УДК 621.3.088.7

М.А. Доронина
(Украина, г. Днепропетровск, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВХОДНОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ И ВХОДНОГО СИГНАЛА СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

Анотація. *Запропоновано новий підхід до розв'язання оберненої задачі динаміки: визначення оцінки величини постійного сигналу і його зсуву у часі на вході засобу вимірювання. Для досягнення поставленої мети використовується теорія збурень хвильової структури. Останнє реалізується за допомогою представлення невідомого сигналу, що діє на вході приладу, у вигляді суми двох складових детермінованого і випадкового, що мають хвильову структуру. За допомогою ідентифікатора Люенбергера знаходиться оцінка випадкової складової. Об'єднання знайденої оцінки і детермінованої складової дозволяє оцінити величину вхідного сигналу і час його затримки.*

Ключові слова: *обернена задача динаміки, збурення хвильової структури, ідентифікатор Люенбергера*

Аннотация. *Предложен новый подход к решению обратной задачи динамики: определению оценки величины постоянного сигнала и его сдвига во времени на входе средства измерения. Для достижения поставленной цели используется теория возмущений волновой структуры. Последнее реализуется посредствам представление неизвестного сигнала, действующего на входе прибора, в виде суммы двух составляющих детерминированного и случайного, имеющих волновую структуру. С помощью идентификатора Люенбергера находится оценка случайной составляющей. Объединение найденной оценки и детерминированной составляющей позволяет оценить величину входного сигнала и время его задержки.*

Ключевые слова*: обратная задача динамики, возмущения волновой структуры. идентификатор Люенбергера.*

Abstract. *New approach to solving the inverse problem of dynamics - the measurement of constant value signal and his shift time at the entrance of measurement tool is proposed. The problem is solved using the perturbation theory of wave structure. This is realized through the provision of an unknown signal, acting on the input of the instrument, as the sum of two components of deterministic and random, having a wave structure.. Using ID Lyenberhera author found evaluation of the random component. Combining assessment found and deterministic component evaluates the value of the input signal and timing delays.*

Key words: *the inverse problem of dynamics, perturbation of wave structure, ID Lyenberhera*

Введение. На данный момент достаточно остро стоит проблема повышения точности результатов динамических измерений [1,2], которые имеют место в современном производстве. Она может быть решена с помощью использования новых подходов, которые формируются на основополагающих принципах и законах естествознания.

Следует отметить, что среди многих концепций, на основе которых строятся научные теории, особое место занимает концепция дуализма [3].

В результате реализации динамических измерений на выходе датчика часто получают сигнал с погрешностью. Это может привести к тому, что на основе полученной информации будет принято ошибочное решение.

Оценка реальных входных сигналов датчиков связана с решением обратных задач динамики, методы решения которых описаны в работах [4, 5, 6], а значит и со сложными процессами регуляризации.

Цель статьи – описание методологии определения оценок величин постоянного сигнала и его сдвига во времени на входе средства измерения.

Основная часть. Если входной $f[kT]$ и выходной $x[kT]$ сигналы дискретной модели объекта связаны оператором $W[z,kT]$, т.е.

$$x[kT]=W[z,kT]f[kT], \tag{1}$$

где z — оператор опережения на время T, то изменение переменной $x[kT]$ может быть получено путем преобразования как $f[kT]$, так и $W[z,kT]$. Таким образом, одинаковый сигнал можно получить в различных ситуациях [7,8]:

$$x[kT] = F[z,kT]u[kT], \tag{2}$$

где $F[z,kT] \neq W[z,kT]$ и $u[kT] \neq f[kT]$.

При этом будет справедливо выражение

$$W[z,kT]f[kT] = F[z,kT]u[kT], \tag{3}$$

которое устанавливает динамическую эквивалентность двух моделей систем (1) и (2), имеющих разную структуру и параметры. В данном случае в модель (2), путем организации соответствующего входного воздействия $u[kT]$, вводятся недостающие элементы модели (1). Для преобразования модели объекта с целью ее упрощения представим сигнал $u[kT]$ следующим образом:

$$u[kT] = f[kT] + \xi[kT], \tag{4}$$

где $\xi[kT] = (F^{-1}[z,kT]W[z,kT] - 1)f[kT]$ будем рассматривать в качестве сигнала возмущения волновой структуры [9].

С вычислительной точки зрения получение точных значений параметра $\xi[kT]$ связано с большими трудностями и практически невозможно. Однако оценки $\bar{\xi}[kT]$ могут быть довольно легко получены, например, с помощью асимптотических идентификаторов состояния [10].

При этом возмущение $\xi[kT]$ может быть представлено выходным сигналом свободной линейной динамической системы

$$\begin{aligned} z[(k+1)T] &= Hz[kT]; \\ \xi[kT] &= Gz[kT], \end{aligned} \tag{5}$$

где матрицы H и G заданы, а вектор $z[kT]$ является «вектором состояния» сигнала возмущения. Начальные условия неизвестны и меняются скачкообразно, случайным образом с изменением k.

Преобразуя структурные элементы модели динамического объекта во входные сигнальные возмущения волновой структуры и осуществляя дальнейшую оценку значений этих возмущений асимптотическими идентификаторами состояния, можно существенно упростить первоначальную модель (1).

В качестве примера практического применения изложенного выше материала рассмотрим процедуру получения и оценки возмущения, действующего на входе объекта,

$$\begin{aligned} x[(k+1)T] &= Ax[kT] + Bu[(k-d)T], \\ y[kT] &= Cx[kT]. \end{aligned} \tag{6}$$

В выражении (6) запаздывания реализуется совокупностью d элементарных задержек длительностью T.

При рассмотрении $u[(k-d)T]$ в пространстве состояний переменные, которые соответствуют элементарным задержкам продолжительностью T, включаются в расширенный вектор состояния [10]. Последнее приводит к существенному увеличению его размерности. Модель (6) будет описываться уравнениями вида

$$\begin{bmatrix} x[k+1)T] \\ \cdots \\ z[(k+1)T] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & \vdots & BQ \\ \cdots & \cdot & \cdots \\ 0 & \vdots & S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(kT) \\ \cdots \\ z[kT] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \cdots \\ P \end{bmatrix} u[kT], \tag{7}$$

$$y[kT] = \begin{bmatrix} C & \vdots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x[kT] \\ \cdots \\ z[kT] \end{bmatrix},$$

где

$$S=\begin{bmatrix}0 & 1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0\\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots\\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1\\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0\end{bmatrix}, \qquad P=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ \cdots\\ 0\\ 1\end{bmatrix},\ Q=\begin{bmatrix}1 & 0 & \cdots & 0\end{bmatrix},$$

$$z[kT]=\begin{bmatrix}u[(k-d)T] & u[(k-d+1)] & \cdots & u[(k-2)T] & u[(k-1)T]\end{bmatrix}^T.$$

Более простое чем уравнение (7), представление модели (6) можно получить [7,8], если воспользоваться описанной выше процедурой реализации возмущения волновой структуры как сигнала на выходе свободной динамической системы (5) с начальными условиями, которые меняются скачкообразно случайным образом.

Пусть в выражение (6) входной сигнал равен $u[kT]=1[kT]$. Тогда эта модель может быть записана следующим образом:

$$x[(k+1)T]=Ax[kT]+B\cdot 1[kT]+B\xi[kT],$$
$$y[kT]=Cx[kT]\ , \tag{8}$$

где $\xi[kT]=-(1[kT]-1[(k-d)T])$.

Поскольку возмущения $\xi[kT]$ в уравнении состояния модели (8) представляют собой импульс длительностью $d\cdot T$, каждая из d дискрет которого равна 1, то его можно рассматривать как выходной сигнал свободной динамической системы

$$z[(k+1)T]=z[kT], \tag{9}$$
$$\xi[kT]=z[kT],$$

с начальным условием, которое меняется скачкообразно и принимает случайные значения.

Объединив выражения (8) и (9), получим модель в переменных состояния, которая эквивалентна модели (7), т.е.

$$\begin{bmatrix}x[(k+1)T]\\ \cdots\\ z[(k+1)T]\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A & \vdots & B\\ \cdots & \cdot & \cdots\\ 0 & \vdots & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x[kT]\\ \cdots\\ z[kT]\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}B\\ \cdots\\ 0\end{bmatrix}\cdot 1[kT], \tag{10}$$
$$y[kT]=\begin{bmatrix}C & \vdots & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x[kT] & z[kT]\end{bmatrix}^T.$$

Если матрица восстанавливаемости модели (10) имеет ранг, который равен $n+1$, то составляющие расширенного вектора состояния $\begin{bmatrix}x[kT] & \vdots & z[kT]\end{bmatrix}^T$ могут быть оценены любым из известных способов. В частности, если одномерную модель измерительного средства, которая описывается разностным уравнением

$$y[(k+1)T]=ay[kT]+b\cdot 1[(k-3)T], \qquad y[0]=y_0 \tag{11}$$

записать в переменных состояния, то в соответствии с формулой (7) она будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix}x_1[(k+1)T]\\ x_2[(k+1)T]\\ x_3[(k+1)T]\\ x_4[(k+1)T]\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a & b & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}x_1[kT]\\ x_2[kT]\\ x_3[kT]\\ x_4[kT]\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 1\end{bmatrix}\cdot 1[kT], \qquad \begin{bmatrix}x_1[0]\\ x_2[0]\\ x_3[0]\\ x_4[0]\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}y_0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}$$
$$y[kT]=[1\ \ 0\ \ 0\ \ 0]\cdot[x_1[kT]\ \ x_2[kT]\ \ x_3[kT]\ \ x_4[kT]]^T. \tag{12}$$

В данном случае матрица восстанавливаемости дискретной модели переменных состояний (12) будет иметь вид

$$Q=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ a & b & 0 & 0\\ a^2 & ab & b & 0\\ a^3 & ab^2 & ab & b\end{bmatrix}$$

Учитывая что $rangQ=4=n$, где n — порядок модели (12), можно сделать вывод о возможности восстанавливаемости модели переменных состояний $x_i[kT],\ i=1\ldots4$.

Для эквивалентной модели переменных состояния (10) разностное уравнение можно записать таким образом:

$$\begin{bmatrix}x[(k+1)T]\\ z[(k+1)T]\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a & b\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x[kT]\\ z[kT]\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}b\\ 0\end{bmatrix}\cdot 1[kT],\qquad \begin{bmatrix}x[0]\\ z[0]\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ \alpha\end{bmatrix}, \tag{13}$$

$$y[kT]=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x[kT] & z[kT]\end{bmatrix}^T,$$

где α —неизвестное случайное число.

Сравнивая модели (12) и (13), видим, что модель (13) является более простой, чем (12). Матрица восстанавливаемости для модели (13) имеет ранг, равный двум (т.е. порядку самой модели):

$$Q=\begin{bmatrix}1 & 0\\ a & b\end{bmatrix}$$

Таким образом, как для переменной $x[kT]$, так и для возмущения $\xi[kT]=z[kT]$ могут быть получены соответствующие оценки. Апериодический идентификатор состояния, который оценивает возмущение $\xi[kT]$, описывается уравнениями вида

$$z[(k+1)T]=-(a/b)y[kT]-1[kT],\qquad z[0]=0, \tag{14}$$

$$\hat{\xi}[kT]=z[kT]+(1/b)y[kT].$$

На выходе этого идентификатора будет иметь место последовательность дискрет

$$\hat{\xi}[0]=\frac{a}{b},\qquad \hat{\xi}[T]=\hat{\xi}[2T]=\hat{\xi}[3T]=-1,\qquad \hat{\xi}[4T]=\hat{\xi}[5T]=\cdots=0.$$

Что же касается возмущения, то оно реализуется через последовательность вида

$$\xi[0]=\xi[T]=\xi[2T]=-1,\quad \xi[3T]=\xi[4T]=\cdots=0.$$

Учитывая тот факт, что апериодический идентификатор Люенбергера (14) первого порядка дает оценку неизвестного сигнала с задержкой, равной T, то можем скорректировать найденную оценку $\xi[kT]$ таким образом:

$$\hat{\xi}[0]=-1;\ \hat{\xi}[T]=-1,\ \hat{\xi}[2T]=-1;\ \hat{\xi}[3T]=0;\ \hat{\xi}[4T]=0,\ldots;$$

Т. е., осуществив перемещение найденных идентификатором Люенбергера оценок $\xi[kT]$, $k=1,2,3,\ldots$ на время T назад, получим что $\hat{\xi}[kT]=\xi[kT]$, $k=0,1,2,3,\ldots$

Теперь рассмотрим ситуацию, когда постоянный входной сигнал имеет не только неизвестную задержку во времени, но и неизвестную величину [10]. Воспроизведение неизвестного входного сигнала, который действует на объект с неизвестной входной задержкой, рассмотрим на следующем примере.
Относительно объекта известно, что он описывается уравнением вида

$$y[(k+1)T] = ay[kT] + bu[(k-3)T], \qquad y[0] = y_0. \tag{15}$$

Пусть $u[kT] = 1[kT]$, но так как это значение нам неизвестно, будем считать, что точное значение $u[kT] = 0{,}8 \cdot 1[kT]$. Тогда математическая модель (15) после ее преобразования с использованием возмущений волновой структуры может быть представлена в виде

$$\begin{gathered} y[(k+1)T] = ay[kT] + 0{,}8 \cdot b \cdot 1[kT] + b \cdot \xi[kT]; \qquad y[0] = y_0, \\ \xi[(k+1)T] = \xi[kT]; \\ \xi[0] = 0{,}2. \end{gathered} \tag{16}$$

Для оценки воздействия волновой структуры $\xi[kT]$ снова применим апериодический идентификатор Люенбергера, который в данном случае будет описываться уравнениями вида

$$\begin{gathered} z[(k+1)T] = -\frac{a}{b} \cdot z[kT] - 0.8 \cdot 1[kT]; \qquad z[0] = 0, \\ \hat{\xi}[kT] = z[kT] + \frac{1}{b} y[kT]. \end{gathered} \tag{17}$$

Применяя в модели идентификатора состояния (17) в качестве $y[kT]$ решение уравнения (15), получим, что

$$\hat{\xi}[0] = \frac{1}{b} y_0; \quad \hat{\xi}[T] = -0{,}8; \quad \hat{\xi}[2T] = -0{,}8; \quad \hat{\xi}[3T] = -0{,}8; \quad \hat{\xi}[4T] = \hat{\xi}[5T] = \hat{\xi}[6T] = \ldots = 0{,}2.$$

Количество значений $-0{,}8$ дает информацию о времени запаздывания, которое составляет $3T$, а сумма 0,8+0,2=1 — оценку величины постоянного входного сигнала объекта (15). Эта оценка равна истинному значению данного сигнала.

Вывод. Таким образом, описанная выше процедура преобразования на базе концепции дуализма структурных и параметрических изменений модели измерительного средства в входные возмущения волновой структуры, позволяет существенно упростить косвенную оценку времени запаздывания сигнала и его величины на входе средства измерения. Описанный подход может быть с успехом применен и в других случаях.

Список литературы

1. Layer E. Signal Transforms in Dynamic Measurements. / E. Layer, K. Tomczyk. — London.: Springer, 2015. — 216p.
2. Rossi G.B. Measurement and Probability. A Probabilistic Theory of Measurement with Applications./ G.B. Rossi. — London.: Springer, 2014. —286p.
3. Пронкин Н.С. Основы метрологии динамических измерений: учеб. пособие для вузов / Н.С. Пронкин. — М.: Логос, 2003. —256 с.
4. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления: учеб. пособие для вузов / П.Д.Крутько. — М.: Машиностроение, 2004. —576 с.
5. Полярус О.В. Наближене розв'язання оберненої задачі вимірювань та його метрологічне забезпечення: монографія / О.В. Полярус, Є.О. Поляков. —.Х: Лідер, 2014. —120с.
6. Корсун В.И. Применение принципа обобщенного входа для идентификации объекта управления с запаздыванием / В.И. Корсун // Гірнича електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб.—Д., 2001. — Вип.66.—С.69—71.
7. Корсун В.И. Использование концепции симметрии для оценки времени задержки сигнала на входе измерительного средства / В.И. Корсун, С.Т. Пацера, В.Т. Белан // Наук. праці V Міжнарод. наук.-техн. конфер. «Метрологія та вимірювальна техніка» (Метрологія-2006). В 2-х т., —Х., 2006.—Т2.—С.380—382.
8. Фильтрация и стохастическое управление в динамических системах / под ред. К.Т. Леондеса. — М.: Мир, 1980. — 408с.
9. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. —М.: Мир, 1980. — 541с.
10. Дороніна М.А. Використання збурень хвильової структури для підвищення точності відтворення вхідного сигналу засобу вимірювання / М.А. Дороніна, В.І. Корсун // Системи обробки інформації: зб. наук. праць. —Х., 2015. – Вип.6. —С.47—49.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Корсуном В.І.