первого порядка в рассматриваемой САУ для заданных максимальных отклонений параметров ее звеньев. По характеристикам видно, что при заданных отклонениях влияние высших производных наиболее высоко в отношении звена № 8 и в особенности – № 4. Для более глубокого анализа погрешности необходимо рассматривать динамику изменения характеристики $\alpha_e(j\omega)$ в разрезе различных отклонений параметров, т.к. любая, на первый взгляд допустимая характеристика $\alpha_e(j\omega)$, может находиться на грани «всплеска» при малейшем увеличении отклонения какого-либо параметра звена. Это особенно заметно в отношении звена № 4, т.к. характеристика $\alpha_4(j\omega)$ (см. рис. 3) уже при 10% отклонениях его параметров принимает искаженный вид.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М.* Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981.
2. *Абдулаев А.М.* Анализ топологии и расчет частотных характеристик систем автоматического регулирования сложной структуры на персональном компьютере // Second International Students Congress of the Asia-Pacific Region Countries. Abstracts. Vladivostok, 1997. P.141-142.

УДК 681.518.5

© 2001 г. **В.В. Бобышев**,
Чье Ен Ун, д-р техн. наук,
С.В. Шалобанов, д-р техн. наук
(Хабаровский государственный технический университет)

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

В статье рассмотрены алгоритмы поиска одиночных структурных и параметрических дефектов в цифровых системах. Рассмотрены методы анализа диагностической модели САУ и приведены результаты исследования разработанных алгоритмов.

Введение

В [1,2] предложены методы диагностирования непрерывных САУ с использованием функций структурной и параметрической чувствительности реакций объекта диагностирования (ОД). В настоящей работе этот подход распространен на цифровые системы автоматического управления.

Алгоритмы поиска одиночных дефектов

Алгоритм поиска одиночного параметрического дефекта на основе теории чувствительности заключается в подборе такого нормированного вектора U_j, $j = 1,...,m$, в $n{\cdot}k$-мерном пространстве (где m – число контролируемых параметров; n – число тактов диагностирования; k – число контрольных точек), направление которого в наибольшей степени совпадает или противоположно направлению вектора деформации динамических характеристик ОД. Диагностический признак наличия дефекта в j-м параметре определяется следующим выражением:

$$J_j = 1 - \frac{\left(\sum_{l=1}^{n}\sum_{i=1}^{k}\Delta X_i[l]\cdot U_{ij}[l]\right)^2}{\sum_{l=1}^{n}\sum_{i=1}^{k}\Delta X_i^2[l]\cdot\sum_{l=1}^{n}\sum_{i=1}^{k}U_{ij}^2[l]}, \tag{1}$$

где J_j – диагностический признак наличия дефекта в j-м параметре; n – число тактов регистрации сигналов ОД; k – количество контрольных точек; $\Delta X_i[l]$ – отклонение реакции в i-й контрольной точке на l-м такте; $U_{ij}[l]$ – значение функции чувствительности в i-й контрольной точке на l-м такте для j-го параметра.

В процессе диагностирования вычисляются диагностические признаки для каждого параметра. Минимальное значение диагностического признака указывает дефектный параметр блока системы. Второе слагаемое формулы (1) есть, по сути, квадрат скалярного произведения нормированных (единичной длины) векторов или квадрат косинуса угла φ между нормированными векторами чувствительности и деформации динамических характеристик. Если направления этих векторов совпадают или противоположны, то $\cos^2\varphi = 1$ и $J = 0$, если не совпадают, то $\cos^2\varphi < 1$ и $0 < J \le 1$. Если нормированные векторы чувствительности и деформации динамических характеристик ортогональны, то $\cos^2\varphi = 0$ и $J = 1$.

Таким образом, поиск одиночного параметрического дефекта с использованием диагностического признака (1) заключается в определении номера параметра ОД, для которого нормированный вектор параметрической чувствительности в $n{\cdot}k$-мерном пространстве в наибольшей степени колленеарен нормированному вектору наблюдаемых в ОД деформаций динамических характеристик. Область изменения нормированных диагностических признаков лежит в пределах от 0 до 1 вне зависимости от степени дефекта (процентного отклонения значения параметра от номинала).

Поиск одиночных структурных дефектов по предложенному ранее алгоритму заключается в определении номера *j*-динамического элемента (ДЭ), для которого совокупность нормированных векторов структурной чувствительности $U_j[l], l=1,...,n$ в *k*-мерном пространстве в наибольшей степени попарно совпадает или противоположна направлениям *n* соответствующих векторов деформации динамических характеристик ОД. Диагностический признак наличия дефекта в *j*-м блоке определяется следующим образом:

$$J_j = \frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\left(1-\frac{\left(\sum_{i=1}^{k}\Delta X_i[l]\cdot U_{ij}[l]\right)^2}{\sum_{i=1}^{k}\Delta X_i^2[l]\cdot\sum_{i=1}^{k}U_{ij}^2[l]}\right), \tag{2}$$

где J_j – диагностический признак наличия дефекта в *j*-м блоке; n – число тактов регистрации сигналов ОД; k – количество контрольных точек; $\Delta X_i[l]$– отклонение реакции ОД в *i*-й контрольной точке на *l*-м такте; $U_{ij}[l]$ – значение структурной функции чувствительности в *i*-й контрольной точке на *l*-м такте для *j*-го блока.

В процессе диагностирования вычисляются диагностические признаки для каждого блока. Минимальное значение диагностического признака указывает дефектный блок системы. Выражение (2) представляет собой среднее значение квадратов синуса угла между парами нормированных векторов чувствительности и деформации динамических характеристик, где усреднение производится по множеству используемых отсчетов динамических характеристик. Признак представлен в нормированном виде на шкале от 0 до 1.

Методы анализа диагностической модели САУ

Различимость пары дефектов может интерпретироваться как “расстояние” между гипотетическими дефектами. Для определения расстояния между ними целесообразно использовать функционал, значение которого показывало бы разницу между диагностическими признаками двух дефектов при возникновении одного из этих двух дефектов. Анализ таких мер различимости позволяет выбрать контрольные точки, необходимые для диагностирования, и оптимизировать интервал регистрации динамических характеристик. Если в выражение для определения диагностических признаков вместо элементов вектора деформации динамических характеристик подставить элементы вектора чувствительности другого параметра или динамического блока, то значение функционала будет определяться парой вектор-функций чувствительности двух параметров или двух блоков и будет определять различимость двух гипотетических параметрических или структурных дефектов. В таком случае мера различимости будет представлять нормированный функционал с диапазоном значений от 0 до 1. Если значение различимости равно 0, то значит эти два дефекта не различимы при данных условиях диагностирования (в контрольных точках и интервале регистрации динамических характеристик), а получаемые диагностические признаки для этих дефектов будут равны.

Для структурного дефекта мера различимости будет выглядеть следующим образом:

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}\left(1 - \frac{\left(\sum_{\mu=1}^{k} U_{\mu j}[l]\cdot U_{\mu i}[l]\right)^2}{\sum_{\mu=1}^{k} U_{\mu j}^2[l]\cdot \sum_{\mu=1}^{k} U_{\mu i}^2[l]}\right),$$

где φ_{ij} – мера различимости между дефектами в i-м и j-м блоках; n – число тактов регистрации сигналов ОД; k – количество контрольных точек; $U_{\mu j}[l]$ – значение функции чувствительности в μ-й контрольной точке на l-м такте для j-го блока.

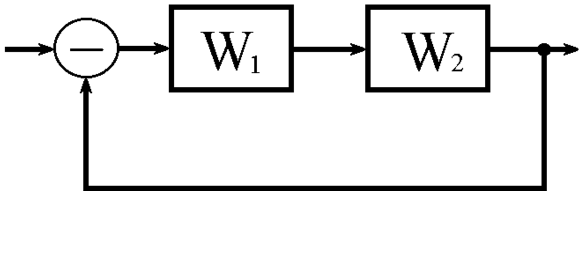
Для параметрического дефекта мера различимости будет вычисляться по формуле:

$$\varphi_{ij} = 1 - \frac{\left(\sum_{l=1}^{n}\sum_{\mu=1}^{k} U_{\mu j}[l]\cdot U_{\mu i}[l]\right)^2}{\sum_{l=1}^{n}\sum_{\mu=1}^{k} U_{\mu j}^2[l]\cdot \sum_{l=1}^{n}\sum_{\mu=1}^{k} U_{\mu i}^2[l]},$$

где φ_{ij} – мера различимости между дефектами в i-м и j-м параметрах; n – число тактов регистрации сигналов ОД; k – количество контрольных точек; $U_{\mu j}[l]$ – значение функции чувствительности в μ-й контрольной точке на l-м такте для j-го параметра.

Экспериментальные исследования алгоритмов

Для исследования методов диагностирования рассмотрим структурную схему, приведенную на рисунке.



Передаточные функции ОД имеют вид:

$$W_1(z) = \frac{K_1 z^{-1}}{K_2 z^{-1} + 1}; \quad W_2(z) = \frac{K_3}{K_4 z^{-1} + 1}.$$

Номинальные значения параметров:

$K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.5$, $K_3 = 0.57$, $K_4 = 0.2$.

Исследование алгоритмов диагностирования проводилось для 20 тактов регистрации при использовании контрольных точек после каждого звена и абсолютных функций чувствительности.

Были получены следующие значения коэффициента различимости дефектов:

структурных

$\phi_{12} = 0.864;$

параметрических

$\phi_{14} = 0.915, \quad \phi_{24} = 0.823, \quad \phi_{34} = 0.369.$

При моделировании дефекта во втором ДЭ ($K_3 = 0.24$) получены следующие значения диагностических признаков:

с использованием алгоритма поиска структурного дефекта

$J_1^* = 0.823; \quad J_2^* = 0.009;$

с использованием алгоритма поиска параметрического дефекта

$J_1^* = 0.881; \quad J_2^* = 0.848; \quad J_3^* = 0.359; \quad J_4^* = 0.007.$

Величины диагностических признаков правильно указывают на место дефекта по минимуму значения соответствующего признака. Сравнивая значения мер различимости и разности между минимальным диагностическим признаком и остальными, можно сделать вывод о их близости. Небольшая разница между коэффициентами объясняется тем, что минимальный признак не равен нулю.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бобышев В.В., Шалобанов С.В.* Нормированные диагностические признаки наличия и различимости одиночных дефектов // Информатика и системы управления. Благовещенск, 2001. №1. С. 54-59.
2. *Бобышев В.В., Шалобанов С.В.* Диагностирование динамических систем методами теории чувствительности // Методы и средства обработки информации. Сборник научных трудов НИИ КТ. Вып.7. Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 1999. С. 29-33.