



Электронное научное издание
«Ученые заметки ТОГУ»
2013, Том 4, № 4, С. 835 – 841

Свидетельство
Эл № ФС 77-39676 от 05.05.2010
<http://ejournal.khstu.ru/>
ejournal@khstu.ru

УДК 681.518.5

© 2013 г. В. Д. Епанешников,
И. В. Епанешникова

(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

ПОИСК КРАТНЫХ ЭФФЕКТОВ САУ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассматривается модель поиска кратных параметрических дефектов в линейных системах автоматического регулирования (САУ). Считаются известными структурная схема САУ и номинальные значения параметров динамических звеньев. Входными данными для расчетов являются переходные кривые в контрольных точках. Диагностирование – поиск отклонений параметров от номинальных значений – производится в частотной области на основе теории чувствительности.

Ключевые слова: кратные параметрические эффекты, системы автоматического регулирования, диагностирование.

V. D. Epaneshnikov, I. V. Epaneshnikova SEARCH MULTIPLES EFFECTS SAU IN THE FREQUENCY FIELD MODEL OF DIAGNOSING LINEAR SYSTEMS OF AUTOMATIC REGULATION

The model search multiples of parametric defects in whether the nonlinear automatic control systems (ATS). Considered to be of known structural scheme of the RAA and nominal values of parameters of dynamic elements. Input data for the calculations are the re-target curves in the control points. Diagnosis - search errors of parameters from nominal values - is performed in the frequency the field on the basis of sensitivity theory.

Keywords: multiple parametric effects, systems of automated control, diagnostics.

Введение

Если проанализировать современные модели и методы технической диагностики, то можно прийти к следующим выводам:

- подавляющее большинство диагностических устройств использует некую модель объекта диагностирования;
- отчетливо прослеживается тенденция максимально возможного учета особенностей внутреннего строения объекта диагностирования вплоть до отдельных функциональных звеньев;
- предпочтение отдается использованию прямых, а не косвенных, диагностических показателей;
- исследователи стремятся к построению возможно более универсальных, и, вместе с тем, простых моделей, методов диагностирования и диагностических устройств;
- просматривается тенденция построения диагностических моделей уже на этапе проектирования систем автоматического управления (САУ).

В обзорной работе [1] сделан анализ интенсивности применения некоторых моделей и методов диагностирования в различных отраслях техники с 1991 по 1996 год. Авторы пришли к выводу, что наиболее часто при оценке значений параметров САУ применяются методы рабочего диагностирования – более 70% всех рассмотренных приложений.

В свете рассмотренных тенденций разработана модель диагностирования непрерывных САУ в частотной области, использующая измерения во временной области (кривые разгона в контрольных точках).

Простое численное прямое преобразование Лапласа

Диагностирование в частотной области предполагает переход от временных функций к их изображениям с чисто мнимыми коэффициентами преобразования Лапласа. Существующие работы, например [2-4], посвящены численному обращению преобразования Лапласа для случая комплексных коэффициентов преобразования, в которых действительная часть больше нуля.

Для иллюстрации работоспособности предлагаемого способа прямого численного преобразования Лапласа с чисто мнимыми коэффициентами преобразования и последующего применения диагностирующих моделей использована структурная схема электропривода постоянного тока [5], подготовленная в среде Matlab-Simulink (Рис. 1).

В схеме параметры задающего воздействия “Step” равнялись: Steptime=0, Initialvalue=0, Finalvalue=1. По сравнению с [5] в сумматоре “Sum” верхний вход положителен. Параметры моделирования равнялись: Starttime=0.0, Stoptime=7, Maxstepsize=0.01, Relativetolerance=1e-09. Переходные кривые в контрольных точках после динамических звеньев записывались в файлы и далее использовались для диагностирования.

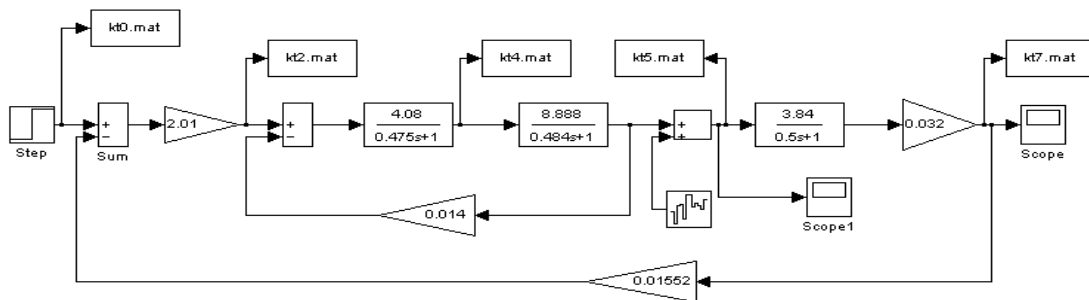


Рис. 1. Структурная схема электропривода

Переходная кривая $f_k(t)$ и ее изображение по Лапласу $F_k(j\omega)$ в контрольной точке k связаны соотношением [6].

$$F_k(j\omega) = (j\omega) \cdot \int_0^{\infty} f_k(t) \cdot e^{-j\omega t} dt, \quad k = [1, K]. \quad (1)$$

Здесь j – мнимая единица, ω – круговая частота, t – время, K – число контрольных точек. Интеграл в выражении (1) можно представить в виде суммы двух интегралов и, предполагая, что после окончания переходных процессов $f_k(t)$ является постоянной, взять второй интеграл аналитически.

$$F_k(j\omega) = (j\omega) \cdot \left(\int_0^{T_0} f_k(t) \cdot e^{-j\omega t} dt + \int_{T_0}^{\infty} f_k(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \right) =$$

$$(j\omega) \cdot \int_0^{T_0} f_k(t) \cdot e^{-j\omega t} dt + f_k(T_0) \cdot e^{-j\omega T_0}. \quad (2)$$

Здесь T_0 – время завершения переходных процессов. Тогда

$$A_k(\omega) = |F_k(j\omega)|, \quad \omega = [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \quad (3)$$

– есть амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) в k -ой контрольной точке, рассчитанная в интервале частот от ω_{\min} до ω_{\max} .

Первый интеграл в выражении (2) использован в работе [7] при диагностировании одиночных дефектов для случая действительных коэффициентов преобразования Лапласа. На рис.2 представлены результаты численного интегрирования выражения (3) по методу Симпсона [8] для контрольной точки 2 (файл kt2.mat, см. рис.1).

Видно, что решение (кривая 2) осциллирует относительно теоретических значений (плавная кривая). Для того чтобы устранить осцилляции, предел интегрирования T_0 в обоих интегралах выражения (2) заменен на $T_k(\omega)$:

$$T_k(\omega) = 2\pi \cdot d / \omega. \quad (4)$$

Здесь $\omega > 0$, k - контрольная точка, d – целое число, которое выбирается таким образом, чтобы $T_k(\omega) \geq T_0$ (или лежало в окрестности T_0) при любом значении ω . В первом приближении для d выбрано выражение:

$$d = \text{int}(\omega / 2\pi) + \text{int}(\omega \cdot T_0 / 2\pi) + 1, \quad \text{где int} – \text{целая часть}. \quad (5)$$

Так как значения $f_k(t)$, взятые из массива kt2.mat (см. рис.1) существуют только в пределах $t = [0, T_0]$, то для всех $t > T_0$ принималось $f_k(t) = f_k(T_0)$.

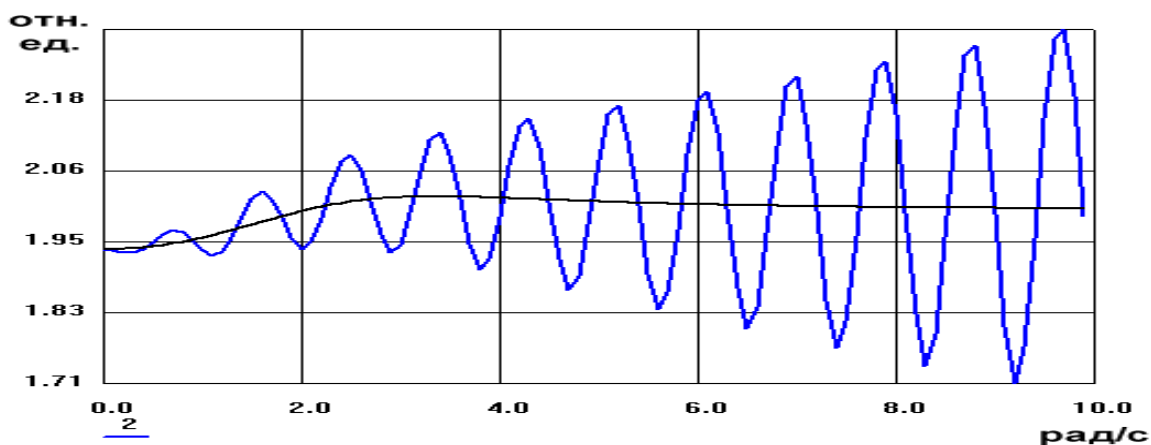


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика в контрольной точке 2

Таким образом, при любом значении ω произведение $T_k(\omega) \cdot \omega$ кратно 2π . Такая замена предела интегрирования T_0 в выражении (2) приводит к тому, что интегрирование по методу Симпсона выражения (3) полностью устраняет осцилляции и расчетная кривая (см. рис. 2), сильно осциллировавшая ранее, строго совпадает с теоретической кривой. Такой результат имеет место для всех контрольных точек.

Модель диагностирования в частотной области

Ставится задача по измеренным в контрольных точках переходным кривым вычислить по (2-5) значения АЧХ и выявить отклонения параметров звеньев структурно-топологической модели САР от номинальных значений.

В рамках метода наименьших квадратов [9] эта задача может быть формализована следующим образом. Запишем вектор невязки:

$$\varepsilon = A - A_r, \quad (6)$$

где ε - вектор невязок наблюдаемых и расчетных значений в контрольных точках; A - наблюдаемые значения выходных функций; A_r - расчетные значения выходных функций в контрольных точках. Вектор A_r можно выразить в приближении малых отклонений параметров, что имеет место при постепенном нарастании неисправностей. Тогда можно ограничиться первыми членами разложения в ряд Тейлора функций выходов по параметрам [10]

$$A_r(\omega, \alpha + \Delta\alpha) = A_r^0(\omega, \alpha) + \sum_i \frac{\partial A_r(\omega, \alpha)}{\partial \alpha_i} \Delta\alpha_i, \quad (7)$$

где ω - круговая частота; α - вектор параметров модели; $A_r^0(\omega, \alpha)$ - вектор расчетных значений АЧХ в контрольных точках при номинальных значениях параметров; i - текущий параметр; $\Delta\alpha_i$ - отклонение текущего параметра.

Если оперировать не с самими выходными величинами, а с их отклонениями от номинальных значений, то

$$\Delta A_r = A_r(\omega, \alpha + \Delta\alpha) - A_r^0(\omega, \alpha). \quad (8)$$

В этом случае уравнение (6) преобразуется следующим образом:

$$\varepsilon = \Delta A - U \Delta\alpha, \quad (9)$$

где U - матрица чувствительности объекта диагностирования к изменению параметров;

ΔA - вектор отклонения параметров от номинальных значений, $\Delta A = A - A_r^0(\omega, \alpha)$ -

отклонения наблюдаемых значений от расчетных при номинальных значениях параметров. Далее, возводя выражение (9) в квадрат, приравнивая производные по параметрам к нулю, получаем матричное уравнение для поиска $\Delta\alpha$.

$$C\Delta\alpha = P. \quad (10)$$

На практике частотные характеристики контролируются для конечного числа N дискретных значений аргумента ω . В этом случае выражения для элементов матрицы C и вектора P принимают вид

$$C_{i,j} = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^K U_{i,k}(\omega_l) U_{j,k}(\omega_l), \quad i, j = [1, M], \quad (11)$$

$$P_i = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^K U_{i,k}(\omega_l) \Delta A_k(\omega_l), \quad i = [1, M]. \quad (12)$$

Здесь $U_{i,k}(\omega_l)$ - чувствительность АЧХ в k -ой контрольной точке (КТ) к изменению i -го параметра на частоте ω_l , M - число искомым параметров, $\Delta A_k(\omega_l)$ - отклонение измеренной АЧХ от расчетной при номинальных значениях параметров для первой итерации и при текущих значениях для последующих итераций в k -ой контрольной точке на частоте ω_l .

АЧХ в КТ рассчитывается с учетом топологии САР по формуле Мэсона [11]. Чувствительность АЧХ в контрольных точках к изменению параметров рассчитывается с помощью методов и алгоритмов из работы [12]. Для обнаружения кратных дефектов решается система линейных уравнений (10) методом Гаусса с выбором максимального элемента по столбцу [13, 14].

В качестве начальных значений параметров принимаются номинальные значения, которые запоминаются в векторе α_{nom} .

Поиск параметров α осуществляется итерационно

$$\alpha^{t+1} = \alpha^t + \Delta\alpha^t. \quad (13)$$

Здесь α^t , α^{t+1} - значения параметров на предыдущей и последующей итерациях; $\Delta\alpha^t$ - решение системы (10) на предыдущей итерации. Перед каждой новой итерацией вычисляется новые значения (11,12) для α^t значений параметров. При сходящемся итерационном процессе $\Delta\alpha^t \rightarrow 0$. Задано конечное число итераций. По окончании итерационного процесса вектор $\Delta\alpha = \alpha^{t+1} - \alpha_{nom}$ показывает отклонение диагностируемых параметров от номинальных значений.

Пример применения диагностирующей модели

Диагностирующая модель реализована в программном комплексе, который использует графический ввод и отображение структурных схем САР. На рис.3 приведена структурная схема, введенная в программный комплекс и аналогичная схеме на рис.1.

Значения параметров, показанные в схеме на рис.1 являются номинальными значениями для схемы на рис.3.

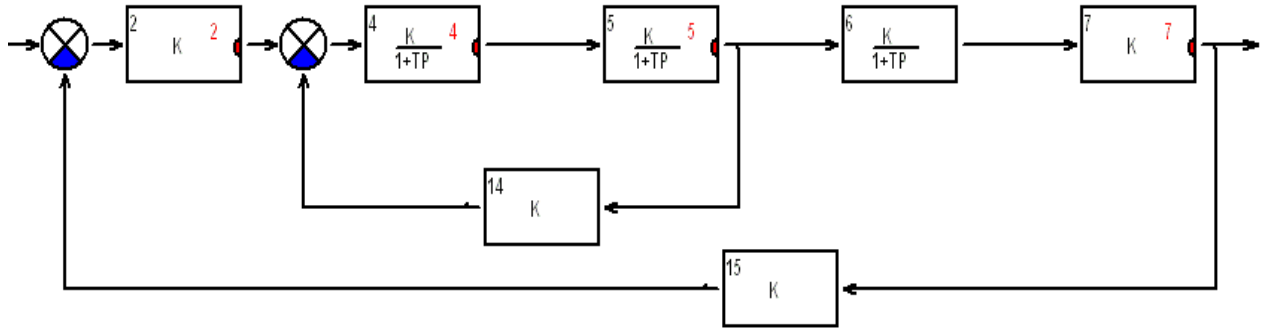


Рис. 3. Структурная схема в идентифицирующей программе

Для проверки работоспособности диагностирующей модели, некоторые параметры схемы на рис.1 были произвольно изменены относительно номинальных значений. В Таблице 1 показаны изменения параметров относительно номинального значения.

Таблица 1

Отклонения параметров

Звено	Старое значение	Новое значение	Отклонение в процентах
2	$K=2$	$K=1.5$	-25
4	$K=4.0$	$K=8.0$	+100
5	$T=0.44$	$T=0.88$	+100
6	$K=3.2$	$K=1.6$	-50

Для новых значений параметров произведено моделирование в среде Simulink реакции системы на единичное входное воздействие и переходные кривые в контрольных точках записаны в файлы.

Из переходных кривых вычислялись АЧХ по формулам (2-5), которые затем принимались в качестве “измеренных” в контрольных точках схемы на рис.3. Так как для схемы на рис.3 неизвестно, какие именно параметры схемы на рис.1 были изменены, то в качестве “искомых” принимались все параметры (коэффициенты передачи и постоянные времени) схемы на рис.3.

Результаты расчетов по формулам (10-13) для набора из семи диагностирующих частот (1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.7; 2.4) приведены в Таблице 2.

Таким образом, из переходных кривых в семи контрольных точках найдены значения десяти параметров. Модель вполне работоспособна и может быть использована для параметрического диагностирования линейных систем автоматического регулирования.

Результаты расчетов

Номер звена	Найденное значение	Ошибка относительно истинного значения (в процентах)
2	$K = 1.4999826$	-0.00116
4	$K=8.00792789$	+0.09909
	$T=0.4995588$	-0.08824
5	$K=8.792593$	-0.08417
	$T=0.877214789$	-0.3165
6	$K=1.6005277$	+0.03298
	$T=0.200337$	+0.1685
7	$K=0.016$	0.0
14	$K=0.01999$	-0.05
15	$K=0.015553$	-2.793

Список литературы

- [1] Isermann R., Balle P. Trends in the application of model based fault detection and diagnosis of technical processes. 13th Triennial World Congress. IFAC. San Francisco, USA, 1996, p. 1-12.
- [2] Крылов В.И. Приближенное вычисление интегралов. М.: Наука, 1967.
- [3] Андрейченко Д.К. Эффективный алгоритм численного обращения интегрального преобразования Лапласа. ЖВМ и МФ, 2000, т. 40, №7, с. 1030-1044.
- [4] Рябов В.М. Обобщенные квадратурные формулы численного обращения преобразования Лапласа. Вестник СПб ун-та. Сер. 1, 2002, №25, с. 23-33.
- [5] Кондрашова Л.А., Николайчук Д.Н. Исследование динамических свойств автоматизированного электропривода постоянного тока в режимах стопорения. Труды Дальневосточного государственного университета. Выпуск № 130, статья 52.
- [6] Душин С.Е., Зотов Н.С., Имаев Д.Х., Кузьмин Н.Н., Яковлев В.Б. Теория автоматического управления. М.: Высшая школа, 2003.
- [7] Шалобанов С.В. Способ контроля динамического блока в составе системы управления и устройство для его осуществления. Патент России 2136033. №98115937/09(017487); опубл. 27.08.99, бюл.№24.
- [8] Пирумов У.Г. Численные методы. М.: Дрофа. 2003.
- [9] Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970.
- [10] Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981.
- [11] Мэзон С., Циммерман Г. Электронные цепи, сигналы и системы. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963.
- [12] Вавилов А.А., Имаев Д.Х. Машинные методы расчета систем управления. Ленинград: Изд. ЛГУ, 1981.
- [13] Ракитин В.И., Первушин В.Е. Практическое руководство по методам вычислений с применением программ для персональных компьютеров. М.: Высшая школа, 1998.
- [14] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962.

E-mail: - fkon@ais.khstu.ru