УДК 621.38
doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.18

ТЕРМИНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г. С. Бритов[a]*, канд. техн. наук, доцент*
[a]*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ*

Постановка проблемы: *в известных работах по тестовому диагностированию динамических систем описаны методы диагностирования на основе специальных, тестовых сигналов. Однако эти методы оказываются достаточно сложными или небезопасными (дельта-функции, скачки), поэтому стоит задача разработать метод тестового диагностирования динамических систем, обеспечивающий естественное тестовое движение системы, например, в заданных границах. Такое движение системы осуществляется с помощью терминального управления, а организуемое при этом диагностирование можно назвать терминальным.* ***Цель:*** *рассмотреть процесс тестового диагностирования линейных дискретных динамических систем, используя в качестве тестового сигнала заранее рассчитанное терминальное управление.* ***Методы:*** *использована теория управления дискретными системами, позволившая построить формулы получения управления для движения системы в заданных границах.* ***Результаты:*** *разработан метод тестового диагностирования дискретных динамических систем, суть которого в том, что с помощью рассчитанного терминального управления система приходит в состояние с заданными выходами. Благодаря этому диагностические признаки достаточно просты: необходимо проверить получение требуемых выходов. Результаты позволяют осуществить тестовое диагностирование дискретных динамических систем, отличающееся от известных методов тем, что тестовое движение оказывается естественным движением системы в заданных границах.*

Ключевые слова *— модель движения системы, линейная дискретная система, границы движения, терминальное управление, терминальное диагностирование.*

Введение

Системы технического диагностирования могут быть тестовыми и функциональными. Тестовые системы проверяют исправность объекта диагностирования в специальном режиме, а функциональные системы в рабочем режиме контролируют правильность его функционирования. Методы диагностирования зависят от вида объекта диагностирования. В статье рассматривается система тестового диагностирования дискретных динамических систем, использующая в качестве специального тестового режима движение под действием терминального управления. Тестирование линейных динамических систем подробно описано в целом ряде работ [1–10]. Обычно применяемые методы основаны на формировании диагностических признаков, по которым принимается решение об исправности системы. Диагностические признаки, основанные на таких важных характеристиках линейных динамических систем, как нули и операторные нормы, приведены в работах [8, 9], а использование математических моделей — в работах [2–4]. Организация тестирования линейных динамических систем на основе их передаточных функций представлена в работах [1, 10]. Следует отметить методы тестирования на основе специальных входных сигналов системы. Так, в работе [6] рассчитывается комплементарный сигнал, обеспечивающий переход системы за заданное время из нулевых начальных условий опять в нулевые, конечные условия. А в работе [7] предлагается подавать на вход системы аннулирующий сигнал, на который отсутствует выходная реакция системы. Классическим примером такого сигнала является гармонический сигнал, частота которого равна передаточному нулю системы.

На XII Всероссийском совещании по проблемам управления (Москва, 2014 г.) был предложен метод тестирования управляемых динамических систем на основе использования их передаточных функций. Этот метод приводит к новому понятию структурного диагностирования [11].

Терминальное диагностирование было описано в работе [12]. Приведенная классификация показывает, что линейная дискретная система может быть продиагностирована с помощью импульсного или сингулярного терминального управления при нулевых или различных границах движения системы. Организация терминального диагностирования динамических систем предполагает расчет терминального управления, обеспечение требуемого движения системы в заданных границах и проверку диагностических признаков. Последние определяются отклонением конечного состояния от заданной конечной границы движения системы.

Целью настоящей статьи является описание предлагаемой системы тестового диагностирования линейных дискретных динамических систем на основе движения объекта диагностирования под действием рассчитанного терминального управления.

Модели движения дискретной динамической системы

Терминальное диагностирование предполагает движение динамической системы в заданных границах. Это движение определяется математической моделью системы. Рассмотрим ряд таких моделей.

Достаточно широко распространено описание системы уравнениями состояния. Для дискретной многомерной системы такое описание имеет следующий вид:

$$\mathbf{x}(t+1)=\mathbf{A}\cdot\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(t),\ \mathbf{x}(0)=\mathbf{x}_0,\ \mathbf{x}(k)=\mathbf{x}_k;$$
$$\mathbf{y}(t)=\mathbf{C}\cdot\mathbf{x}(t);$$
$$\mathbf{x}(t)\in R^n,\ \mathbf{y}(t)\in R^s,\ \mathbf{u}(t)\in R^m.$$

Вектор $\mathbf{x}(t)$ определяет движение системы в пространстве состояний системы. Оно осуществляется от известных начальных условий $\mathbf{x}_0$ к конечным условиям $\mathbf{x}_k$. Однако движение системы в пространстве состояний недоступно для наблюдения. Его можно наблюдать только с помощью вектора $\mathbf{y}(t)$. Поэтому для расчета вектора $\mathbf{u}(t)$ терминального управления вместо недоступных векторов состояний будут использованы доступные векторы $\mathbf{y}(0)$ и $\mathbf{y}(k)$.

Система четвертого порядка может быть описана уравнениями состояния строковой управляемой канонической формы:

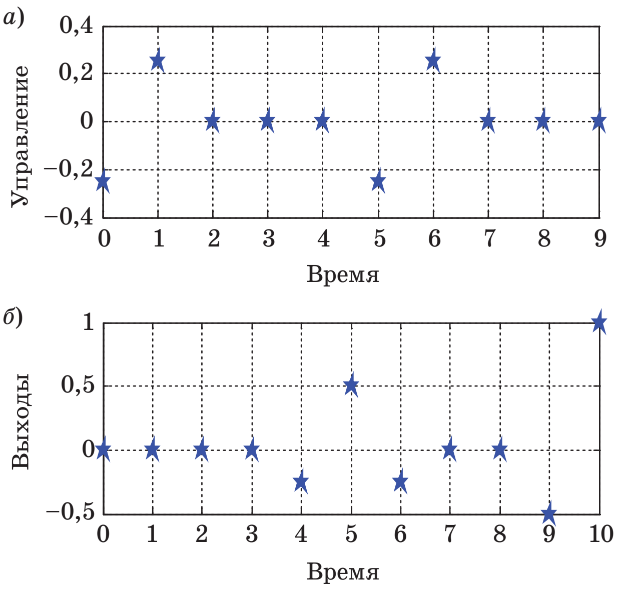
$$x_1(t+1)=x_2(t),\ x_1(0)=x_{10},\ x_1(k)=x_{1k};$$
$$x_2(t+1)=x_3(t),\ x_2(0)=x_{20},\ x_2(k)=x_{2k};$$
$$x_3(t+1)=x_4(t),\ x_3(0)=x_{30},\ x_3(k)=x_{3k};$$
$$x_4(t+1)=-x_1(t)-x_2(t)-x_3(t)-x_4(t)+u(t),$$
$$x_4(0)=x_{40},\ x_4(k)=x_{4k};$$
$$y(t)=x_1(t).$$

Матрицы системы будут следующими:

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

Наблюдаемое движение системы от известных нулевых начальных условий к требуемому единичному конечному условию при $k=10$ показано на рис. 1, *а* и *б* в виде решетчатых функций. Конечный выход равен 1, что соответствует принятому при расчете терминального управления значению.

Таким образом, описание многомерных систем с помощью уравнений состояния представляет собой удобный инструмент для исследования управляемого движения системы.



■ ***Рис. 1.*** Управляемое наблюдаемое движение системы четвертого порядка: *а* — терминальное управление в интервале времени от 0 до 9; *б* — выходы системы в интервале времени от 0 до 10

■ ***Fig. 1.*** Controlled the observed movement of the system of the fourth order: *a* — terminal control in the time interval from 0 to 9; *б* — outputs of the system in the time interval from 0 to 10

Скалярные системы чаще всего описываются рекуррентным уравнением высокого порядка

$$y(t+n)+a_{n-1}\cdot y(t+n-1)+\ldots+a_0\cdot y(t)=$$
$$=b_{n-1}\cdot u(t+n-1)+\ldots+b_0\cdot u(t);$$
$$y(0)=y_0,\ y(1)=y_1,\ \ldots,\ y(n-1)=y_{n-1}.$$

Движение системы от известных начальных условий под действием управления $u(t)$ к требуемому конечному условию $y(k)$ определяется функцией времени $y(t)$.

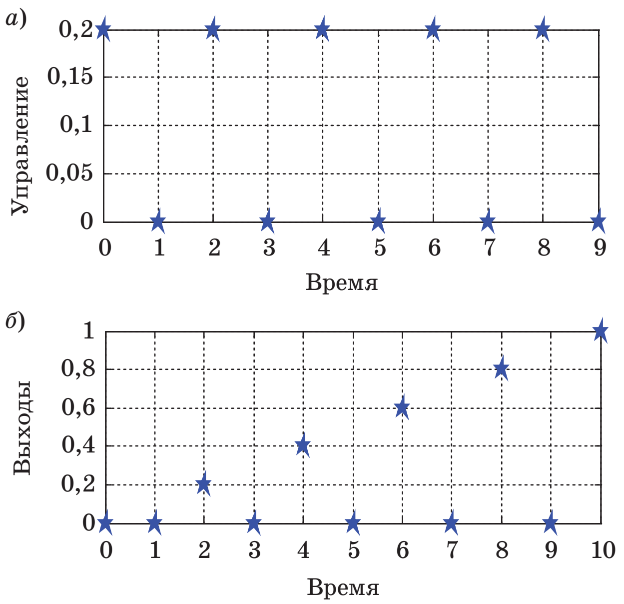
Если все коэффициенты левой части уравнения равны 1, а коэффициенты правой части равны 0, кроме последнего коэффициента, равного 1, то движение такой скалярной системы будет таким же, как на рис. 1.

Многоканальные системы с m входами и s выходами имеют ms каналов: $u_i \to y_j$. Их можно задать полиномиально-матричным описанием

$$\mathbf{A}(z)\cdot\mathbf{y}(z)=\mathbf{B}(z)\cdot\mathbf{u}(z).$$

Здесь z — оператор z-преобразования; $\mathbf{A}(z)$, $\mathbf{B}(z)$ — полиномиальные матрицы, элементами которых служат полиномы от z. Для исследования моноканальной системы построим матричную передаточную функцию

$$\mathbf{W}(z)=\mathbf{A}^{-1}(z)\cdot\mathbf{B}(z).$$



■ ***Рис. 2.*** Управляемое движение канала $u_1 \to y_1$: *а* — терминальное управление; *б* — выходы системы четвертого порядка

■ ***Fig. 2.*** The controlled movement of a channel $u_1 \to y_1$: of the four-channel system: *a* — terminal control; *б* — output of the system of the fourth order

Исследование будет проходить при нулевых начальных условиях для всех каналов системы.

Для четырехканальной системы полиномиально-матричное описание может иметь вид

$$\begin{bmatrix} \dfrac{z}{z+1} & \dfrac{1}{z+1} \\ \dfrac{1}{z} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(z) \\ y_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{z} & 1 \\ 1 & \dfrac{1}{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(z) \\ u_2(z) \end{bmatrix}.$$

Расчет матричной передаточной функции дает следующий результат:

$$\mathbf{W}(z) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{(z^2-1)} & \dfrac{(z^2+z-1)}{(z^2-1)} \\ \dfrac{(z^3-z-1)}{(z^2-1)z} & \dfrac{-1}{(z^2-1)} \end{bmatrix}.$$

Управляемое движение канала $u_1 \to y_1$ при нулевых начальных условиях и единичном конечном условии показано на рис. 2, *а* и *б*. Здесь движение начинается при нулевом выходе и заканчивается при расчетном значении 1.

Таким образом, рассмотренные модели движения линейных дискретных динамических систем позволяют провести детальное их исследование и выполнить расчет терминального управления.

Расчет терминального управления

В работе [11] приведены расчеты сингулярного и импульсного терминальных управлений дискретными системами. Все расчеты терминального управления для рассмотренных моделей движения системы основаны на использовании матрицы марковских параметров

$$\mathbf{M} = [\mathbf{C}\cdot\mathbf{B},\ \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}\cdot\mathbf{B},\ \ldots,\ \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^{k-1}\cdot\mathbf{B}] = \\ = [\mathbf{M}_0,\ \mathbf{M}_1,\ \ldots,\ \mathbf{M}_{k-1}].$$

Если $km > n$ и пара $(\mathbf{A},\ \mathbf{B})$ управляема, то существует бесконечное множество терминальных управлений. Рассмотрим методы расчета некоторых видов терминального управления.

Метод расчета на основе псевдообращения матрицы марковских параметров предполагает сначала оценку состояний в начальный момент времени по свободному движению исправной наблюдаемой системы:

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{A}\cdot\mathbf{x}(t),\ \mathbf{x}(0);$$
$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\cdot\mathbf{x}(t);$$
$$k_0 \ge n/s;$$
$$\mathbf{H} = [\mathbf{C}^{\mathrm{T}},\ \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\cdot\mathbf{C}^{\mathrm{T}},\ \ldots,\ (\mathbf{A}^{\mathrm{T}})^{k_0-1}\cdot\mathbf{C}^{\mathrm{T}}]\Big/$$
$$\hat{\mathbf{x}}(0) = (\mathbf{H}^{\mathrm{T}})^{+}\cdot\mathbf{y}(0,\ k_0-1),$$

где символ «+» означает псевдообращение матрицы.

Затем выполняется непосредственный расчет терминального управления:

$$\mathbf{y}(1) = \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}\cdot\hat{\mathbf{x}}(0) + \mathbf{C}\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(0);$$
$$\mathbf{y}(2) = \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}\cdot\mathbf{x}(1) + \mathbf{C}\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(1) = \\ = \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^2\cdot\hat{\mathbf{x}}(0) + \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(0) + \mathbf{C}\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(1);$$
$$\ldots$$
$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^k\cdot\hat{\mathbf{x}}(0) + \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^{k-1}\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(0) + \ldots + \\ + \mathbf{C}\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(k-1) = \mathbf{y}_k;$$
$$\mathbf{M}\cdot\mathbf{u}(k-1,\ 0) = \mathbf{y}(0,\ k),\ \mathbf{M} = [\mathbf{C}\cdot\mathbf{B},\ \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}\cdot\mathbf{B},\ \ldots, \\ \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^{k-1}\cdot\mathbf{B}],\ \mathbf{y}(0,\ k) = \mathbf{y}_k - \mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^k\cdot\hat{\mathbf{x}}(0);$$
$$\mathbf{u}(k-1,\ 0) = \mathbf{M}^{+}\cdot\mathbf{y}(0,\ k);$$
$$\mathbf{u}(k-1, 0) \to \mathbf{u}(0,\ k-1).$$

Результатом предлагаемого расчета является *km*-мерный вектор программы терминального управления $\mathbf{u}(0,\ k-1)$.

Метод расчета сингулярного терминального управления следует выполнять тогда, когда вектор $\mathbf{y}(0, k)$ оказывается нулевым. Псевдообращение матрицы марковских параметров здесь заменяется получением сингулярного вектора для нулевого сингулярного числа матрицы марковских параметров:

$$\mathbf{y}(0,\ k)=0;$$
$$\mathbf{M}\cdot\mathbf{u}(k-1,\ 0)=0;$$
$$\mathbf{u}(k-1,\ 0)=\mathbf{v};$$
$$\mathbf{u}(k-1,\ 0)\to\mathbf{u}(0,\ k-1).$$

Вектор $\mathbf{v}$ является искомым вектором в расчете программы терминального управления. Следует отметить, что рассмотренный метод расчета сингулярного терминального управления применяется всегда, когда и начальные, и конечные границы движения нулевые.

Импульсное управление также может осуществлять движение системы в заданных границах. Двухимпульсное терминальное управление, осуществляющее движение системы между нулевыми границами, имеет следующий вид:

$$\mathbf{u}(0,\ k)=[\mathrm{u}(0);\ 0;\ \ldots;\ 0;\ \mathbf{u}(k-1)].$$

Первый импульс u(0) задается, исходя из конкретной ситуации, а второй импульс $\mathbf{u}(k-1)$ рассчитывается как решение уравнения

$$\mathbf{y}(k)=\mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^{k-1}\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(0)+\mathbf{C}\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(k-1)=0.$$

Отсюда, полагая, что число выходов меньше числа входов ($s<m$), получим значение второго импульса

$$\mathbf{u}(k-1)=-(\mathbf{C}\cdot\mathbf{B})^{+}\cdot\mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^{k-1}\cdot\mathbf{B}\cdot\mathbf{u}(0).$$

Рассчитанное двухимпульсное терминальное управление создает движение, начинающееся в нуле, и обязательно возвращается в нуль.

При ступенчатом управлении может осуществляться движение в заданных границах. Будем полагать, что указанные ступеньки начинаются в нуле, продолжаются с увеличением на единицу и заканчиваются расчетом последней ступеньки, которая возвращает систему в состояние с нулевым выходом. Расчет такого ступенчатого терминального управления следующий:

$$\mathbf{y}(k)=\mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^{k}\cdot\hat{\mathbf{x}}(0)+\mathbf{M}\cdot\mathbf{u}(k-1,0)=\mathbf{y}_k;$$
$$\mathbf{u}(0,\ k-1)=[0,\ 1,\ 2,\ \ldots,\ (k-2),\ \mathbf{M}_0^{+}\cdot(\mathbf{y}_k-\mathbf{y}_0)];$$
$$\mathbf{y}_0=\mathbf{C}\cdot\mathbf{A}^{k}\cdot\hat{\mathbf{x}}(0).$$

Управление приводит систему в заданное значение выхода системы, начинаясь в заданном начальном значении.

Предложенный вариант терминального управления, основанный на псевдообращении матрицы марковских параметров тестируемой системы, характеризуется тем, что каждый m-мерный блок km-мерного вектора терминального управления $\mathbf{u}(0,\ k-1)$ имеет минимальную евклидову норму. Поэтому такое терминальное управление является единственным управлением.

Двухимпульсное и ступенчатое управления не являются единственными, так как и в первом, и во втором случаях произвольно задается один параметр: либо величина начального импульса, либо размер ступеньки.

Терминальное диагностирование

Терминальное диагностирование линейных дискретных динамических систем целесообразно выполнять при нулевых границах их движения. В этом случае диагностические признаки будут очень простыми: потребуется проверять приход системы в нулевые значения выходов. При организации терминального диагностирования необходимо задавать число шагов тестирования. Выбирать его следует, исходя из динамики системы, определяемой ее собственным движением. Подробно этот вопрос в статье не рассматривается.

Предложение выполнять диагностирование при нулевых границах требует использования сингулярного терминального управления. Покажем расчет такого управления для системы четвертого порядка с помощью математического пакета MatLab:

Вводи...

Матрица коэффициентов = [0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1; –1 –1 –1 –1]

A = 0 1 0 0
0 0 1 0
0 0 0 1
–1 –1 –1 –1

Матрица входов = [0 0 0 1]'

B = 0
0
0
1

Матрица выходов = [1 1 1 1]

C = 1 1 1 1

Конечное время = 10

Конечные условия выходов = 0

yk = 0

Ошибка = 0

Готов ввод

Считаю....

Реальные, неизвестные НУ = [0;0;0;0]

xo = 0
0
0
0

s = –0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 5.5279 5.5279 14.4721 14.4721

Номер нулевого сингулярного числа = 1

Готов счет

Смотри...
Конечные диагностические признаки:
2.2204e–16
Готово

Графики терминального управления и выходов системы без дефекта показаны на рис. 3, *а* и *б*.

Увеличение из-за дефекта всех коэффициентов последней строки матрицы **A** на 0,1 приводит к ненулевому диагностическому признаку:

>> e = 0.1;
>> sctuvx4
Считаю....
Готов счет
Смотри...
Конечные диагностические признаки:
–0.0260
Готово

Характер движения системы при этом почти не меняется (см. рис. 3).

При терминальном диагностировании с нулевыми границами движения можно использовать не только сингулярное, но и импульсное управление. Для скалярной системы пятого порядка вида

$$y(t+5)+y(t+3)+y(t)=u(t+4)+u(t);$$
$$y(0)=1,\ y(1)=1,\ y(2)=0,\ y(3)=1,\ y(4)=0$$

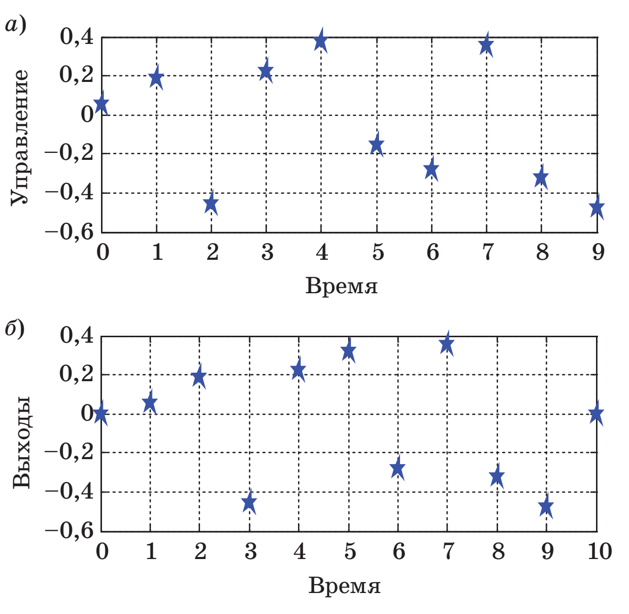
выполним расчет импульсного терминального управления:

Вводи...
Коэффициенты левой части без старшей 1 = [0 1 0 1 0]
Коэффициенты правой части без старшего = [1 0 0 0 1]
Начальные условия выхода и его сдвигов = [1;1;0;1;0]
Конечное время = 20
Конечное условие выхода = 0
Ошибка = 0
Готов ввод
Считаю....
Готов счет
Смотри...
Конечный диагностический признак = **0**
Готово
Конец

Графики терминального управления и выходов скалярной системы без дефекта показаны на рис. 4, *а* и *б*.

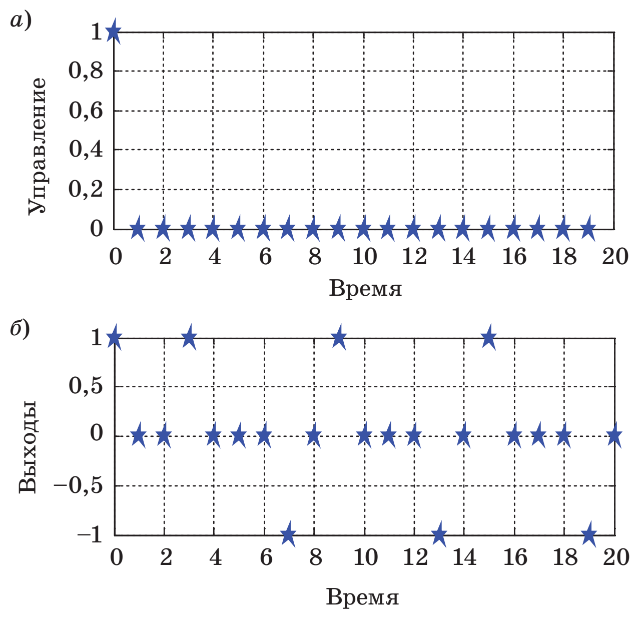
Увеличение из-за дефекта всех коэффициентов левой части рекуррентного уравнения на 0,1 приводит к ненулевому диагностическому признаку:

>> e = 0.1;
>> sctuvx4
Считаю....
Готов счет
Смотри...
Конечный диагностический признак = **0.441264**
Готово
Конец



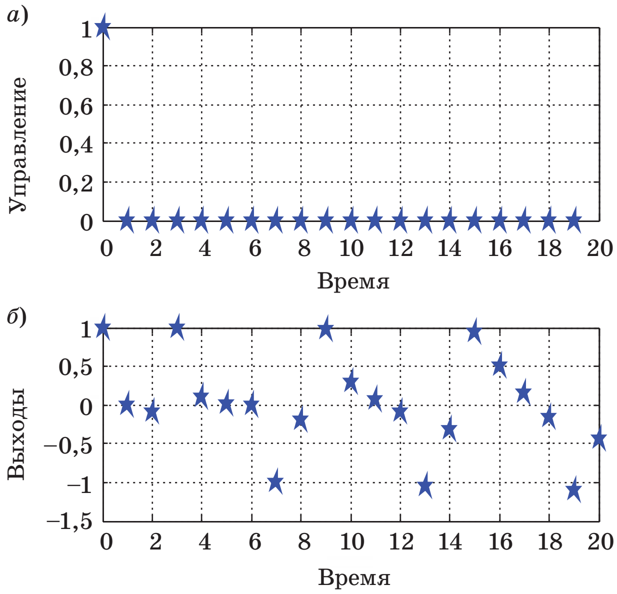
■ ***Рис. 3.*** Управляемое движение системы без дефекта: *а* — терминальное управление; *б* — выходы системы

■ ***Fig. 3.*** Controlled motion system without defect: *а* — terminal control; *б* — output of the system



■ ***Рис. 4.*** Управляемое движение скалярной системы без дефекта: *а* — терминальное управление; *б* — выходы системы

■ ***Fig. 4.*** Controlled motion of a scalar system without defect: *а* — terminal control; *б* — output of the system



■ ***Рис. 5.*** Управляемое движение скалярной системы с дефектом: *а* — терминальное управление; *б* — выходы системы

■ ***Fig. 5.*** Controlled motion of the scalar defect system: *a* — terminal control; *б* — output of the system

Графики терминального управления и выходов скалярной системы с дефектом показаны на рис. 5, *а* и *б*.

Аналогичным образом рассчитывается с помощью математического пакета MatLab ступенчатое терминальное управление. Применение его для четырехканальной системы дает для каждого канала такие же результаты, как и в случае скалярной системы.

Чувствительность терминального диагностирования определяется величиной конечного диагностического признака. В идеальном случае он должен быть равным нулю. Но наличие погрешностей в работе реальной системы приводит к тому, что должен быть назначен допуск на величину конечного диагностического признака. Подробно эта задача рассматривалась в работах по функциональному диагностированию.

Таким образом, терминальное диагностирование, примененное к различным динамическим системам, обеспечивает обнаружение дефектов за счет появления ошибок в известных моделях движения системы.

Заключение

Терминальное диагностирование является новым методом в технической диагностике. Оно позволяет тестировать динамические системы в естественном режиме движения их в заданных границах. Тестовым сигналом в данном случае является рассчитанное заранее терминальное управление. Предлагается выбирать границы движения системы нулевыми. Тогда диагностические признаки оказываются достаточно простыми. Необходимо проверить достижение системой в процессе тестового движения нулевых выходных сигналов. Приведенные в статье расчеты диагностического терминального управления относятся к дискретным системам. Поэтому расчетные формулы получились алгебраически простыми. Псевдообращение матриц реализуется с помощью математического пакета MatLab.

Рассмотренное терминальное диагностирование конкретных систем ограничивалось контролем, с помощью которого обнаруживался факт появления дефекта. Более сложной является задача локализации дефекта. Поскольку в основу терминальной диагностики положены математические модели проверяемых систем, то и локализацию дефектов целесообразно проводить с точностью до элементов этих моделей. Так, при использовании уравнений состояния многомерной системы можно выполнить локализацию дефекта с точностью до одной из матриц этих уравнений. При использовании передаточной функции скалярной системы дефект локализуется либо в числителе, либо в знаменателе этой функции. Что касается полиномиально-матричного описания многоканальной системы, то здесь дефект локализуется с точностью до канала системы.

Другой метод локализации дефекта рассмотрен в работах по функциональному диагностированию и связан с использованием принципа диагностирования по годографам дефектов. Этот принцип требует большой подготовительной работы по созданию годографов.

Работа поддержана грантом РФФИ № 17-08-00244.

Литература

1. **Бритов Г. С.** Метод тестового диагностирования линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2015. № 1. С. 77–85. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.77
2. **Бритов Г. С.** Верификация, валидация и тестирование компьютерных моделей линейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2013. № 2. С. 75–83.
3. **Воронин В. В., Шалобанов С. С.** Диагностирование непрерывных динамических систем методом пробных отклонений параметров модели // Информатика и системы управления. 2010. № 1(23). С. 121–127.
4. **Бритов Г. С., Мироновский Л. А.** Расчет тестового режима линейных систем управления // Приборы

и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 11. С. 44–49.
5. **Мироновский Л. А.** Тестовый контроль линейных систем управления // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2005. № 5. С. 3–8.
6. **Мироновский Л. А.** Диагностирование линейных систем методом комплементарного сигнала // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 5. С. 52–57.
7. **Мироновский Л. А.** Диагностирование систем управления методом аннулирующего сигнала // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2001. № 5. С. 3–7.
8. **Егоров А. Н., Мироновский Л. А.** Использование нулей динамических систем в задачах технической диагностики // Электронное моделирование. 1996. № 6. С. 34–42.
9. **Архангельский О. И., Мироновский Л. А.** Диагностирование динамических систем с помощью операторных норм // Электронное моделирование. 1995. № 5. С. 40–49.
10. **Мироновский Л. А.** Тестовый контроль передаточных функций стационарных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 1984. № 10. С. 22–26.
11. **Мироновский Л. А., Соловьева Т. Н.** Структурное диагностирование управляемых динамических систем // Тр. XII Всерос. совещания по проблемам управления. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 7640–7647.
12. **Бритов Г. С.** Диагностирование динамических систем на основе терминального управления // Системный анализ и логистика. 2016. Вып. 13. С. 3–12.

UDC 621.38
doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.18

Terminal Diagnostics of Discrete Dynamic Systems

Britov G. S.[a], PhD, Tech., Associate Professor, britovgs@gmail.com
[a]Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The known works on test diagnostics of dynamic systems discuss the methods of diagnostics based on special test signals. However, these methods are often too complicated or unsafe (delta functions, jumps, etc). The challenge is to develop a method for testing dynamic systems which would provide a natural test motion of the system, for example, within specified bounds. Such a movement uses terminal control, so the diagnostics can be called terminal. **Purpose:** The goal is to examine the test diagnostics of linear discrete dynamic systems, using predefned terminal control as a test signal. **Methods:** We used the discrete system control theory which allowed us to build formulas for obtaining control of the system motion within given bounds. **Results:** We have developed a method for test diagnostics of discrete dynamic systems. The essence of the method is that using the calculated terminal control, the system comes into a state with the desired output signals. Due to this, the diagnostic criteria are rather simple: you just need to check the required output signals. The obtained results allow you to perform test diagnostics of discrete dynamic systems, which differs from the known methods because the test motion is a natural motion of the system within the given bounds.

Keywords — Motion System Model, Linear Discrete System, Motion Bounds, Terminal Control, Terminal Diagnostics.

References

1. Britov G. S. A Method for Testing Linear Dynamic Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 1, pp. 77–85 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.1.77
2. Britov G. S. Verification, Validation and Testing of Computer Modeles of Linear Dynamic Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 2, pp. 75–83 (In Russian).
3. Voronin V. V., Shalobanov S. S. Diagnosing Continuous Dynamic Systems by the Method of Test Deviations of Parameters of the Model. *Informatika i sistemy upravleniia*, 2010, no. 1(23), pp. 121–127 (In Russian).
4. Britov G. S., Mironovskii L. A. Estimation Testing Procedure of Linear Control Systems. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2006, no. 11, pp. 44–49 (In Russian).
5. Mironovskii L. A. Test Checking of Linear Control Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy na zheleznodorozhnom transporte*, 2005, no. 5, pp. 3–8 (In Russian).
6. Mironovskii L. A. Diagnosis of Linear Systems by Complementary Signal Method. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2002, no. 5, pp. 52–57 (In Russian).
7. Mironovskii L. A. Diagnosis Control Systems by Invalidating Signal Method. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy na zheleznodorozhnom transporte*, 2001, no. 5, pp. 3–7 (In Russian).
8. Egorov A. N., Mironovskii L. A. Using Nulls of Dynamic Systems in Technical Diagnostic Tasks. *Elektronnoe modelirovanie*, 1996, no. 6, pp. 34–42 (In Russian).
9. Arkhangel'skii O. I, Mironovskii L. A. Diagnosis Dynamic Systems by Operator Norms. *Elektronnoe modelirovanie*, 1995, no. 5, pp. 40–49 (In Russian).
10. Mironovskii L. A. Test Checking of Transfer Functions of Stationary Objects. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 1989, no. 10, pp. 22–26 (In Russian).
11. Mironovskii L. A., Solov'eva T. N. Structural Diagnosis of Controlled Dynamic Systems. *Trudy XII Vserossiiskogo soveshchaniia po problemam upravleniia* [Proc. of the 12th All-Russian Meeting on Governance], Moscow, 2014, pp. 7640–7647 (In Russian).
12. Britov G. S. Diagnostics of Dynamic Systems Based on Terminal Management. *Sistemnyi analiz i logistika*, 2016, iss. 13, pp. 3–12 (In Russian).