

УДК 62-83:621

УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

В. А. Атанов,

канд. техн. наук, доцент

Г. С. Бритов,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматриваются устройства функционального диагностирования электропривода, позволяющие обнаружить дефекты, возникающие при его функционировании. Предложено автоматизировать процедуру синтеза устройства функционального диагностирования минимальной размерности, построив систему моделирования исследуемого электропривода и устройства диагностирования.

Ключевые слова — диагностика, непрерывный контроль, моделирование, электропривод.

Введение

При диагностировании систем управления используют два подхода: тестовое диагностирование в специальных, тестовых режимах и функциональное диагностирование, осуществляемое непосредственно в рабочем режиме. Задача тестового диагностирования линейных систем управления подробно рассмотрена, в частности, в статье [1]. Там представлена организация тестового контроля систем управления с помощью рассчитываемого устройства тестового контроля — тестера.

Задача функционального диагностирования динамических систем [2] важна для организации непрерывного контроля, в частности электроприводов. В статье [3] был описан непрерывный контроль электропривода подачи станка с числовым программным управлением (ЧПУ). Была построена структурная схема блока диагностирования, состоящая из одного интегратора и одного сумматора. Диагностирующий признак, вырабатываемый этим блоком, позволял осуществлять непрерывный контроль исследуемого электропривода.

Различные методы функционального диагностирования описаны в работах [2–10]. При всем их разнообразии в них можно выделить объект диагностирования с доступными входами и выходами, устройство получения диагностических признаков и анализатор значений этих признаков. В ряде методов используются простые устройства

получения диагностических признаков, но сложные анализаторы. В других методах, наоборот, стараются упростить процедуру анализа за счет усложнения процедуры получения диагностических признаков.

К методам первой группы относятся, например, допусковый контроль по трубке динамической точности, а также контроль по частотным характеристикам. Получить диагностические признаки здесь несложно путем обычных измерений. А вот проанализировать результаты измерений сложно, так как необходимо хранить параметры динамических траекторий или частотных характеристик.

Примером методов второй группы может служить метод контроля по модели, в котором диагностические признаки получаются как отклонения выходов объекта диагностирования от соответствующих значений 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 [5, 9, 10].

Функциональное диагностирование осуществляется, как правило, с помощью методов второй группы. Здесь обычно строится дополнительная динамическая система определенного порядка. Она является устройством функционального диагностирования (УФД), так как на выходе формируются диагностические признаки. Их анализ

не вызывает никаких трудностей и позволяет определить, правильно ли функционирует диагностируемая система [2].

В работах [1, 2] была поставлена и решена задача минимизации общей сложности УФД, представляющего собой, как и объект, динамическую систему. При этом в качестве критерия сложности использовалась размерность УФД, т. е. общий порядок описывающей его системы дифференциальных уравнений. Процедура синтеза УФД минимальной размерности, используемая в указанных работах, основывалась на концепции алгебраических инвариантов [2] и требовала достаточно сложных матричных вычислений.

Постановка задачи

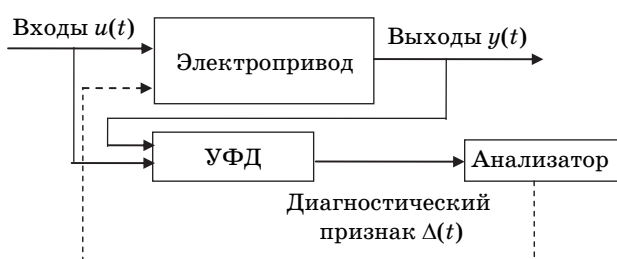
В настоящей статье предлагается применить процедуру синтеза УФД минимального порядка, построив систему моделирования как исследуемого электропривода, так и устройства функционального диагностирования.

В соответствии с этим задача синтеза УФД минимального порядка для данного электропривода сводится к задаче расчета коэффициентов системы дифференциальных уравнений УФД и моделирования их вместе с дифференциальными уравнениями электропривода. Эта задача решается известными методами [1, 2] на основе различных видов математического описания объекта диагностирования.

Преимуществом такого подхода является упрощение процедуры расчета и моделирования УФД за счет автоматизации рутинных матричных операций. А моделирование исследуемого электропривода вместе с УФД позволит проанализировать его диагностические свойства.

Общая схема системы функционального диагностирования электропривода приведена на рис. 1.

Объект диагностирования — электропривод характеризуется доступными входами $u(t)$ и выходами $y(t)$. Они поступают на УФД, которое формирует диагностический признак $\Delta(t)$. Он позволяет определить, правильно или неправильно функционирует электропривод в данный момент



■ Рис. 1. Структура системы функционального диагностирования

времени. Следовательно, можно поставить задачу управления работой электропривода по результатам диагностирования. Эту задачу решает анализатор, который по диагностическому признаку либо допускает осуществлять процесс управления, либо запрещает его. Имеется возможность рассчитать параметры УФД так, чтобы при нормальном процессе управления диагностический признак был близок к нулю [3]. При нарушении процесса слежения, вызванном изменениями параметров электропривода, диагностический признак по абсолютной величине становится больше нуля. Анализатор остановит электропривод.

Функциональное диагностирование электропривода

Рассмотрим пример комплектного электропривода типа ПТ-ЗР-50, используемого в общепромышленных машинах, например в механизме продольной подачи суппорта металлорежущих станков с ЧПУ. Схема главного контура управления по скорости подачи суппорта показана на рис. 2. Она включает обычные блоки, определяющие процесс отслеживания напряжения на выходе устройства ЧПУ u . Расчет коэффициентов передаточных функций блоков электропривода осуществляется на основе требований к характеристикам переходного процесса. Выходы блоков $x_i, i = 1...4$.

Передаточные функции блоков:

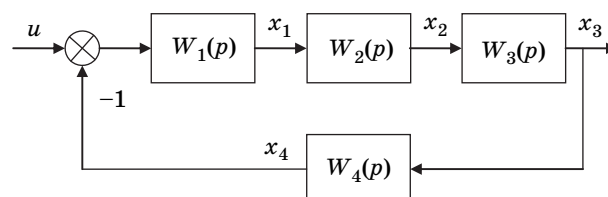
— усилитель напряжения с токоограничением, входом которого является выход датчика рассогласования, а выходом — напряжение постоянного тока x_1 :

$$W_1(p) = \frac{32}{0,003 \cdot p + 1};$$

— корректирующее звено, входом которого является выход усилителя x_1 , а выходом — напряжение постоянного тока x_2 :

$$W_2(p) = \frac{0,0005 \cdot p^2 + 0,06 \cdot p + 1}{0,00052 \cdot p^2 + 0,262 \cdot p + 1};$$

— тиристорный преобразователь с двигателем, входом которого является выход корректирующего звена x_2 , а выходом — угловая скорость двигателя x_3 :



■ Рис. 2. Структурная схема электропривода

$$W_3(p) = \frac{6,279}{0,012 \cdot p^2 + 0,3 \cdot p + 1};$$

— тахогенератор, входом которого является угловая скорость двигателя x_3 , а выходом — напряжение постоянного тока на датчик рассогласования x_4 :

$$W_4(p) = 5.$$

Возможными дефектами электропривода являются существенные отклонения от номинальных значений коэффициента усиления усилителя, параметров корректирующего звена, якорной цепи электродвигателя, элементов отрицательной обратной связи по скорости, обеспечиваемой тахогенератором. Следствием этих отказов оказываются изменения значений коэффициентов передаточных функций блоков.

В статье [1] приведены алгоритм и программа пакета MatLab расчета УФД. Программа представляет собой сценарий, который обеспечивает:

- ввод исходных данных расчета в виде параметров электропривода;
- определение минимального порядка УФД;
- вычисление матриц описания УФД в пространстве состояний;
- моделирование электропривода с УФД;
- изменение параметров электропривода в задаваемое число раз.

Результаты вычисления параметров УФД для исследуемого электропривода с доступным выходом тахогенератора, а также вид диалога с программой:

```
T=1, h=0.01, Текст формулы функции входного сигнала '1+0*t'
Nums=[32],[0.0005 0.06 1],[6.279],[5]], Dens=[0.003 1],[0.0005 0.262
1],[0.012 0.3 1],[1]]
F=[0 0 0 -1; 1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 0], G=[1; 0; 0; 0], H=[0 0 0 1]
Ready
```

матрица коэффициентов:

0	0	0	0
1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0

матрица входов:

0.9999	0.1999
0.0105	0.0020
0.0001	-0.0000
0.0000	0.0000

матрица выходов: 0 0 0 1, матрица обхода: 1.0e-009*[0.3584 0]

Схема рассчитанного УФД с двумя входами ($y = x_4$ и u) показана на рис. 3.

Схема УФД состоит из четырех интеграторов в соответствии с порядком электропривода, который, строго говоря, равен 5, но практически равен 4, так как коэффициент при p^5 равен $1,872 \cdot 10^{-8}$. Четыре весовых сумматора дают возможность

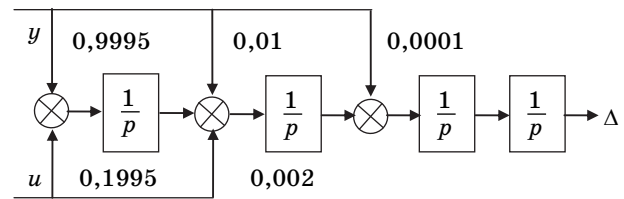


Рис. 3. Структурная схема УФД с двумя входами

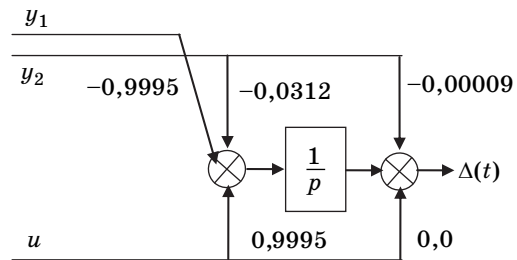


Рис. 4. Структурная схема УФД с тремя входами

получить диагностический признак. Если он близок к нулю, то электропривод работает правильно. Необходимо обратить внимание на то, что при одном доступном для диагностирования выходе электропривода порядок УФД практически совпадает с порядком самого электропривода.

Добавим для организации функционального диагностирования дополнительный выход блока усиления с токоограничением. Тогда результаты работы программы будут следующими:

```
T=T, h=h, Текст формулы функции входного сигнала '1+0*t'
Nums=Num, Dens=Den, F=F, G=G, H=[0 0 0 1; 1 0 0 0]
Ready
матрица коэффициентов: 0
матрица входов: -0.9995 -0.0312 0.9995
матрица выходов: 1
матрица обхода: 1.0e-004 * -0.0000 -0.9370 0
```

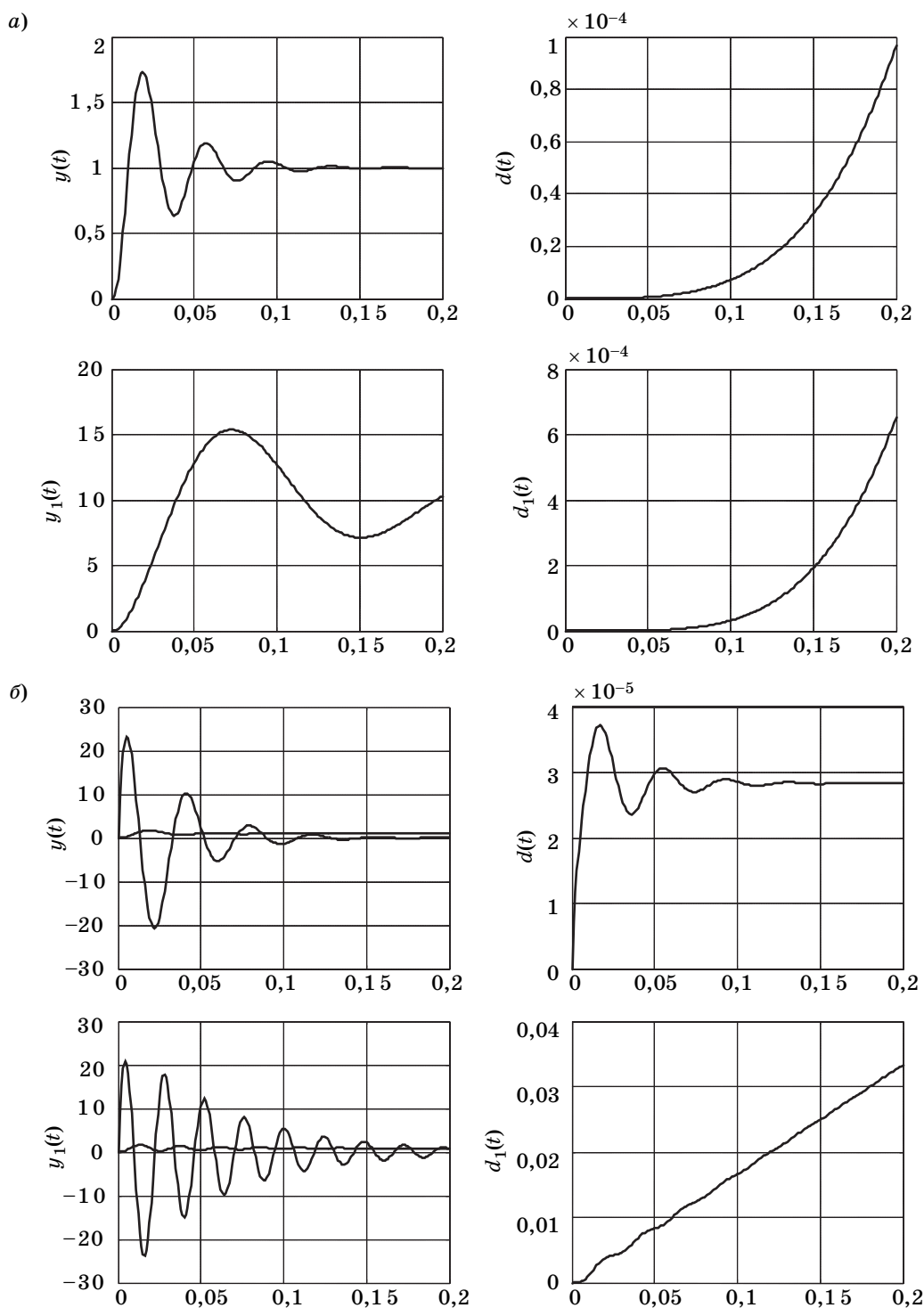
Схема рассчитанного УФД с тремя входами ($y_1 = x_4$, $y_2 = x_1$ и u) показана на рис. 4.

Схема построена только из одного интегратора и двух весовых сумматоров для получения диагностического признака.

Компьютерный эксперимент

В компьютерном эксперименте рассматривались следующие задачи:

- 1) расчет устройства функционального диагностирования на основе заданной структуры электропривода;
- 2) моделирование электропривода при заданной его структуре и единичном скачке на входе;
- 3) моделирование устройства функционального диагностирования без отказов;



■ Рис. 5. Графики компьютерного эксперимента: а — один доступный выход электропривода; б — два доступных выхода электропривода

4) изменение параметров электропривода в результате действия отказов;

5) моделирование устройства функционального диагностирования при наличии отказов.

Указанные задачи позволяют проанализировать чувствительность контроля с помощью УФД.

Моделирование показало, что УФД 4-го порядка с двумя входами обладает очень низкой чувствительностью. Так, при изменении коэффициента тахогенератора в 10 раз, когда переходный процесс изменяется почти в 10 раз, диагностический признак увеличивается только в 8 раз. Обычно ре-

акция диагностического признака должна быть более существенной. Тем не менее, анализатор (см. рис. 1) сможет зафиксировать такой отказ. На рис. 5, а показаны графики переходных процессов электропривода с одним доступным выходом без отказов ($y(t)$) и с отказом тахогенератора ($y_1(t)$), а также графики диагностических признаков в обоих случаях ($d(t)$, $d_1(t)$).

Лучше чувствительность УФД 1-го порядка с тремя входами. При изменении параметров усилителя на 20 % переходный процесс изменяется незначительно, а диагностический признак увеличивается на 3 порядка. Следовательно, анализатор сразу же определит отказ усилителя. На рис. 5, б приведены графики компьютерного эксперимента для УФД с двумя доступными выходами без отказов ($y(t)$) и с отказами ($y_1(t)$), а также графики диагностических признаков в обоих случаях ($d(t)$, $d_1(t)$). Однако отказы других блоков электропривода такой УФД не обнаруживает. Следовательно, нужно строить УФД с тремя входами, но применять разные матрицы \mathbf{H} . Так, для обнаружения отказов в корректирующем звене эта матрица должна иметь вид $\mathbf{H} = [0\ 0\ 0\ 1; 0\ 1\ 0\ 0]$.

Следует отметить, что максимальной чувствительностью будет обладать УФД, построенный на основе единичной матрицы \mathbf{H} , когда доступны для измерения все выходы блоков электропривода. При этом порядок УФД минимален и равен 1.

Кроме того, максимальной чувствительностью обладает УФД, построенный на основе полной модели электропривода. В этом случае для контроля может быть использован только один измеряемый выход, а порядок УФД максимален и равен 5.

Заключение

Устройства функционального диагностирования электропривода могут быть построены с использованием интеграторов и сумматоров. Они позволяют сформировать диагностический признак, по величине которого анализатор может судить о правильности процесса слежения. При одном доступном выходе электропривода устройство функционального диагностирования имеет порядок, близкий к порядку электропривода. При увеличении числа доступных выходов порядок устройства функционального диагностирования уменьшается, приближаясь к единице.

Компьютерный эксперимент показал, что функциональное диагностирование электропривода подачи суппорта станка с ЧПУ можно организовать с использованием интеграторов и сумматоров достаточно экономичным способом. Диагностические признаки позволяют обнаруживать отказы, которые могут возникать при работе электропривода.

Работа выполнена по гранту № 11-08-00240.

Литература

1. Бритов Г. С., Мироновский Л. А. Расчет тестового режима линейных систем управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2006. № 11. С. 44–49.
2. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем. — М.: МГУ, 1998. — 340 с.
3. Атанов В. А., Бритов А. Г. Непрерывный контроль электроприводов // Электротехника. 1991. № 4. С. 55–58.
4. Игнатъев М. Б., Мироновский Л. А., Юдович В. С. Контроль и диагностика робототехнических систем / ЛИАП. — Л., 1985. — 160 с.
5. Мироновский Л. А. Диагностирование систем управления методом аннулирующего сигнала // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. 2001. № 5. С. 3–7.
6. Abdeerrahman A., Cerny E. Worst tolerance analysis and CLP-based multifrequency test generation for analogue circuits // IEEE Trans. Computer-aided design. 1999. Vol. 18. P. 332–345.
7. Lindermeir W., Graeb H., Antreich K. Analogue testing by characteristic observation inference // IEEE Trans. Computer-aided design. 1999. Vol. 18. P. 1353–1368.
8. Chao C., Lin H., Milor L. Optimal testing of VLSI analogue circuits // IEEE Trans. Computer-aided design. 1997. Vol. 16. P. 58–77.
9. Мироновский Л. А., Егоров А. Н. Использование нулей динамических систем в задачах технической диагностики // Электронное моделирование. 1996. № 6. С. 34–42.
10. Архангельский О. И., Мироновский Л. А. Диагностирование динамических систем с помощью операторных норм // Электронное моделирование. 1995. № 5. С. 40–49.