\alpha}_0, \boldsymbol{\beta}_{k-1}, ..., \boldsymbol{\beta}_0]$ — вектор искомых коэффициентов УФД.

Как и раньше, вектор контроля $\mathbf{M} = \boldsymbol{\alpha}_k$ может быть свободным или заданным заранее (фиксированным). Это учитывается при решении системы уравнений (9).

Рассмотрим теперь программную реализацию предложенных расчетов.

Расчеты УФД в *m*-файлах пакета MATLAB

Описанные алгоритмы расчета УФД используют только операции линейной алгебры, поэтому их компьютерная реализация не вызывает затруднений. Разработана программа сценария для выполнения всех этапов процедуры расчета УФД, написанная на языке пакета MATLAB.

Сценарий имеет семь режимов.

- Описание САУ в пространстве состояний.
- Операторное описание САУ матричной ПФ.
- Структурное описание САУ.
- Описание САУ неизвестно.
- Расчет коэффициентов УФД.
- Получение результатов расчета.
- Выход.

При описании САУ задаются параметры математической модели САУ, после чего выполняется расчет коэффициентов УФД. Здесь возможны оба варианта расчета при заданном заранее и выбираемом векторе контроля $\mathbf{M} = \boldsymbol{\alpha}_k$. В случае, когда описание САУ неизвестно, требуется загрузить массивы значений входов, выходов и времени. После этого, задав число отсчетов для идентификации, можно рассчитать коэффициенты УФД.

Результаты автоматизированного проектирования получаются в виде сообщений о значениях коэффициентов УФД и его порядке.

Работоспособность написанных программ для пакета MATLAB была проверена на ряде тестовых примеров. Приведем описание двух из них.

Тестовый пример 1. В качестве ОД рассматривается система второго порядка с двумя входами и двумя выходами (рис. 3).

Описание этой системы в пространстве состояний имеет вид

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) + u_1(t);\ \dot{x}_2(t) = -x_1(t) + u_2(t);$$
$$y_1(t) = x_1(t);\ y_2(t) = x_2(t),$$

т. е. характеризуется матрицами

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Описание матричной ПФ имеет вид

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{p}{p^2+1} & \dfrac{1}{p^2+1} \\ \dfrac{-1}{p^2+1} & \dfrac{p}{p^2+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}.$$

Структурное описание характеризуется матрицами

$$\mathbf{Q}(p) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{p} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{p} \end{bmatrix}, \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \ \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Коэффициенты $\boldsymbol{\alpha}_i$ УФД при заданном векторе контроля $\mathbf{M} = [m_1\ m_2] = [1\ 2]$ находятся из уравнения (7) при $k = 1$:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{01} & \alpha_{02} & m_1 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = 0,$$

что дает $\alpha_{01} = 2$, $\alpha_{02} = -1$, $\alpha_{11} = m_1 = 1$, $\alpha_{12} = m_2 = 2$.

Коэффициенты $\boldsymbol{\beta}_0 = [-1\ -2]$ находим по формуле (8).

Следовательно, описание УФД имеет вид

$$\Delta = y_1 + y_2 + \frac{1}{p}(y_1 - y_2 - u_1 - u_2).$$

Его структурная схема показана на рис. 4.

Если вектор **M** не задан заранее, то система уравнений (7) имеет s-параметрическое семейство решений, т. е. общее решение можно представить в виде линейной комбинации s частных решений. В рассматриваемом примере $s = 2$, и общее решение имеет вид

$$\alpha_{01} = m_2,\ \alpha_{02} = -m_1,\ \alpha_{11} = m_1,\ \alpha_{12} = m_2,$$
$$\beta_{01} = -m_1,\ \beta_{02} = -m_2,$$

где m_1, m_2 — произвольные константы.

В частности, при $m_1 = m_2 = 1$ получим $\alpha_{01} = 1$, $\alpha_{02} = -1$, $\alpha_{11} = 1$, $\alpha_{12} = 1$, $\beta_{01} = -1$, $\beta_{02} = -1$.

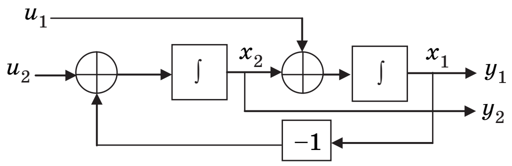
Приведем диалоги ввода данных для автоматизированного расчета УФД для различных вариантов описания ОД.

1. Описание в пространстве состояний:

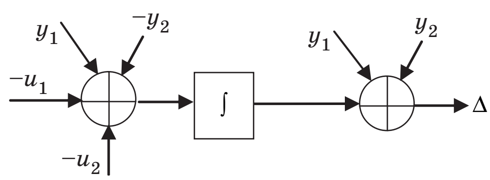
```
Ввести матрицу A = [0 1; –1 0]
Ввести матрицу B = [1 0; 0 1]
Ввести матрицу C = [1 0; 0 1]
Ввести вектор M = [1 2]
Рассчитать параметры УФД
```

2. Описание матричной ПФ:

```
Ввести коэффициенты числителей ПФ Nums = {[ ], ...} = {[1 0], [0 1]; [0 –1], [1 0]}
Ввести коэффициенты знаменателей ПФ Dens = {[ ], ...} = {[1 0 1], [1 0 1]; [1 0 1], [1 0 1]}
Ввести вектор M = [1 2]
Рассчитать параметры УФД
```



■ *Рис. 3. Структурная схема ОД второго порядка*



■ *Рис. 4. Структурная схема УФД для примера 1*

■ ***Таблица 1.*** *Результаты расчетов коэффициентов УФД для тестового примера 1*

Вариант		Коэффициент						
		a_{01}	a_{02}	b_{01}	b_{02}	a_{11}	a_{12}	k
Аналитический расчет при **M** = [1 1]		1	–1	–1	–1	1	1	1
Аналитический расчет при **M** = [1 2]		2	–1	–1	–2	1	2	1
Пространство состояний	Вектор **M** = [1 1]	1	–1	–1	–1	1	1	1
	Вектор **M** = [1 2]	2	–1	–1	–2	1	2	1
Передаточная функция	Вектор **M** = [1 1]	1	–1	–1	–1	1	1	1
	Вектор **M** = [1 2]	2	–1	–1	–2	1	2	1
Структурное описание	Вектор **M** = [1 1]	1	–1	–1	–1	1	1	1
	Вектор **M** = [1 2]	2	–1	–1	–2	1	2	1
Описание неизвестно	Вектор **M** = [1 1]	1,0008	–1,0008	–1,0008	–1,0008	1	1	1

3. Структурное описание:
Ввести коэффициенты числителей ПФ звеньев Nums = {[ ], ...} = {[0 1], [0 1]}
Ввести коэффициенты знаменателей ПФ звеньев Dens = {[ ], ...} = {[1 0], [1 0]}
Ввести матрицу связей звеньев F = [0 1; –1 0]
Ввести матрицу входов G = [1 0; 0 1]
Ввести матрицу выходов H = [1 0; 0 1]
Ввести вектор M = [1 2]
Рассчитать параметры УФД

4. Случай неизвестного описания ОД:
Ввести результаты измерений выходов и входов ОД
Ввести вектор M = [1 2]
Выполнить идентификацию УФД

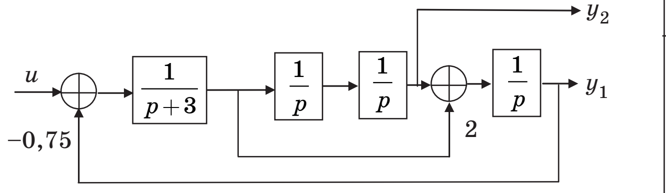
Все тесты дали положительные результаты, показав хорошее совпадение результатов ручного и автоматизированного расчетов коэффициентов УФД при векторах контроля **M** = [1 1] и **M** = [1 2] (табл. 1). При проведении компьютерных экспериментов использовался входной сигнал в виде единичного скачка.

Тестовый пример 2. Объектом диагностирования служит система управления четвертого порядка с одним входом и двумя выходами (рис. 5).

Описание этой системы в пространстве состояний характеризуется матрицами

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix}-3 & 0 & 0 & -0{,}75\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 2 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix},\quad \mathbf{B}=\begin{bmatrix}1\\0\\0\\0\end{bmatrix},\quad \mathbf{C}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}.$$

Коэффициенты $\boldsymbol{\alpha}_i$ УФД при заданном векторе контроля $\mathbf{M}=[m_1\ m_2]$ находятся из системы линейных алгебраических уравнений (7) при $k=2$:



■ ***Рис. 5.*** *Структурная схема ОД четвертого порядка*

$$[\alpha_{01}\quad \alpha_{02}\quad \alpha_{11}\quad \alpha_{12}\quad m_1\quad m_2]\times$$
$$\times\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 2 & 0 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ -6 & 1 & 0 & -1{,}5\end{bmatrix}=0. \tag{10}$$

Решая ее при $m_1=1$, $m_2=2$, получаем

$$\alpha_{01}=-5{,}5,\ \alpha_{02}=3,\ \alpha_{11}=-2,$$
$$\alpha_{12}=5{,}5,\ \alpha_{21}=m_1=1,\ \alpha_{22}=m_2=2.$$

Коэффициенты $\boldsymbol{\beta}_0=-4$, $\boldsymbol{\beta}_1=0$ находим по формуле (8).

Следовательно, математическое описание УФД имеет вид

$$\Delta=y_1+2y_2+\frac{1}{p}(-2y_1+5{,}5y_2)+\frac{1}{p^2}(-5{,}5y_1+3y_2-4u).$$

Его структурная схема приведена на рис. 6.

Если вектор **M** не задан заранее, то общее решение системы (10) имеет вид

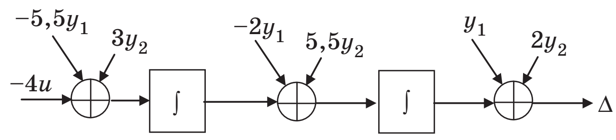
$$\alpha_{01}=0{,}5m_1-3m_2,\ \alpha_{02}=1{,}5m_2,\ \alpha_{11}=-m_2,$$
$$\alpha_{12}=-0{,}5m_1+3m_2,\ \alpha_{21}=m_1,\ \alpha_{22}=m_2,$$
$$\beta_0=-2m_2,\ \beta_1=0,$$

где m_1, m_2 — произвольные константы.

В частности, при $m_1=m_2=1$ получим

$$\alpha_{01}=-2{,}5,\ \alpha_{02}=1{,}5,\ \alpha_{11}=-1,\ \alpha_{12}=2{,}5,\ \alpha_{21}=1,$$
$$\alpha_{22}=1,\ \beta_0=-2,\ \beta_1=0.$$

Отметим, что за счет выбора значений m_1, m_2 можно добиться некоторого упрощения УФД, обратив часть его коэффициентов в нуль.



■ ***Рис. 6.*** *Структурная схема УФД для примера 2*

■ ***Таблица 2.*** *Результаты расчетов коэффициентов УФД для тестового примера 2*

Вариант		Коэффициент								
		a_{01}	a_{02}	b_0	b_1	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	k
Аналитический расчет при **M** = [1 1]		–2,5	1,5	–2	0	–1	2,5	1	1	2
Аналитический расчет при **M** = [1 2]		–5,5	3	–4	0	–2	5,5	1	2	2
Пространство состояний	Вектор **M** = [1 1]	–2,5	1,5	–2	0	–1	2,5	1	1	2
	Вектор **M** = [1 2]	–5,5	3	–4	0	–2	5,5	1	2	2
Передаточная функция	Вектор **M** = [1 1]	–2,5	1,5	–2	0	–1	2,5	1	1	2
	Вектор **M** = [1 2]	–5,5	3	–4	0	–2	5,5	1	2	2
Структурное описание	Вектор **M** = [1 1]	–2,5	1,5	–2	0	–1	2,5	1	1	2
	Вектор **M** = [1 2]	–5,5	3	–4	0	–2	5,5	1	2	2
Описание неизвестно	Вектор **M** = [1 1]	–2,5	1,5	–2	0	–1	2,5	1	1	2

Например, выбор $m_1 = 6$, $m_2 = 1$ делает нулевыми коэффициенты α_{01} и α_{12}.

Приведем диалоги ввода данных для автоматизированного расчета УФД для различных вариантов описания объекта диагностирования.

1. Описание в пространстве состояний:

Ввести матрицу A = [–3 0 0 –0,75; 1 0 0 0; 0 1 0 0; 2 0 1 0]
Ввести матрицу B = [1; 0; 0; 0]
Ввести матрицу C = [0 0 1 0; 0 0 0 1]
Ввести вектор M = [1 2]
Рассчитать параметры УФД

2. Структурное описание:

Ввести коэффициенты числителей ПФ звеньев Nums = {[ ], ...} = {[1], [1], [1], [1]}
Ввести коэффициенты знаменателей ПФ звеньев Dens = {[ ], ...} = {[1 3], [1 0], [1 0], [1 0]}
Ввести матрицу связей звеньев F = [0 0 0 –0,75; 1 0 0 0; 0 1 0 0; 2 0 1 0]
Ввести матрицу входов G = [1; 0; 0; 0]
Ввести матрицу выходов H = [0 0 1 0; 0 0 0 1]
Ввести вектор M = [1 2]
Рассчитать параметры УФД

3. Описание матричной ПФ:

Ввести коэффициенты числителей ПФ Nums = {[ ], ...} = {[1 0]; [2 0 1]}
Ввести коэффициенты знаменателей ПФ Dens = {[ ], ...} = {[1 3 1,5 0 0,75]; [1 3 1,5 0 0,75]}
Ввести вектор M = [1 2]
Рассчитать параметры УФД

4. Случай неизвестного описания ОД:

Ввести результаты измерений выходов и входов ОД
Ввести вектор M = [1 2]
Выполнить идентификацию УФД

Результаты ручного и автоматизированного расчетов коэффициентов УФД при векторах контроля **M** = [1 1] и **M** = [1 2] приведены в табл. 2. Как и ранее, при проведении компьютерных экспериментов использовался входной сигнал в виде единичного скачка. Все тесты дали положительные результаты.

Заключение

Изложен подход к организации автоматизированного проектирования устройств функционального диагностирования для САУ, основанный на применении программ, написанных в пакете MATLAB. Показано, что для многомерных САУ всегда может быть синтезировано УФД сравнительно небольшой размерности, вырабатывающее диагностический признак. Результаты тестирования разработанных программ показали их работоспособность и целесообразность применения при создании систем функционального диагностирования.

Литература

1. **Игнатьев М. Б., Мироновский Л. А., Юдович В. С.** Контроль и диагностика робототехнических систем: учеб. пособие / ЛИАП. — Л., 1985. — 160 с.
2. **Мироновский Л. А.** Функциональное диагностирование динамических систем. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 340 с.
3. **Мироновский Л. А., Михайлов Н. Л.** О двух подходах к синтезу устройства функционального диагностирования // Вычислительные процессы и структуры: Межвуз. сб. / ЛИАП. Л., 1982. Вып. 154. С. 78–83.
4. **Мироновский Л. А.** Функциональное диагностирование линейных динамических систем (обзор) // Автоматика и телемеханика. 1980. № 8. С. 96–121.
5. **Льюнг Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя / Под ред. Я. З. Цыпкина. — М.: Наука, 1991. — 432 с.
6. **Бритов Г. С., Мироновский Л. А.** Расчет тестового режима линейных систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 11. С. 44–49.