681 5 15 681

Б охин Держа

П ОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛО ИИ СТРУКТУРНОЙ Д НТИ ИКА ИИ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ОБ ЕКТОВ ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Предло ен алгоритм структурной идентификации моделей динамики объектов по данным натурных испытаний Разработана методика проведения структур н й идентификации при натурном эксперименте выработаны требования к съему и обработке эксперимента л ной информации Разработаны программы ре ения задач структурной идентификации на П ак илл страция эф фективности алгоритма структурной идентификации приведен пример идентифика ии модели трехмерного динамического стенда

Обеспечить конкурентоспособность систем управления объектами в качестве в на стоящее время представляется возможным по результатам синтеза их оптимальных струк ур Для проведения такого синтеза необходимо знать реальные модели динамики заданных астей (объекта управления управляющих и возмущающих воздействий помех и т п) про ектируемой системы. Такие модели необходимы для эффективного выполнения аналитиче ского проектирования 1 оптимальных систем управления Уточнению моделей способст ует систематическое накопление информации о динамических характеристиках звеньев прототипов систем сигналов воздействий и помех получаемых в результате выполнения соответствующих этапов идентификации которые обычно производят как в процессах ла бораторно стендовых так и натурных испытаний и исследований

Несмотря на большое количество известных методов структурной идентификации динамики различных объектов управления многие из них недостаточно информативны (так например они не позволяют определять возмущения действующие на исследуе мый объект при натурных испытаниях)

елесообразно разработать сравнительно простые и удобные в практике алгорит ы идентификации динамики объекта ти алгоритмы должны обеспечить решение за дач определения по данным натурных испытаний моделей динамики объекта и возму щений действующих на него Поскольку реальные условия эксплуатации стохастичны необходима стохастическая постановка каждой конкретной задачи идентификации При проведении этапов идентификации по известным подходам часто не учитывают случай ну составляющую сигналов Полученные экспериментальные данные усредняются и в да ьнейшем проводят идентификацию модели динамики объекта по этим данным При том теряется информация которую несет случайная составляющая сигнала Однако эта информация и необходима для определения динамических характеристик исследуемых

Электронный архив библиотеки Томского политехнического университета

Подставляя равенство (2) в (1) получим

$$Px = Mu + \Psi\Delta. \tag{3}$$

Для удобства дальнейших преобразований введем обозначения

$$\Phi = (P^{-1}M, P^{-1}\Psi) = (K, W); \qquad y = (u', \Delta')', \tag{4}$$

где y – обобщенный вектор входных воздействий; " ′ " – знак транспонирования матрицы.

С учетом обозначений (4) уравнение (3) примет тождественный вид

$$x - \Phi y = 0. \tag{5}$$

При подстановке в уравнение (5) получаемых экспериментально оценок векторов сигналов $\hat{x}$ и $\hat{u}$ равенство не будет выполняться строго и его следует переписать как

$$\varepsilon = \hat{x} - \Phi\hat{y}. \tag{6}$$

В формуле (6) вектор ε - ошибка идентификации объекта, вызванная погрешностями измерений векторов сигналов x и u.

В последующих формулах используются оценки (результаты измерений) величин $\hat{x}, \hat{y}$ и $\hat{u}$, поэтому для упрощения записи значок «^» над ними не указывается.

Задача идентификации состоит в том, чтобы, используя оценки векторов x и u, определить блочную матрицу Φ, которая обеспечит минимальную ошибку идентификации. В функционале качества идентификации использовано выражение вида

$$e = \langle \varepsilon' A \varepsilon \rangle = \frac{1}{j}\int_{-j\infty}^{j\infty} tr(S'_{\varepsilon\varepsilon} A)ds, \tag{7}$$

где A – положительно определенная, симметрическая матрица известных весовых коэффициентов; tr – след матрицы; $S_{\varepsilon\varepsilon}$ – матрица спектральных плотностей ошибки идентификации; $\langle\ \rangle$ – знак математического ожидания.

Матрицу $S'_{\varepsilon\varepsilon}$ найдем с помощью теоремы Винера-Хинчина, используя уравнение

$$S'_{\varepsilon\varepsilon} = \langle \varepsilon\varepsilon_* \rangle = S'_{xx} - S'_{yx}\Phi_* - \Phi S'_{xy} + \Phi S'_{yy}\Phi_*, \tag{8}$$

где «*» - символ эрмитового сопряжения.

С учетом обозначений (4) соответствующие матрицы спектральных и взаимных спектральных плотностей можно записать как

$$S'_{yy} = \begin{bmatrix} S'_{uu} & 0 \\ 0 & S_{\Delta\Delta} \end{bmatrix}; \quad S'_{yx} = \begin{bmatrix} S'_{ux} \\ S'_{\Delta x} \end{bmatrix}. \tag{9}$$

Используя выражение (8) перепишем (7) в виде

$$e = \frac{1}{j}\int_{-j\infty}^{+j\infty} tr\left[\left(S'_{xx} - S'_{yy}\Phi_* - \Phi S'_{xy} + \Phi S'_{yy}\Phi_*\right)A\right]ds \tag{10}$$

Задача отыскания функции Φ эквивалентна задаче минимизации функционала (10) на классе физически реализуемых дробно-рациональных функций Φ. Эта задача решена [1] с применением процедуры метода Винера – Колмогорова. Как известно [3], для нахождения алгоритма минимизации функционала (10) необходимо определить матрицы взаимных спектральных плотностей выходного сигнала x и входного ψ из дополнительного уравнения связи между матрицами спектральных плотностей входных и выходных сигналов объекта идентификации

$$S'_{x\Delta}(S'_{\Delta\Delta})^{-1}S'_{\Delta x} = S'_{xx} - S'_{xu}(S'_{uu})^{-1}S'_{ux}. \tag{11}$$

Результат факторизации [3] левой части уравнения (11) определяет искомую матрицу $S'_{x\Delta}$, которая необходима для подстановки в выражение (8) и (9), взаимной спектральной плотности S'_{yx}. После нахождения матриц $S'_{\Delta x}(S'_{x\Delta})$ сформулированная задача минимизации функционала на классе функций Ф определена. Для решения указанной задачи найдем первую вариацию функционала

$$\delta e = \frac{1}{j}\int_{-j\infty}^{+j\infty} tr[A(\Phi S'_{yy} - S'_{yx})\delta\Phi_* + \delta\Phi(S'_{yy}\Phi_* - S'_{xy})A]ds. \qquad (12)$$

Условие, обеспечивающее тождественное равенство нулю вариации (12), как известно [3], имеет вид

$$\Phi = (P^{-1}M, P^{-1}\Psi) = \Gamma^{-1}(N_0 + N_+)D^{-1}, \qquad (13)$$

где Г - результат факторизации матрицы $\Gamma_*\Gamma = A$; D - результат факторизации матрицы $DD_* = S'_{yy}$; $N = N_0 + N_+ + N_-$ - результат сепарации матрицы

$$N = \Gamma S'_{xy} D_*^{-1}. \qquad (14)$$

Выражение (13) представляет собой алгоритм структурной идентификации требуемых моделей динамики многомерного объекта.

Полученный алгоритм реализуют следующей последовательностью вычислений:

– обрабатывают полученные экспериментально реализации сигналов u и x и получают матрицы спектральных и взаимных спектральных плотностей этих сигналов $S_{xx}, S_{uu}, S_{ux}, S_{xu}$;

– факторизуют матрицу $A = \Gamma_*\Gamma$ и находят матрицы Г и Γ^{-1};

– факторизуют матрицу спектральных плотностей сигналов обобщенного входа

$$S'_{yy} = \begin{bmatrix} S'_{uu} & 0 \\ 0 & S'_{\Delta\Delta} \end{bmatrix} = DD_*$$

и определяют матрицы D и D^{-1};

– по уравнению связи (11) вначале находят матрицу $S'_{x\Delta}$ $S_{\Delta' x}$, затем факторизуют ее для отыскания матрицы взаимных спектральных плотностей $S_{\Delta' x}$;

– составляют матрицу N (14), сепарируют ее, определяют матрицу $(N_0 + N_+)$;

– подставляют найденные матрицы Г, $(N_0 + N_+)$ и D в алгоритм (13) и находят матрицу передаточных функций Ф идентифицируемого объекта, блоками которой являются матрица $P^{-1}M$ и $P^{-1}\Psi$;

– подставив найденную оптимальную функцию Ф в функционал (10), оценивают его минимальное значение, которое соответствует максимальному значению качества идентификации.

В соответствии с указанными этапами работ разработан пакет прикладных программ, позволяющий решать задачу структурной идентификации устойчивого объекта по результатам эксперимента.

Пакет состоит из нескольких управляющих программ и общего набора подпрограмм. Управляющими программами являются:

– программа первичной обработки сигналов;

– программа формирования матриц спектральных и взаимных спектральных плотностей входных и выходных сигналов;

– программа вычисления амплитудной и фазовой характеристик объекта, а также действующих на него не измеряемых возмущений.

В качестве иллюстрации приведем результаты структурной идентификации модели динамики трехстепенного стенда, совершающего угловые движения по трем осям. Данный стенд (рис.2) состоит из динамической платформы *ДП*, которая совершает угловые движения вокруг трех взаимно перпендикулярных осей и приводится в движение реверсивными двигателями $D_\upsilon, D_\nu, D_\psi$, подключенными к выходу усилителей мощности *УМ*. Выходной сигнал платформы представляет собой трехмерный вектор углов поворота. Угловые движения платформы стенда потенциометрическими датчиками угла *ДУ* преобразуются в электрические сигналы постоянного тока, которые поступают в систему управления *СУ* и контроллер *КТ*. При проведении эксперимента глубина жесткой обратной связи в *СУ* была подобрана такой, чтобы обеспечить устойчивость замкнутой системы. Программный сигнал управления стендом синтезирован из широкополосного шумового сигнала («белого шума»). Генераторы шума ГШ реализованы соответствующими программами в ПЭВМ. Контроллер КТ обеспечивает связь между ПЭВМ и аналоговой системой управления. В процессе эксперимента вектор входных сигналов u задавался специальной программой и через контроллер *КТ* поступал на усилители мощности *УМ*. Одновременно через контроллер *КТ* вектор выходных сигналов x записывался в оперативную память ПЭВМ. После обработки сигналов входного и выходного векторов были получены матрицы спектральных и взаимно спектральных плотностей этих сигналов.

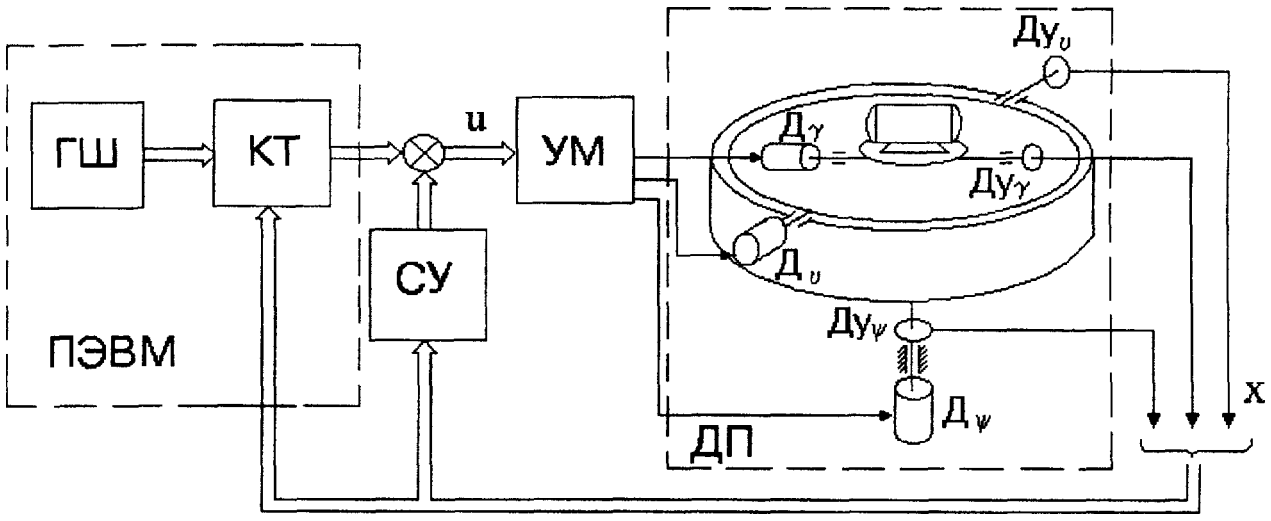

Рис.2. Структурная и кинематическая схема стенда

В процессе выполнения идентификации (на основании полученных данных) были получены матрицы передаточных функций и возмущений стенда.

Некоторые из них показаны на рис. 3 – 5. Полученные графики аппроксимировались дробно-рациональными выражениями по специальной программе на ПЭВМ. Результаты аппроксимации также показаны на тех же рисунках.

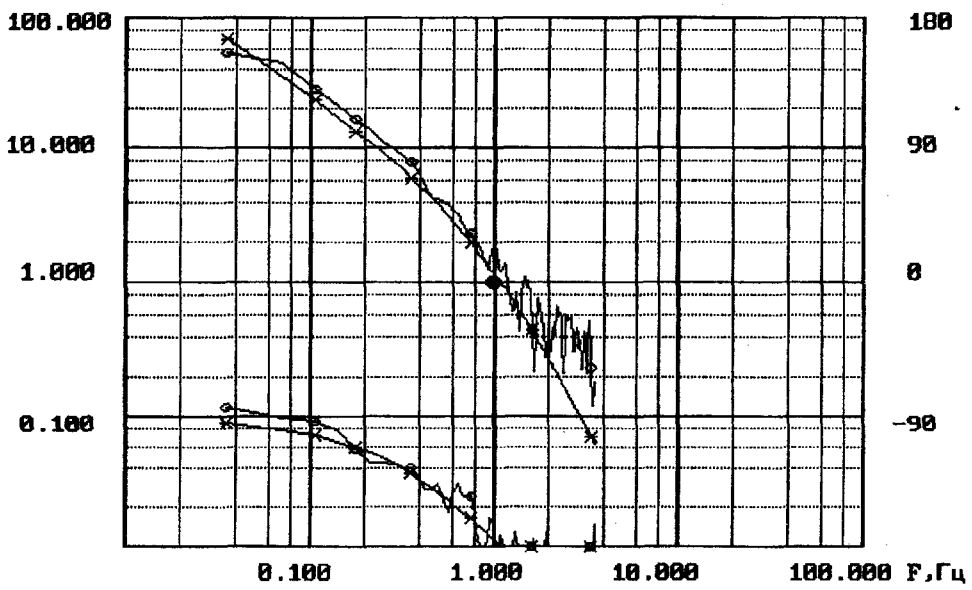

Рис.3. Логарифмические амплитудные частотные характеристики и логарифмические фазовые частотные характеристики канала крена стенда и результат их аппроксимации

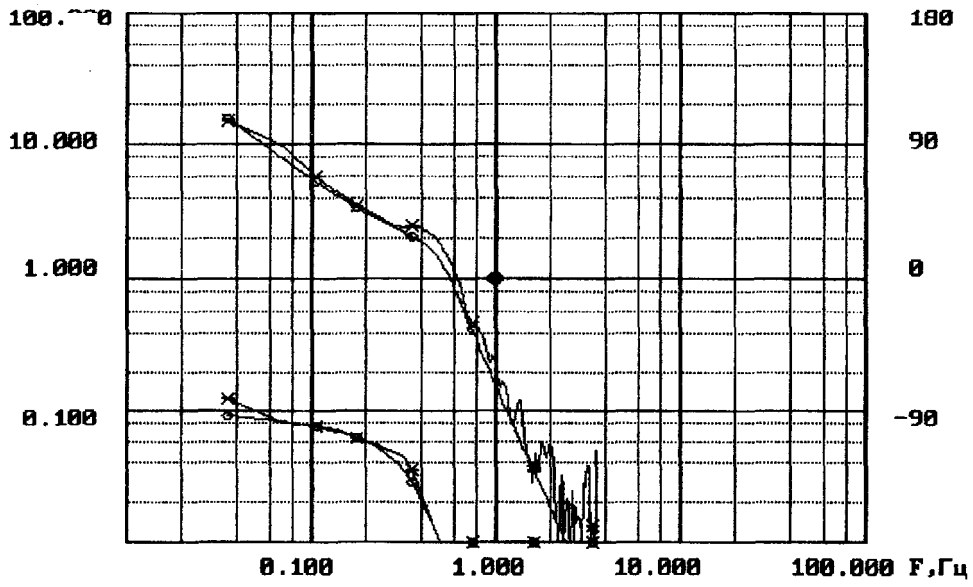

Рис.4. Логарифмические амплитудные частотные характеристики и логарифмические фазовые частотные характеристики канала курса стенда и результат их аппроксимации

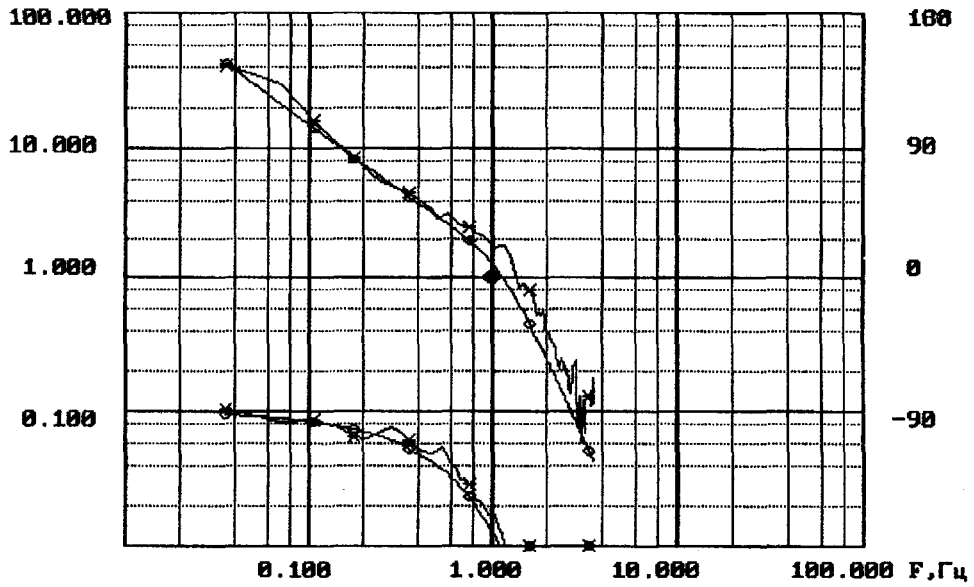

Рис.5. Логарифмические амплитудные частотные характеристики и логарифмические фазовые частотные характеристики канала тангажа стенда и результат их аппроксимации

После выполнения идентификации получены матрица передаточных функций трехстепенного стенда, представляющая собой произведение

$$W = P^{-1}M,$$

где $P = \begin{bmatrix} 0{,}102s^3 + 0{,}256s^2 + s & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}0126s^3 + 0{,}336s^2 + s & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}0196s^3 + 0{,}182s^2 + s \end{bmatrix}$;

$$M = \begin{bmatrix} 3{,}5 & 0{,}06 & 0{,}07 \\ 0{,}05 & 15{,}92 & 0{,}05 \\ 0{,}07 & 0{,}05 & 9{,}55 \end{bmatrix},$$

а также матрица не контролируемых возмущений

$$S_{\psi\psi} = \frac{1}{|s+3{,}14|^2} \begin{bmatrix} 1{,}849 & 0{,}05 & 0{,}07 \\ 0{,}05 & 0{,}69 & 0{,}05 \\ 0{,}07 & 0{,}05 & 0{,}384 \end{bmatrix} [\text{град}^2 \cdot \text{с}].$$

Таким образом, по результатам выполнения идентификации видно, что предложенный алгоритм позволяет определить передаточные функции не только прямых, но и перекрестных связей между каналами. А также определить матрицу спектральных и взаимных спектральных плотностей не контролируемых возмущений. Полученные результаты могут быть использованы в качестве исходных данных для синтеза оптимальных систем управления многомерными объектами.

Список литературы

1. *Блохин Л.Н.* Оптимальные системы стабилизации. – Киев: Техніка, 1982. – 144 с.

2. *Блохин Л.Н.* Методология оптимизации, регулировки и аттестации на земле бортовых измерительных систем и комплексов воздушных судов. – Киев: Знание, 1989. – 22 с.

3. *Блохин Л.Н.* Оптимазация характеристик измерительных устройств. – Киев: КМУГА, 1997. – 104 с.

Стаття надійшла до редакції 27 вересня 1999 року.