

УДК 656:51-7

СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ СЛОЖНЫХ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

¹Будылина Е.А., ²Гарькина И.А., ²Данилов А.М., ²Дулатов Р.Л.

¹Московский государственный университет машиностроения (МАМИ),

Москва, e-mail: bud-ea@yandex.ru;

²ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»,

Пенза, e-mail: fmatem@pguas.ru

Приводятся актуальные для имитационного моделирования и создания тренажеров методы структурной и параметрической идентификации человеко-машинных систем. Предполагается возможность декомпозиции системы на отдельные каналы управления. Указываются необходимые для идентификации синхронные измерения параметров системы в процессе нормального функционирования. Основное внимание уделяется случаю, когда оператор является безинерционным звеном; а система является стационарной и находится в режиме непрерывного функционирования. Определяются условия независимости ряда передаточных функций системы от внутренних помех. Указываются методы проверки наличия неявной «паразитной» обратной связи (как положительной, так и отрицательной). Дается процедура диагностики функционирования системы, которая сводится к вычислению корреляционных функций и определению наличия обратной связи. Приводится алгоритм определения передаточной функции объекта, прошедший практическую апробацию при разработке тренажеров транспортных систем.

Ключевые слова: эргатические системы, имитационное моделирование, декомпозиция, структурная идентификация, параметрическая идентификация, методы

STRUCTURAL AND PARAMETRIC IDENTIFICATION COMPLEX ERGATIC SYSTEMS

¹Budylnina E.A., ²Garkina I.A., ²Danilov A.M., ²Dulatov R.L.

¹Moscow state university of mechanical engineering (MAMI) Moscow, e-mail: bud-ea@yandex.ru;

²Penza state university of architecture and construction, Penza, e-mail: fmatem@pguas.ru

Are given the methods of structural and parametric identification of human-machine systems (are relevant for the simulation and creation of simulators). Possibility of decomposition is assumed to separate control channels. Defined need for the identification of simultaneous measurement of parameters of the system during normal operation. The main attention is paid to the case when the operator is without inertia link; the system is stationary and is in continuous operation. Determined the conditions of independence of a number of transfer functions of the system of internal interference. Are provided methods for testing the presence of implicit (parasitic) feedback (both positive and negative). Is given procedure of the diagnostic of system (reduces to the calculation of correlation functions and determining the presence of feedback). Is given an algorithm for determining the transfer function of the object (was practically tested in the development of simulators transport systems).

Keywords: human-machine system, simulation modeling, decomposition, structural identification, parametric identification, methods

Рассмотрим один из каналов управления объектом эргатической системы [2...5]. Предположим, что оператор является безинерционным звеном, формирующим сигнал $x(t)$ ошибки системы. Тогда при гипотезе независимости каналов для каждого канала управления систему можно представить в виде, изображенном на рис. 1.

Приведем внутреннюю помеху к выходу. Тогда структурную схему можно представить в виде, изображенном на рис. 2.

Если внутренние помехи не зависят от внешних возмущений, то импульсная переходная функция разомкнутой системы $H(t, \xi)$ определится решением интегрального уравнения:

$$F(t_1, t_2) = \int_0^{t_2} H(t_2, \xi) R_{lx}(t_1, \xi) d\xi;$$

$$R_{lN}(t_1, t_2) = 0;$$

$$R_{ln}(t_1, t_2) = 0;$$

$$R_{lx}(t_1, t_2) - R_l(t_1, t_2) = F(t_1, t_2).$$

Определив решением интегрального уравнения

$$R_{zy}(t_1, t_2) = \int_0^{t_1} \omega_c(t_2, \xi) R_y(t_1, \xi) d\xi$$

импульсную передаточную функцию цепи обратной связи $\omega_c(t, \xi)$ и решив уравнение

$$H(t, \xi) = \int_{\xi}^t \omega_0(t, \eta) \omega_c(\eta, \xi) d\eta$$

относительно $\omega_0(t, \xi)$, можно определить импульсную передаточную функцию объекта.

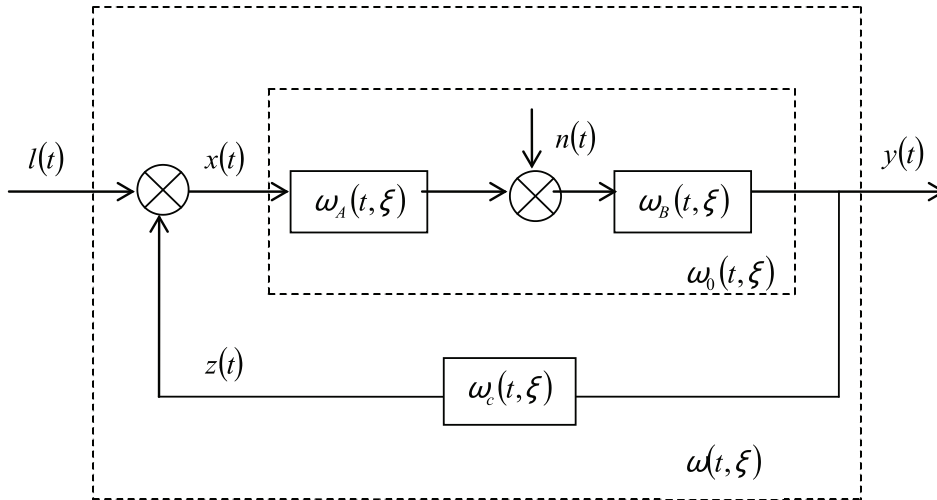


Рис. 1. Одноканальная система:

$l(t)$ – входное возмущение (или программа); $x(t)$ – сигнал ошибки системы (исполнительный сигнал), $z(t)$ – сигнал обратной связи; $n(t)$ – помеха; $\omega(t, \xi)$ – импульсная переходная функция системы; $\omega_0(t, \xi)$ – импульсная переходная функция объекта; $\omega_c(t, \xi)$ – импульсная переходная функция обратной связи; $\omega_A(t, \xi)$ – импульсная переходная функция части объекта, где действием помехи можно пренебречь

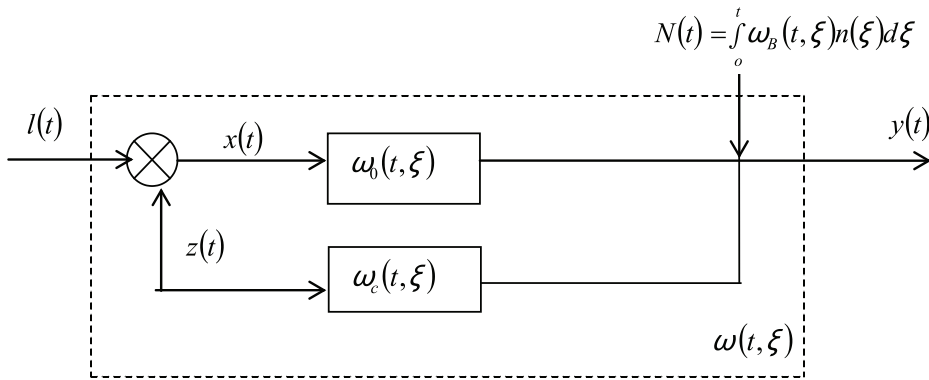


Рис. 2. Приведение помехи к выходу

В частном случае стационарной системы, находящейся в режиме непрерывного функционирования, на вход которой поступает стационарное возмущающее воздействие, будем иметь

$$F(\tau) = \int_0^{\infty} H(\xi)R_{lx}(\tau - \xi)d\xi,$$

где

$$F(\tau) = R_{lx}(\tau) - R_l(\tau); \quad \tau = t_2 - t_1.$$

Или в частотной области

$$S_F(j\omega) = W_n(j\omega)S_{lx}(j\omega),$$

откуда

$$W_n(j\omega) = \frac{S_F(j\omega)}{S_{lx}(j\omega)}.$$

Здесь

$$S_F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (R_{lx}(t) - R_l(t))e^{-j\omega t} dt;$$

$$S_{lx}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{lx}(t)e^{-j\omega t} dt;$$

$$W_n(j\omega) = W_0(j\omega)W_c(j\omega);$$

$$W_0(j\omega) = \frac{W_n(j\omega)}{W_c(j\omega)}.$$

В случае необходимости импульсная передаточная функция системы $\omega(t, \xi)$ может быть определена решением интегрального уравнения

$$R_{ly}(t_1, t_2) = \int_0^{t_2} \omega(t_2, \xi)R_l(t_1, \xi)d\xi,$$

или решением интегрального уравнения Вольтера второго рода:

$$\omega(t, \xi) = \omega_0(t, \xi) + \int_{\xi}^t H(t, \lambda) \omega(\lambda, \xi) d\lambda.$$

Отметим, что

$$W_0(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{1 + W_c(j\omega)W(j\omega)}.$$

Заметим, что передаточная функция системы по отношению к помехе $n(t)$ равна

$$W_n = \frac{W_B}{1 + W_c W}.$$

Для стационарной системы уравнение имеет вид

$$R_{ly}(\tau) = \int_0^{\infty} \omega(\xi) R_l(\tau - \xi) d\xi.$$

Имеет место аналогичная формула для цепи обратной связи:

$$R_{zy}(\tau) = \int_0^{\infty} \omega_c(\tau) R_y(\tau - \xi) d\xi.$$

В частотной области:

$$S_{ly}(j\omega) = W(j\omega) S_l(j\omega);$$

$$S_{zy}(j\omega) = W_c(j\omega) S_y(j\omega);$$

$$W(j\omega) = \frac{S_{ly}(j\omega)}{S_l(j\omega)}; \quad W_c(j\omega) = \frac{S_{zy}(j\omega)}{S_y(j\omega)}.$$

Как видим, знания действующих на систему внутренних помех $n(t)$ для определения $W(j\omega)$, $W_0(j\omega)$, $W_c(j\omega)$ не потребовалось; с учетом $l(t) = x(t) - z(t)$ видим, что для их определения не требуется и знания $l(t)$. Достаточно иметь регистрацию сигнала ошибки $x(t)$, сигнала обратной связи $z(t)$, выходного сигнала $y(t)$.

В соответствии со структурной схемой на рис. 1

$$y(t) = \int_0^t \omega_0(t, \xi) x(\xi) d\xi + N(t).$$

Откуда

$$R_{xy}(t_1, t_2) = \int_0^{t_2} \omega_0(t_2, \xi) R_x(t_1, \xi) d\xi + R_{Nx}(t_1, t_2).$$

В случае стационарной системы с входным стационарным сигналом отсюда следует

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} \omega_0(\xi) R_x(\tau - \xi) d\xi + R_{Nx}(\tau);$$

это дает возможность проверки гипотезы о наличии неявной «паразитной» обратной связи между входным и выходным сигналами *разомкнутой системы*.

В самом деле, эта формула показывает, что при наличии обратной связи входной сигнал $x(t)$ коррелирован как с выходным сигналом объекта $y(t)$, так и с приведенной помехой. При этом $R_{Nx}(\tau)$ зависит от величины этой связи, а знак – от знака обратной связи системы.

Для проверки гипотезы о наличии неявной обратной связи достаточно сравнить функции $R_x(\tau)$, $R_{xy}(\tau)$ при $\tau \leq 0$. Если в системе существует отрицательная обратная связь, то будет наблюдаться спад ординат левой ветви взаимной корреляционной функции $R_{xy}(\tau)$ по сравнению с ординатами $R_x(\tau)$ для тех значений τ , где $R_{Nx}(\tau) \neq 0$ ($\tau \approx 0$), и тем резче, чем больше $R_{Nx}(\tau)$. При наличии положительной обратной связи вместо спада в этой области будет иметь место возрастание взаимной корреляционной функции $R_{xy}(\tau)$.

Таким образом, при неизвестной структуре системы процедура диагностики ее функционирования сводится к:

- вычислению корреляционных функций $R_x(\tau)$, $R_{xy}(\tau)$;
- проверке исследуемой системы на отсутствие (наличие) обратной связи;
- оценке внутренних помех;
- оценке вычисленных характеристик.

При этом алгоритм нахождения частотной характеристики объекта по данным нормальной эксплуатации определяется последовательностью формул:

$$l(t) = x(t) - z(t);$$

$$F(\tau) = R_{lx}(\tau) - R_l(\tau);$$

$$W_n(j\omega) = \frac{S_F(j\omega)}{S_{lx}(j\omega)}; \quad W_c(j\omega) = \frac{S_{zy}(j\omega)}{S_y(j\omega)};$$

$$W_0(j\omega) = \frac{W_n(j\omega)}{W_c(j\omega)}.$$

При отрицательной единичной обратной связи получим

$$z(t) = -y(t);$$

$$l(t) = x(t) + y(t);$$

$$F(\tau) = R_{lx}(\tau) - R_l(\tau);$$

$$W_0(j\omega) = \frac{W_n(j\omega)}{-1} = -W_n(j\omega) = -\frac{S_F(j\omega)}{S_{lx}(j\omega)}.$$

Формулы для определения $W_0(j\omega)$ справедливы как при наличии, так и при отсутствии внутренних помех (например, атмосферных – при проектировании авиационных тренажеров).

Методики прошли апробацию при разработке тренажных и обучающих комплексов

для подготовки операторов транспортных систем [1, 6, 7].

Список литературы

1. Авиационные тренажеры модульной архитектуры: монография; под ред. Лапшина Э.В., д.т.н., проф. Данилова А.М. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2005. – 146 с.

2. Бudyлина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М., Пылайкин С.А. Аналитическое определение имитационных характеристик тренажных и обучающих комплексов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6. – С. 698.

3. Гарькина И.А., Данилов А.М., Пылайкин С.А. Тренажеры и имитаторы транспортных систем: выбор параметров вычислений, оценка качества // Мир транспорта и технологических машин. – 2013. – № 3 (42). – С. 115–120.

4. Данилов А.М., Гарькина И.А., Домке Э.Р. Математическое моделирование управляющих воздействий оператора в эргатической системе // Вестник МАДИ. – 2011. – № 2. – С. 18–23.

5. Данилов А.М., Лапшин Э.В., Беликов Г.Г., Лебедев В.Б. Методологические принципы организации многопоточковой обработки данных с распараллеливанием вычислительных процессов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 26–34.

6. Родионов Ю.В., Ветохин А.С. Динамический автотренажер // Мир транспорта и технологических машин. – 2011. – № 4. – С. 90–93.

7. Andreev A.N., Danilov A.M., Klyuev B.V., Lapshin E.V., Blinov A.V., Yurkov N.K. Information models for designing conceptual broad-profile flight simulators // Measurement Techniques. August 2000. – Vol. 43. Issue 8. – P. 667–672.

References

1. Flight Simulators modular architecture: monograph; edited by E.V. Lapshin, prof. Danilova A.M. Penza: IPC PSU. 2005. 146 p.

2. Budylyna E.A., Garkina I.A., Danilov A.M., Pylaykin S.A. Analytical determination of the characteristics of simulation and training systems trenazhnyh // Basic research. 2014. no. 6. pp. 698.

3. Garkina I.A., Danilov A.M., Pylaykin S.A. Trainers and simulators transport systems: the choice of parameters calculations, quality assessment // World Transport and technological machines. 2013. no. 3 (42). pp. 115–120.

4. Danilov A.M., Garkina I.A., Domke E.R. Mathematical modeling of operator control actions in the human-machine system // Herald MAD. 2011. no. 2. pp. 18–23.

5. Danilov A.M., Lapshin E.V., Belikov G.G., Lebedev V.B. Methodological principles of multi-threaded data processing parallelization of computing processes // Proceedings of the higher educational institutions. Volga region. Technical sciences. 2011. no. 4. pp. 26–34.

6. Rodionov Y.V., Vetrohin A.S. Dynamic car simulator // World Transport and technological machines. 2011. no. 4. pp. 90–93.

7. Andreev A.N., Danilov A.M., Klyuev B.V., Lapshin E.V., Blinov A.V., Yurkov N.K. Information models for designing conceptual broad-profile flight simulators // Measurement Techniques. August 2000. Vol.43. Issue 8. pp. 667–672.

Рецензенты:

Родионов Ю.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация автомобильного транспорта», декан автомобильно-дорожного института, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза;

Кошев А.Н., д.х.н., профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, г. Пенза.

Работа поступила в редакцию 02.03.2015.