УДК 681.5.015.4

© Кузнецов В. И.

ПРИМЕНИМОСТЬ КОНЕЧНОМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ И ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассмотрены вопросы построения математических моделей динамических систем и моделей измерения их выходных параметров, адекватных реальным системам и процессам измерений. Показано, что в правой части уравнений состояния и измерений присутствует медленноменяющаяся марковская составляющая формирующего шума, позволяющая компенсировать методическую погрешность формализации, возникающую вследствие ограниченной размерности вектора состояния при переходе от распределенной динамической системы к ее представлению с сосредоточенными параметрами.

Одним из важнейших вопросов, возникающих в процессе опытной отработки и при испытаниях сложных технических систем, является математическое описание изучаемых объектов и процессов функционирования. Их изучение заключается в установлении соответствующих математических моделей состояния и в идентификации параметров состояния динамических систем на выбранных математических моделях по результатам измерений, получаемых в процессе испытаний и экспериментов.

Идентификация параметров состояния динамических систем обычно предполагает, что выбраны определенные формы математических моделей состояния, математических моделей процессов измерения, и сводиться к определению неизвестных параметров заданных моделей. Оценки неизвестных параметров определяются путем установления оптимального соответствия выбранной формы математической модели, определяющей глубину ее формализации, и параметров такой модели имеющимся априорным данным и результатам измерений. При этом всякий раз приходится учитывать то, что для выбранной математической модели можно определить оптимальные оценки параметров, однако это не является гарантией их пригодности в случаях, когда модель неверна. Последнее в большей мере относиться к испытаниям сложных технических систем в статистически неоднородных условиях, отличающихся от номинальных или расчетных, для которых установлены формы математических моделей, т.е. когда в процессе эксперимента реализуются отличные от расчетных или номинальных условия функционирования динамических систем и средств измерений. Все эти проявления могут приводить к неадекватности выбранных форм моделей реальным динамическим системам и процессам измерений.

До последнего времени конструирование форм моделей состояния динамических систем и процессов измерений их выходных параметров, которые бы в наибольшей степени позволяли учитывать возможные возмущающие факторы, предпринималось в основном в направлении повышения степени формализации используемых математических моделей за счет расширения их вектора параметров. Это в ряде случаев привело к противоположному эффекту, когда была утеряна практическая возможность решения задач параметрической идентификации динамических систем и оценивания параметров моделей состояния и измерения. Основные причины такого противоречия связаны, прежде всего, с нарушением фундаментальных свойств наблюдаемости [1] используемых моделей при увеличении размерности вектора оцениваемых параметров.

Основной вывод в связи с этим сводится к тому, что необходимо исследовать возможности адекватного описания реальных динамических систем моделями, содержащими вектор неизвестных параметров приемлемой размерности. Здесь понятие приемлемой размерности вектора параметров математической модели состояния или измерения связано не только с упрощением формы модели, но и с наблюдаемостью ее параметров при условии, что выбранная форма модели является инвариантной к различным условиям функционирования и действующим возмущениям.

В последние годы были предприняты попытки использования в задачах параметрической идентификации реальных динамических систем, являющихся, по существу, системами с распределенными параметрами, упро-

Кузнецов Валерий Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела ОАО «Военно-инженерная корпорация».

щенных моделей состояния, т.е. таких, которые заведомо содержат погрешности формализации [2-5] и описывают лишь некоторую проекцию состояния реальных динамических систем с сосредоточенными параметрами. Однако имеется ряд возражений, не позволяющих в достаточной степени обосновать широкое практическое применение имеющихся теоретических разработок в задачах оценивания параметров моделей и идентификации параметров состояния распределенных динамических систем. Такие возражения затрагивают в основном принимаемые допущения о параметрах законов распределения действующих возмущений в уравнениях состояния [2, 4, 5], а также процедуры поиска их оптимальных оценок [2, 3].

В целях решения задач параметрической идентификации динамических систем и оценивания параметров моделей состояния необходимо, прежде всего, решить принципиальный вопрос о возможности адекватного описания реальных динамических систем математическими моделями конечной размерности. Здесь условие адекватного описания рассматривается в отношении интересующего вектора параметров состояния ограниченной размерности. В связи с этим целесообразно рассмотреть следующее утверждение.

Утверждение. *Всякая распределенная динамическая система может быть адекватно описана относительно вектора фазовых координат конечной размерности математической моделью состояния, содержащей марковскую составляющую формирующего шума.*

Доказательство сформулированного утверждения приведено ниже для случаев линейной и нелинейной моделей состояний, а также модели измерений.

Линейная динамическая система. Пусть реальная линейная распределенная (т.е. с распределенными параметрами) динамическая система описывается с точностью до векторного формирующего шума $\boldsymbol{\omega}(t)$, имеющего нулевое среднее $\mathrm{E}\{\boldsymbol{\omega}(t)\}=0$ и δ – коррелированную матрицу интенсивностей

$$\mathrm{E}\left\{\boldsymbol{\omega}(t)\cdot\boldsymbol{\omega}^T(t-\tau)\right\}=\mathbf{Q}_{\boldsymbol{\omega}}(t)\cdot\delta(t-\tau),$$

математической моделью вида

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=-\boldsymbol{\alpha}(t)\cdot\mathbf{x}(t)+\mathbf{g}\left[\mathbf{x}(t),t\right]\cdot\boldsymbol{\omega}(t), \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\alpha}(t)$ – матрица коэффициентов; $\mathbf{x}(t)$ - вектор фазовых координат (параметров состояния) в фазовом пространстве $\boldsymbol{\Omega}_{\mathbf{x}}^{\infty}$ бесконечной размерности.

Уравнение (1) можно представить в несколько ином виде

$$\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{x}}_1(t)\\ \dot{\mathbf{x}}_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\boldsymbol{\alpha}_{11}(t) & -\boldsymbol{\alpha}_{12}(t)\\ -\boldsymbol{\alpha}_{21}(t) & -\boldsymbol{\alpha}_{22}(t)\end{bmatrix}\times$$
$$\times\begin{bmatrix}\mathbf{x}_1(t)\\ \mathbf{x}_2(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{g}_1[\mathbf{x}(t),t)]\\ \mathbf{g}_2[\mathbf{x}(t),t)]\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{\omega}(t),$$

где $\mathbf{x}_1(t)$ – вектор параметров состояния, подлежащих изучению, для которого справедливо $\mathbf{x}_1(t)\subset\mathbf{x}(t)$ и $Dim\{\mathbf{x}_1(t)\}<Dim\{\mathbf{x}(t)\}$. Из последнего уравнения нетрудно выделить ту часть уравнений состояния, которая является моделью конечной размерности и адекватно описывает вектор параметров $\mathbf{x}_1(t)\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathbf{x}}^{n}$

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t)=-\boldsymbol{\alpha}_{11}(t)\cdot\mathbf{x}_1(t)-\boldsymbol{\alpha}_{12}(t)\times$$
$$\times\mathbf{x}_2(t)+\mathbf{g}_1[\mathbf{x}(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t). \quad (2)$$

С учетом того, что вектор $\mathbf{x}_2(t)$ является нестационарным и имеет размерность, позволяющую описывать состояние динамической системы с точностью до формирующего шума $\boldsymbol{\omega}(t)$, можно представить второе слагаемое в правой части уравнения (2) в виде

$$-\boldsymbol{\alpha}_{12}(t)\cdot\mathbf{x}_2(t)=\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\times$$
$$\times\mathbf{u}(t)+\mathbf{g}^*[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t), \quad (3)$$

где

$$\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\mathbf{u}(t)=\mathrm{E}\left\{-\boldsymbol{\alpha}_{12}(t)\cdot\mathbf{x}_2(t)\right\};$$

$$\mathbf{g}^*[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t)=-\boldsymbol{\alpha}_{12}(t)\cdot\mathbf{x}_2(t)-\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\mathbf{u}(t)=$$
$$=-\boldsymbol{\alpha}_{12}(t)\cdot\mathbf{x}_2(t)-\mathrm{E}\left\{-\boldsymbol{\alpha}_{12}(t)\cdot\mathbf{x}_2(t)\right\},$$

что позволяет выделить высокочастотную составляющую формирующего шума, воздействующего на вход описываемой уравнением (2) динамической системы, для которого первый статистический момент принимает нулевое значение.

Поскольку вектор $\mathbf{x}_2(t)$ не входит в левую часть уравнения состояния (2), то непосредственно определить значения переходной матрицы $\mathbf{g}^*[\mathbf{x}_1(t),t)]$ формирующего шума не представляется возможным, что и является причиной возникновения неопределенности в описании модели состояния конечной размерности линейной динамической системы. В дальнейшем, объединив уравнение (2) и выражение (3), можно записать уравнение модели состояния линейной динамической системы, адекватной реальной линейной распределенной системе на векторе параметров состояния конечной размерности $\mathbf{x}_1(t)\subset\mathbf{x}(t)$

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t)=-\boldsymbol{\alpha}_{11}(t)\cdot\mathbf{x}_1(t)+\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\mathbf{u}(t)+$$
$$+\mathbf{g}^*[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t)+\mathbf{g}_1[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t)=$$
$$=-\boldsymbol{\alpha}_{11}(t)\cdot\mathbf{x}_1(t)+\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\times$$
$$\times\mathbf{u}(t)+\tilde{\mathbf{g}}[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t), \quad (4)$$

что доказывает справедливость утверждения для линейных распределенных динамических систем.

Последнее уравнение (4) без потери общности можно представить в виде

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=-\boldsymbol{\alpha}(t)\cdot\mathbf{x}(t)+\mathbf{b}[\mathbf{x}(t),t)]\times$$
$$\times\mathbf{u}(t)+\mathbf{g}[\mathbf{x}(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t), \quad (5)$$

полагая, что вектор параметров состояния $\mathbf{x}_1(t)$ относится к конечномерной динамической системе с сосредоточенными параметрами и эквивалентен вектору фазовых координат реальной распределенной динамической системы.

Нелинейная динамическая система. Пусть реальная распределенная нелинейная динамическая система описывается с точностью до векторного формирующего шума $\boldsymbol{\omega}(t)$, имеющего нулевое среднее $\mathrm{E}\{\boldsymbol{\omega}(t)\}=0$ и δ – коррелированную матрицу интенсивностей

$$\mathrm{E}\left\{\boldsymbol{\omega}(t)\cdot\boldsymbol{\omega}^T(t-\tau)\right\}=\mathbf{Q}_{\boldsymbol{\omega}}(t)\cdot\delta(t-\tau),$$

математической моделью вида

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{f}\left[\mathbf{x}(t),t\right]+\mathbf{g}\left[\mathbf{x}(t),t\right]\cdot\boldsymbol{\omega}(t), \qquad (6)$$

где $\mathbf{f}\left[\cdot\right]$ – векторная функция; $\mathbf{x}(t)$ – вектор фазовых координат в фазовом пространстве $\boldsymbol{\Omega}_{\mathbf{x}}^{\infty}$ бесконечной размерности.

Представив уравнение (6) в виде

$$\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{x}}_1(t)\\ \dot{\mathbf{x}}_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}(t),t]\\ \mathbf{f}_2[\mathbf{x}(t),t]\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\mathbf{g}_1[\mathbf{x}(t),t)]\\ \mathbf{g}_2[\mathbf{x}(t),t)]\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{\omega}(t),$$

можно выделить ту часть уравнений состояния, которая является моделью конечной размерности и адекватно описывает вектор параметров $\mathbf{x}_1(t)\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathbf{x}}^{n}$

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t)=\mathbf{f}_1[\mathbf{x}(t),t]+\mathbf{g}_1[\mathbf{x}(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t).$$

Поскольку векторная функция $\mathbf{f}_1[\mathbf{x}(t),t]$ включает полный вектор состояния $\mathbf{x}(t)$, то может быть преобразована к виду

$$\mathbf{f}_1[\mathbf{x}(t),t]=\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),\mathbf{x}_2(t),t]. \qquad (7)$$

Разложение этой функции в ряд Тейлора относительно вектора $\left\{\mathbf{x}_1(t),0\right\}$ имеет вид

$$\mathbf{f}_1[\mathbf{x}(t),t]=\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]+\tfrac{\partial}{\partial\mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\cdot\mathbf{x}_2(t)+$$
$$+\tfrac{1}{2!}\cdot\mathbf{x}_2^T(t)\cdot\tfrac{\partial}{\partial\mathbf{x}_2}\left[\tfrac{\partial}{\partial\mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\right]^T\cdot\mathbf{x}_2(t)+\ldots$$

Для суммы членов разложения ряда Тейлора, начиная со второго, можно записать

$$\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\mathbf{u}(t)=$$
$$=\mathrm{E}\{\tfrac{\partial}{\partial\mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\cdot\mathbf{x}_2(t)+\tfrac{1}{2!}\cdot\mathbf{x}_2^T(t)\times$$
$$\times\tfrac{\partial}{\partial\mathbf{x}_2}\left[\tfrac{\partial}{\partial\mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\right]^T\cdot\mathbf{x}_2(t)+\ldots\}, \qquad (8)$$

что позволяет выделить высокочастотную составляющую формирующего шума

$$\mathbf{g}^*[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t)=\tfrac{\partial}{\partial\mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\cdot\mathbf{x}_2(t)+$$
$$+\tfrac{1}{2!}\cdot\mathbf{x}_2^T(t)\cdot\tfrac{\partial}{\partial\mathbf{x}_2}\left[\tfrac{\partial}{\partial\mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\right]^T\cdot\mathbf{x}_2(t)+\ldots$$
$$\ldots-\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\mathbf{u}(t), \qquad (9)$$

для которого первый статистический момент

$$\mathrm{E}\left\{\mathbf{g}^*[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t)\right\}=0.$$

С учетом соотношений (8) и выражение (9) модель (7) можно представить в виде

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t)=\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t)]+\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\times$$
$$\times\mathbf{u}(t)+\mathbf{g}^*[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t),$$

где функция $\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t)]$ не зависит от вектора параметров $\mathbf{x}_2(t)$ и поэтому справедливо следующее:

$$\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t)]=\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),t)].$$

Тогда можно записать уравнение модели состояния нелинейной динамической системы, адекватной реальной нелинейной распределённой системе на векторе параметров состояния конечной размерности $\mathbf{x}_1(t)\subset\mathbf{x}(t)$

$$\dot{\mathbf{x}}_1(t)=\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),t)]+\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\mathbf{u}(t)+$$
$$+\mathbf{g}^*[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t)+\mathbf{g}_1[\mathbf{x}(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t)=$$
$$=\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),t)]+\mathbf{b}[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\mathbf{u}(t)+\tilde{\mathbf{g}}[\mathbf{x}_1(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t), \quad (10)$$

что доказывает справедливость утверждения для нелинейных распределенных динамических систем.

Уравнение (10) для описания вектора $\mathbf{x}_1(t)\in\boldsymbol{\Omega}_{\mathbf{x}}^{n}$ фазовых координат $\mathbf{x}_1(t)\subset\mathbf{x}(t)$ нелинейной динамической системы можно отождествить с динамической системой конечной размерности с сосредоточенными параметрами

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{f}[\mathbf{x}(t),t)]+\mathbf{b}[\mathbf{x}(t),t)]\times$$
$$\times\mathbf{u}(t)+\mathbf{g}[\mathbf{x}(t),t)]\cdot\boldsymbol{\omega}(t), \qquad (11)$$

полагая, что вектор параметров состояния $\mathbf{x}(t)$ математической модели эквивалентен вектору $\mathbf{x}_1(t)$ фазовых координат реальной распределенной динамической системы.

Косвенные измерения. Связь уравнений состояния и измерений в наиболее общем случае может быть задана в виде аддитивной смеси полезного сигнала, описываемого уравнением косвенных измерений, и случайной помехи

$$\mathbf{y}(t)=\mathbf{h}\left[\mathbf{x}(t),t\right]+\mathbf{v}(t), \qquad (12)$$

где $\mathbf{h}\left[\cdot\right]$ – векторная функция измерений;

$\mathbf{v}(t)$– δ-коррелированная нормально распределенная случайная векторная помеха с нулевым средним $\mathrm{E}\left\{\mathbf{v}(t)\right\}=0$ и матрицей ковариаций

$$\mathrm{E}\left\{\mathbf{v}(t)\cdot\mathbf{v}^T(t-\tau)\right\}=\mathbf{Q}_{\mathbf{v}}(t)\cdot\delta(t-\tau).$$

Дальнейшие преобразования уравнения (12) связаны с представлением уравнения измерений на уровне рассматриваемых математических моделей состояния конечномерных динамических систем с сосредоточенными параметрами

$$\mathbf{y}(t)=\mathbf{h}\left[\mathbf{x}_1(t),\mathbf{x}_2(t),t\right]+\mathbf{v}(t), \qquad (13)$$

где $\mathbf{x}_1(t)$ и $\mathbf{x}_2(t)$ имеют тот же смысл, что и в уравнениях (2) и (7). Разложение векторной функции $\mathbf{h}\left[\cdot\right]$ в ряд Тейлора относительно вектора $\left\{\mathbf{x}_1(t),0\right\}$ позволяет получить выражение

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}[\mathbf{x}_1(t),0,t] + \tfrac{\partial}{\partial \mathbf{x}_2}\mathbf{h}[\mathbf{x}_1(t),0,t]\cdot \mathbf{x}_2(t) +$$
$$+ \tfrac{1}{2!}\cdot \mathbf{x}_2^T(t)\cdot \tfrac{\partial}{\partial \mathbf{x}_2}\left[\tfrac{\partial}{\partial \mathbf{x}_2}\mathbf{h}[\mathbf{x}_1(t),0,t]\right]^T \cdot \mathbf{x}_2(t) + \ldots + \mathbf{v}(t). \quad (14)$$

Для суммы членов разложения ряда Тейлора, начиная со второго, можно записать

$$\boldsymbol{\xi}(t) = \mathrm{E}\{\tfrac{\partial}{\partial \mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\cdot \mathbf{x}_2(t) + \tfrac{1}{2!}\cdot \mathbf{x}_2^T(t)\times$$
$$\times \tfrac{\partial}{\partial \mathbf{x}_2}\left[\tfrac{\partial}{\partial \mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\right]^T \cdot \mathbf{x}_2(t) + \ldots\}, \quad (15)$$

что позволяет выделить высокочастотную зашумляющую составляющую

$$\mathbf{v}^*(t) = \tfrac{\partial}{\partial \mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\cdot \mathbf{x}_2(t) + \tfrac{1}{2!}\cdot \mathbf{x}_2^T(t)\times$$
$$\times \tfrac{\partial}{\partial \mathbf{x}_2}\left[\tfrac{\partial}{\partial \mathbf{x}_2}\mathbf{f}_1[\mathbf{x}_1(t),0,t]\right]^T \cdot \mathbf{x}_2(t) + \ldots - \boldsymbol{\xi}(t), \quad (16)$$

для которой первый статистический момент

$$\mathrm{E}\left\{\mathbf{v}^*(t)\right\} = 0.$$

С учетом соотношений (15) и (16) уравнение (13) можно преобразовать к виду

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}\left[\mathbf{x}_1(t),0,t\right] + \boldsymbol{\xi}(t) + \mathbf{v}^*(t) +$$
$$+\mathbf{v}(t) = \mathbf{h}\left[\mathbf{x}_1(t),0,t\right] + \boldsymbol{\xi}(t) + \tilde{\mathbf{v}}(t). \quad (17)$$

Поскольку функция $\mathbf{h}[\mathbf{x}_1(t),0,t)]$ не зависит от вектора параметров $\mathbf{x}_2(t)$, то справедливо следующее:

$$\mathbf{h}\left[\mathbf{x}_1(t),0,t\right] = \mathbf{h}\left[\mathbf{x}_1(t),t\right].$$

Тогда можно записать уравнение модели косвенных измерений, адекватной реальному процессу измерений на векторе параметров состояния конечной размерности $\mathbf{x}_1(t) \subset \mathbf{x}(t)$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{h}\left[\mathbf{x}_1(t),t\right] + \boldsymbol{\xi}(t) + \tilde{\mathbf{v}}(t), \quad (18)$$

что доказывает справедливость утверждения для моделей косвенных измерений параметров состояния распределенных динамических систем.

В связи с доказанным утверждением можно сделать следующие выводы.

Основное отличие полученных моделей состояния распределенных линейных и нелинейных динамических систем, а также моделей косвенных измерений заключается в том, что в правой части уравнений состояния и измерений присутствует медленноменяющаяся марковская составляющая формирующего шума, позволяющая компенсировать методическую погрешность формализации, возникающую вследствие ограниченной размерности вектора состояния при переходе от распределенной динамической системы к ее представлению с сосредоточенными параметрами. Это, с одной стороны, обеспечивает возможность адекватного описания реальных систем и процессов измерения конечномерными моделями состояния динамических систем и измерения их выходных параметров, а с другой – приводит к возникновению априорной неопределенности как в описании медленноменяющейся марковской составляющей, так и в задании значений матрицы интенсивностей формирующего шума в уравнениях состояния и шумовой помехи в уравнениях измерения. Последнее является веским аргументом при обосновании целесообразности применения адаптивного подхода при решении задач параметрической идентификации динамических систем.

Векторная помеха $\tilde{\mathbf{v}}(t)$, определяемая из уравнений (16) и (17), является δ-коррелированным случайным процессом с нулевым средним $\mathrm{E}\left\{\tilde{\mathbf{v}}(t)\right\} = 0$ и матрицей ковариаций $\mathrm{E}\left\{\tilde{\mathbf{v}}(t)\cdot\tilde{\mathbf{v}}^T(t-\tau)\right\} = \mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{v}}}(t)\cdot\delta(t-\tau)$. Причем априорная неопределенность задания параметров состояния $\mathbf{x}_2(t)$ динамической системы приводит к неопределенности ковариационной матрицы $\mathbf{Q}_{\tilde{\mathbf{v}}}(t)$. Принимая во внимание нестационарность вектора фазовых координат распределенной динамической системы, можно сделать заключение, что порождаемый случайный процесс $\boldsymbol{\xi}(t)$ также является нестационарным.

Наличие медленноменяющейся марковской составляющей в уравнении (18) объясняет возникновение автокорреляции погрешностей измерений в тех случаях, когда для анализа распределенных динамических систем принимается конечномерная модель вида (13).

Корректное использование полученных моделей предполагает применение соответствующего алгоритмического обеспечения обработки и анализа измерительных данных в условиях априорной неопределённости параметров, определяющих информационную обстановку.

Литература
1. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и её применение в связи и управлении/ Пер. с англ. – М.: Связь, 1976.
2. Петров А.В., Яковлев А.А. Анализ и синтез радиотехнических комплексов. – М.: Радио и связь, 1984.
3. Острём К.Й. Введение в стохастическую теорию управления/ Пер. с англ. – М.:Мир, 1983.
4. Мук Д.Дж., Джанкинс Дж.Л. Методы минимальной ошибки модели для оценивания динамических систем с неточной моделью// Аэрокосмическая техника. – 1989. - №1.
5. Мук Д.Дж. Оценка и идентификация нелинейных динамических систем// Аэрокосмическая техника. – 1990. - №2.

Материал поступил в редакцию 01. 03. 2008г.