УДК 656:51-7

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НОРМАЛЬНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

[1]Гарькина И.А., [1]Данилов А.М., [1]Нашивочников В.В.

[1]ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», Пенза, Россия (440028, Пенза, ул. Германа Титова, 28), e-mail: fmatem@pguas.ru

Рассматриваются алгоритмы определения основных характеристик эргатической системы по результатам ретроспективного анализа данных нормального функционирования (синхронные измерения фазовых координат и управляющих воздействий оператора). Предлагаемые алгоритмы основываются на определении управляющих воздействий оператора, как отклонений (флуктуаций) от программного движения (тренда), концептуальной модели движения (формируется центральной нервной системой), оперативной концептуальной модели. При этом основное внимание уделяется определению обобщенных характеристик целостной эргатической системы, как некоторой разомкнутой системы (определение передаточных функций человека-оператора и объекта в отдельности практически невозможно в связи с действием организмического принципа). Приводятся методики определения оперативной концептуальной модели, идеальной концептуальной модели, обобщенной частотной характеристики, а также алгоритмы определения необходимых для этого параметров.

Ключевые слова: эргатические системы, эквивалентная разомкнутая система, обобщенная передаточная функция, нормальное функционирование, алгоритмы обработки данных, ретроспективный анализ.

ALGORITHM OF DATA PROCESSING NORMAL FUNCTIONING OF HUMAN-MACHINE SYSTEM

[1]Garkina I.A., [1]Danilov A.M., [1]Nashivochnikov V.V.

[1]Penza state university of architecture and construction (Russia, 440028, Penza, Titov str., 28), e-mail: fmatem@pguas.ru

We consider algorithms for determining the basic characteristics of human-machine system on the results of a retrospective analysis of the data of normal operation (simultaneous measurement of phase coordinates and control actions of the operator). The proposed algorithms are based on the definition of the operator control actions as deviations (fluctuations) from software movement (trend), the conceptual model of the movement (formed by the central nervous system), operational conceptual model. The main attention is paid to the definition of generalized characteristics of an integrated human-machine system, as some open system (determination of the transfer functions of the human operator and the object alone is almost impossible due to the influence of organismic principle). Is given The method of determining the operational conceptual model, conceptual model of the ideal, generalized frequency response, as well as algorithms for determination of the necessary parameters.

Keywords: human-machine system, the equivalent open-loop system, the generalized transfer function, normal operation, data processing algorithms, a retrospective analysis

Ниже приводятся алгоритмы ретроспективного анализа данных нормального функционирования эргатической системы.

1. *Оперативная концептуальная модель*

Алгоритм основывается на сглаживании реализаций процессов

$$x_в^{(j)}(t), x_э^{(j)}(t), x_н^{(j)}(t),$$

$$x_в(t), x_э(t), x_н(t).$$

Для сглаживания используется метод осреднения ординат указанных кривых (реализаций) на некотором интервале около данного t, то есть определение так называемой скользящей средней.

Здесь оценка математического ожидания случайного процесса $x(t)$ определяется по одной реализации $x^{(j)}(t)$:

$$x^{(j)}(t)=\frac{1}{2T_0}\int\limits_{t-T_o}^{t+T_0}x^{(j)}(s)ds\,.$$

Разбив интервал T_0 на m равных частей и применяя для вычисления интеграла формулу прямоугольников, получим:

$$\overline{x}^{(j)}(t_k)=\frac{1}{2m+1}\sum_{\beta=-m}^{m}x^{(j)}\left(t_k+\beta\frac{T_0}{m}\right). \tag{1}$$

Интервал T_0 выбирался так, чтобы в интервале длиной $2T_0$ с центром в точке t_k математическое ожидание $\overline{x}^{(j)}(t_k)$ было приблизительно линейно (более строго требуется также малость среднего значения корреляционной функции $R_{\overline{x}^{(j)}}(t,t')$ в квадрате с центром в точке (t,t) и стороной $2T_0$).

Таким образом, алгоритм определения оперативной концептуальной модели основывается на формуле (1).

2. *Идеальная концептуальная модель*

Идеальная концептуальная модель характеризует оптимальное управление (идеальная траектория). Она может быть получена усреднением случайной функции $x(t)$ как по времени, так и по ансамблю N реализаций:

$$x_0(t_k)=\frac{1}{N(2m+1)}\sum_{j=1}^{N}\sum_{\beta=-m}^{m}x^{(j)}\left(t_k+\beta\frac{T_0}{m}\right)$$

или

$$x_0(t_k)=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\overline{x}^{(j)}(t_k).$$

На этой формуле и основывается алгоритм определения идеальной концептуальной модели.

Одним из возможных способов определения $x_0(t_k)$ по нескольким реализациям является одновременное сглаживание всех реализаций. При применении этого способа все реализации случайной функции строятся на одном графике (при правильно выбранном масштабе эти реализации образуют отчетливую полосу). Средняя линия этой полосы (грубо определяется на газ) и даст оценку математического ожидания $x_0(t_k)$. Способ глазомерного сглаживания обладает большой простотой, но является субъективным. Предыдущий метод лишен этого недостатка.

3. Прямое преобразование Фурье

Пусть:

$2\dfrac{T}{2}$ – длительность реализации, x_i, y_i – значения временных рядов, N – число значений, Δt – интервал дискретизации по времени, $\omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$.

Тогда в соответствии с

$$x(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt,$$

$$y(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt$$

и с использованием формул Эйлера можно получить следующие формулы для вычисления коэффициентов прямого преобразования Фурье:

$$A(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \cos[(i-1)\Delta t \omega],$$

$$B(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \sin[(i-1)\Delta t \omega],$$

$$C(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N} y_i \cos[(i-1)\Delta t \omega],$$

$$D(\omega) = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^{N} y_i \sin[(i-1)\Delta t \omega].$$

4. Спектральные плотности входного и выходного сигналов; взаимная спектральная плотность

Основываются на использовании прямого преобразования Фурье сигналов $x(t)$ и $y(t)$, а именно:

$$G_x(\omega) = \frac{1}{2}\left(A^2(\omega) + B^2(\omega)\right),$$

$$\operatorname{Re} G_{xy}(\omega) = \frac{1}{2}(AC + BD),$$

$$\operatorname{Im} G_{xy}(\omega) = \frac{1}{2}(BC - AD).$$

Сглаживание спектральных плотностей производилось по методу Хеннинга:

$$G^*(\omega) = [G(\omega) + (G(\omega - \Delta\omega) + G(\omega + \Delta\omega))0{,}5]0{,}5,$$

$$G^*(\omega_{\min}) = [G(\omega_{\min}) + G(\omega_{\min} + \Delta\omega)]0{,}5,$$

$$G^*(\omega_{\max}) = [G(\omega_{\max}) + G(\omega_{\max} - \Delta\omega)]0{,}5.$$

5. *Обобщенная частотная характеристика*

Здесь определяется с использованием трендов входных и выходных процессов. Обобщенная характеристика получается как характеристика эквивалентной разомкнутой системы с входом $x(t)$ и выходом $y(t)$.

В качестве $x(t)$ принимался один из сигналов $\overline{x}_{в}^{(j)}(t), \overline{x}_{э}^{(j)}(t), \overline{x}_{н}^{(j)}(t)$. При определении перекрестных связей между каналами пространственного движения в качестве $x(t)$ принимались и некоторые другие фазовые координаты, их скорости или ускорения. В качестве входных процессов при предварительных исследованиях ограничивались

$$\overline{\omega}_{z}^{j}(t), \overline{v}^{(j)}(t), \overline{\gamma}^{(j)}(t), \overline{\omega}_{y}^{(j)}(t).$$

Алгоритмы основывались на использовании спектральных плотностей

$$\mathrm{Re}W(j\omega) = \frac{\mathrm{Re}\,G_{xy}(\omega)}{G_x(\omega)},$$

$$\mathrm{Im}W(j\omega) = \frac{\mathrm{Im}\,G_{xy}(\omega)}{G_x(\omega)},$$

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{\left[(\mathrm{Re}W(j\omega))^2 + (\mathrm{Im}W(j\omega))^2\right]},$$

$$\varphi(\omega) = arctg\left[\frac{\mathrm{Im}W(j\omega)}{\mathrm{Re}W(j\omega)}\right].$$

Эффективное подавление случайных ошибок при оценивании частотных характеристик переходных процессов (рассматриваются тренды) достигается осреднением по ансамблю оценок, вычисленных по ансамблю независимых реализаций входных и выходных переходных процессов.

6. *Управляющие движения оператора*

Определяются путем центрирования $x^{(j)}(t_k)$:

$$\overset{\circ}{x}{}^{(j)}(t_k) = x^{(j)}(t_k) - \overline{x}^{(j)}(t_k).$$

7. Спектральные характеристики управляющих движений

Основаны на определении прямого преобразования Фурье процесса $\overset{\circ}{x}{}^{(j)}(t)$, а именно:

$$S_{\overset{\circ}{x}}(\omega) = \frac{1}{2}\left[\overset{\circ}{A}{}^{2}(\omega) + \overset{\circ}{B}{}^{2}(\omega)\right],$$

$$\overset{\circ}{A}(\omega) = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{x}_i \cos[(i-1)\Delta t\omega],$$

$$\overset{\circ}{B}(\omega) = \frac{2}{N}\sum_{i=1}^{N}\overset{\circ}{x}_i \sin[(i-1)\Delta t\omega].$$

8.*Автокорреляционная функция управляющих движений*

Основывается на реализации формулы

$$R_{\overset{\circ}{x}}(\mu)=\frac{1}{N-\mu+1}\sum_{\nu=1}^{N-\mu+1}x_\nu x_{\nu+\mu},\quad \mu=\overline{0,\mu_{\max}}\ ,$$

где $\mu_{\max}$ – интервал корреляции.

9. *Обобщенная частотная характеристика*

Основывается на использовании прямого преобразования Фурье сигналов $x(t)$ и $y(t)$, где в качестве $x(t)$ принимается один из сигналов $\overset{\circ}{x}_в(t), \overset{\circ}{x}_э(t), \overset{\circ}{x}_н(t)$, а в качестве $y(t)$ – $\overset{\circ}{\omega}_z(t), \overset{\circ}{v}(t), \overset{\circ}{\omega}_x(t), \overset{\circ}{\gamma}(t), \overset{\circ}{\omega}_y(t)$.

Собственно, алгоритм аналогичен алгоритму определения частотной характеристики по трендам.

10. *Распределение вероятностей частот в управляющих движениях*

Пусть $\overset{\circ}{x}{}^{(j)}(t)$ – j-я реализация управляющих движений, T – интервал реализации. Известно [3]

$$W_{\overset{\circ}{x}}^{(j)}(\omega)=\frac{1}{R_x^{(j)}(0)}\cdot\frac{2}{T}\left[G^{(j)}(\omega)\right]^2$$

(определяет плотность вероятности случайной величины ω в процессе $\overset{\circ}{x}{}^{(j)}(t)$):

$$f(\omega)=\frac{1}{R_x^{(j)}(0)}\cdot\frac{2}{T}\left[G^{(j)}(\omega)\right]^2\ ).$$

При этом $G_x^{(j)}(\omega)d\omega$ представляет собой дисперсию, приходящуюся на участок частот $d\omega$, прилежащий к точке ω. Тогда

$$\sigma(\omega)=\sqrt{G_x(\omega)d\omega}$$

определяет среднюю амплитуду гармоник с частотой ω в управляющих движениях.

Отметим, что в силу методических и вычислительных погрешностей $\int\limits_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} f(\omega)d\omega$ не будет равняться единице. Поэтому возникает необходимость нормировки, полагая

$$\sum_i f(\omega_i)\Delta\omega=1\,.$$

Величина $P(\omega_i)=f(\omega_i)\Delta\omega$ выражает вероятность попадания в интервал $(\omega_i,\omega_i+\Delta\omega)$. Откуда

$$P(\omega_i)=\frac{f(\omega_i)\Delta\omega}{\sum\limits_i f(\omega_i)\Delta\omega}=\frac{f(\omega_i)}{\sum\limits_i f(\omega_i)}=\frac{[G_x(\omega_i)]^2}{\sum\limits_i[G_x(\omega_i)]^2}\,.$$

Определение $P(\omega_i)$ и $\sigma(\omega_i)$ включает:

- задание $\omega_{\min}, \omega_{\max}, \Delta\omega, T, \Delta t$;
- вычисление $G_x(\omega_i)$;
- вычисление $[G_x(\omega_i)]^2$;
- вычисление $P(\omega_i) = \frac{[G_x(\omega_i)]^2}{\sum_i [G_x(\omega_i)]^2}$;
- вычисление $\sigma(\omega_i) = \sqrt{G_x(\omega_i) d\omega}$.

При всей кажущейся простоте использованных на практике алгоритмов, получение указанных характеристик не столь тривиально. Требуется опыт и инженерная интуиция. Получение результатов, как правило, связано с широким использованием итеративных методов.

Предложенные алгоритмы прошли многостороннюю апробацию при разработке тренажеров для подготовки операторов эргатических систем различного назначения [1…8].

Список литературы

1. Гарькина И.А., Данилов А.М., Хнаев О.А. Управление качеством динамической системы: селекция информативных сигналов / Региональная архитектура и строительство. - 2013. - № 1. - С. 137-141.

2. Данилов А.М., Гарькина И.А. Оценка характеристик управляющих воздействий оператора эргатической системы / Исследования технических наук. - 2012. - Т. 2. - № 3. -С. 12-17.

3. Данилов А.М., Гарькина И.А. Теория вероятностей и математическая статистика с инженерными приложениями: учебное пособие. – Пенза: ПГУАС. – 2010. – 228 с.

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

5. Данилов А.М., Лапшин Э.В., Гарькина И.А., Трусов В.А. Информационно-вычислительные системы авиационных тренажеров модульной архитектуры с распараллеливанием вычислительных процессов / Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. - 2010. - № 1. - С. 379-383.

6. Еремкин А.И., Прошин А.П., Данилов А.М., Гарькина И.А. Системные проблемы и моделирование при разработке сложных систем / Надежность. - 2006. - № 1. - С. 3.

7. Петренко В.О., Данилов А.М. Управление в пространстве: идентификация управляющих воздействий / Современные научные исследования и инновации. - 2014. - № 12-1 (44). - С. 146-149.
8. 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.

Рецензенты:

Родионов Ю.В., д.т.н., профессор, декан автомобильно-дорожного института ПГУАС, заведующий кафедрой эксплуатации автомобильного транспорта, г. Пенза;

Кошев А.Н., д.х.н., профессор, профессор кафедры информационно-вычислительных систем Пензенского государственного университета архитектуры и строительства,
г. Пенза.