

АЛГОРИТМ ТРЕХУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С. П. ДМИТРИЕВА

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: job_8@mail.ru

Представлена аналитическая модель многоуровневого прогнозирования состояния многопараметрической технической системы, позволяющая на основе апостериорной информации контролировать выполнение целевых функций системы в ходе ее эксплуатации. При построении аналитической модели необходимо на основе экспериментальных данных выявить базовый и уточняющий компоненты различной степени детализации на разных уровнях по принципу композиции и декомпозиции технических систем, функционирующих по сложным законам. Аналитическая модель рассмотрена применительно к распределенной иерархической многоагентной динамической измерительной системе в рамках проекта по построению метеокомплекса.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, аналитическая модель, прогнозирование состояния технической системы, алгоритм, базовый компонент, многопараметрическая техническая система.

Новая методология научного исследования в компьютерном моделировании, предполагающая проектирование технических систем и обеспечение их правильного функционирования с использованием имитационных моделей прогнозирования функционально-параметрических показателей, весьма актуальна. При этом организация и проведение вычислительного эксперимента требуют серьезной математической и информационной поддержки процесса системного моделирования.

Наиболее перспективным, с точки зрения реализации многоуровневого моделирования, является структурно-функциональный подход, применяемый, например, в системе моделирования Rethink и базирующийся на методологии структурного анализа и проектирования. При такой технологии существует несколько уровней представления моделей: в виде структурных схем, с использованием CASE-средств, в виде потоковых схем и диаграмм. Ряд программных продуктов, таких как AUTOMOD, ProModel, TAYLOR, WITNESS и др., поддерживают интеграцию моделей на основе создания вложенных структур. Особый интерес представляют системы Arena и Extend, предлагающие подход к стратификации, основанный на построении иерархических многоуровневых структур [1].

Построение модели прогнозирования состояния системы или ее подсистем в реальном масштабе времени [2—4] и текущий контроль параметров необходимы как для сложных многопараметрических технических систем, так и для элементарных механизмов (энергодоменов), работающих в автономном режиме. Создание алгоритма построения модели прогнозирования особенно актуально для систем, работающих в автономном автоматическом режиме [5, 6].

В настоящей статье представлены результаты разработки обобщенного алгоритма трехуровневого моделирования многопараметрической технической системы и построения на основе экспериментальных данных ее аналитической модели с различной степенью детализации по принципу композиции и декомпозиции технических систем. Алгоритм разработан применительно к многоагентной информационно-измерительной и управляющей системе ИУС(g_i, a_j, p_m) функционирующей в неопределенной относительно внешних возмущений обстановке.

Для построения модели $M_{ИУС}(g_i, a_j, p_m)$ воспользуемся (как и в работе [7]) теорией прогнозирующих моделей (Model Predictive Control) [8], которая позволяет на основе данных о ИУС(g_i, a_j, p_m) создавать модель с высокими адаптивными свойствами [9, 10], что обеспечивает выполнение условия

$$\{M_{ИУС}(g_i, a_j, p_m)\}_1^n \cap \{ИУС(g_i, a_j, p_m)\}_1^n = \max.$$

Рассмотрим обобщенный алгоритм построения аналитической модели многопараметрической динамической технической системы. Будем полагать, что параметры w, v и g могут быть измерены в конкретный момент оценивания исследуемого процесса, а значение параметра q в этот момент времени не известно. Иными словами, наиболее точная модель, выводимая на основе исходных экспериментальных данных, должна непосредственно учитывать влияние параметров факторов w, v и g , в то же время эта модель должна быть инвариантна относительно q .

Таким образом, в качестве исходных имеется набор дискретных данных: $y(x, w_i, v_j, g_r, q_s)$, где $i=1\dots m, j=1\dots l, r=1\dots k, s=1\dots p$, здесь m, l, k, p — число вариантов различных значений параметров w, v, g, q соответственно, для которых были проведены эксперименты; необходимо получить аналитическую зависимость для исходных данных в виде $y=f(x, w_i, v_j, g_r, q_s)$.

Применим для моделирования подход „от простого — к сложному“. Будем строить аналитическую модель прогнозирования, постепенно „подключая“ влияние отдельных параметров. Обобщенный алгоритм построения аналитической модели представлен на рис. 1.

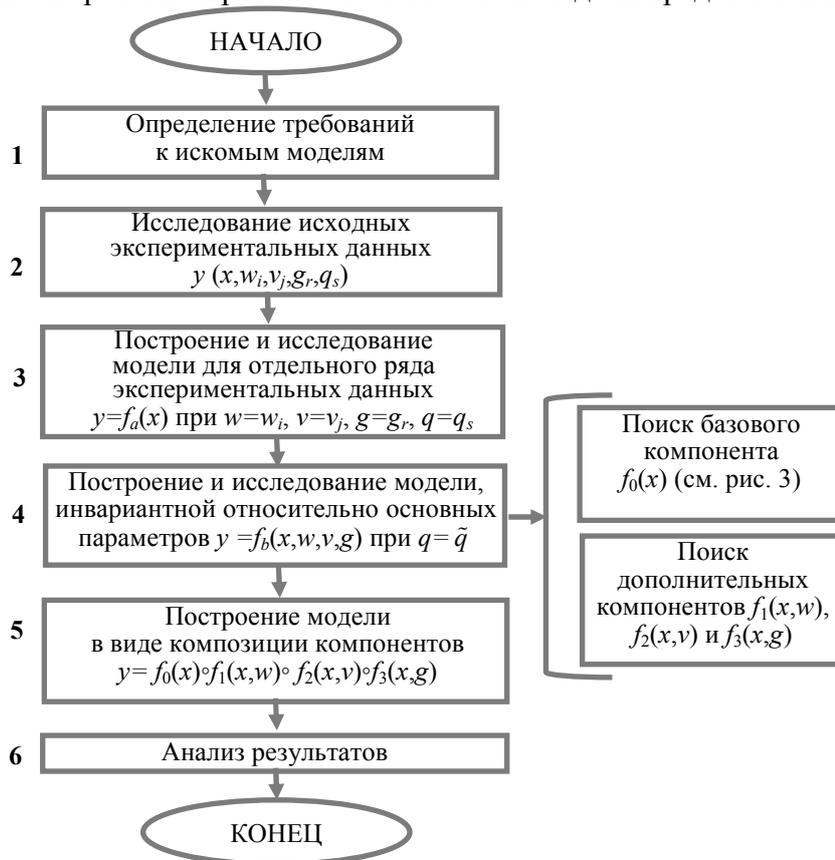


Рис. 1

Реализация алгоритма включает шесть этапов.

1. Определяются требования к искомым моделям.
2. Проводится первичная обработка и исследование данных. На данном этапе осуществляется дискретизация и нормирование исходных данных (при необходимости). Определяются

допустимые значения экспериментальных данных на основании как исходных данных, так и известных физических законов, которым следует рассматриваемый процесс. Устанавливаются характерные особенности искомой зависимости, представленной в графическом виде: интервалы монотонности и знакопостоянства, точки разрывов и перегибов и т.п.

3. Строится модель для отдельного ряда данных, т.е. выводится аналитическая зависимость $y = f_a(x)$ для некоторых конкретных значений параметров: $w=w_i$, $v=v_j$, $g=g_r$, $q=q_s$. Исследование модели, построенной таким образом, позволит выявить некоторые существенные для данного процесса функциональные особенности. При этом необходимо оценить, насколько удачен для рассматриваемых данных выбор точек разбиения графического изображения на изотропные участки и подбор классов функций.

4. Предлагается построение модели, инвариантной относительно одного или нескольких параметров (в зависимости от сформулированных изначально требований). В рассматриваемом случае строится аналитическая модель $y = f_b(x, w, v, g)$, инвариантная относительно параметра q , значения которого будут не известны при использовании искомой модели при прогнозировании. Поэтому модель $y = f_b(x, w, v, g)$ строится для некоторого частного или усредненного каким-либо образом значения параметра $q = \bar{q}$; подбор параметров w , v и g возможен на данном этапе в виде различных значений коэффициентов в структуре модели. На способ получения инвариантной модели влияют изначальные предположения, а также результаты исследований экспериментальных данных. Возможны, например, такие варианты „исключения“ параметра, как построение модели для наименьшего, наибольшего, некоторого усредненного и наиболее характерного (наиболее часто встречающегося) значений параметра.

5. Строится модель в виде композиции компонентов. Здесь можно выделить подэтапы поиска базового компонента и уточняющих компонентов.

6. Осуществляется анализ результатов.

Структура аналитической модели в виде композиции компонентов имеет следующий вид:

$$y = f_0(x) \circ f_1(x, w) \circ f_2(x, v) \circ f_3(x, g). \quad (2)$$

В формуле (2) базовый компонент $f_0(x)$ представляет собой „ядро“ модели. В идеальном случае базовая составляющая раскрывает сущность исследуемого процесса, описывает его наиболее характерные особенности (то, что при рассмотрении временных рядов называют трендом или систематической составляющей). При построении эмпирической модели прогнозирования базовый компонент также может быть выведен исходя из наилучших предположений о развитии физического процесса.

Дополнительные компоненты $f_1(x, w)$, $f_2(x, v)$ и $f_3(x, g)$ вводятся в модель для учета воздействия на исследуемый процесс параметров v , g и w соответственно (рис. 2).

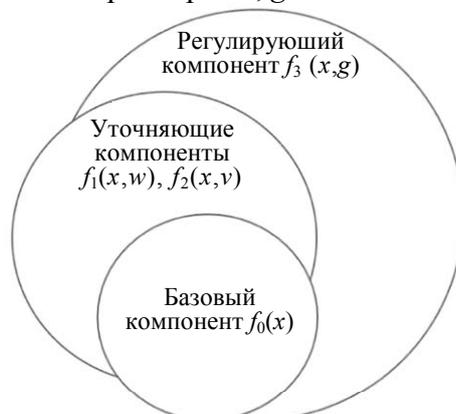


Рис. 2

К сожалению, найти композицию компонентов, обеспечивающую заданную точность, представляется не всегда возможным. В этом случае можно использовать инвариантную

модель 4-го этапа и влияние параметров v , g и w за счет различных коэффициентов в эмпирических соотношениях.

Представление аналитической модели в виде композиции компонентов позволяет получить модели исследуемого процесса с разной степенью детализации (см. таблицу).

Компоненты аналитической модели	Назначение компонента	Характеристика этапа моделирования
<i>Базовый компонент</i> $f_0(x)$ — общая (универсальная) часть искомой модели	Учитывает влияние внутренних процессов системы на ее работоспособность	Рассмотрение семантики процесса и выделение ядра прогнозирующей функции
<i>Уточняющие компоненты</i> $f_1(x, w), f_2(x, v)$	Учитывает воздействие внешних факторов и возмущений среды	Декларация принципиальных ограничений для искомой функции
<i>Регулирующий компонент</i> $f_3(x, g)$	Учитывает обратную связь при условии ее наличия	Возможность параметрического расширения для управления точностью прогнозов и формирования оценок с разной степенью детализации

В зависимости от конкретных целей и условий применения искомым моделям можно принимать во внимание или, наоборот, исключать из рассмотрения отдельные компоненты в структуре модели, учитывая или игнорируя таким образом отдельные факторы влияния.

Кроме того, введение в модель дополнительных компонентов позволит не только учитывать текущие внешние условия, но и обеспечить варьирование самих компонентов в зависимости от целей моделирования. Иными словами, кроме базового и уточняющих компонентов может быть введен некий регулирующий компонент, например, для оценки наихудших, наилучших или каких-либо аномальных вариантов развития исследуемого физического процесса.

Таким образом, корректируя в ходе эксперимента результат, возможно преобразовать его в модель прогнозирования, а изменение параметров данной модели при сохранении ее семантического значения приводит к получению коэффициентов модели.

Рассмотрим, далее, обобщенный алгоритм поиска базового и дополнительных компонентов. Используя базовый компонент модели $M_{ИУС}(g_i, a_j, p_m)$, можно получить прогноз наиболее низкого уровня детализации, т.е. грубо оценить состояние технического процесса в ИУС(g_i, a_j, p_m) до получения каких-либо дополнительных сведений о воздействии на систему внешних или внутренних факторов. В зависимости от целей моделирования, изначально установленных ограничений и условий применения модели основу базового компонента могут составлять различные варианты исходных экспериментальных данных: см. рис. 3, где приведен обобщенный алгоритм поиска базового компонента модели прогнозирования, представленной в компьютерном виде: $\{ComVid[M_{ИУС}(g_i, a_j, p_m)]\}$.

Другим вариантом основы для построения базового компонента являются усредненные некоторым образом данные проведенных экспериментов. Однако здесь возникает проблема выбора метода усреднения — вычисление арифметического среднего по всем данным, использование интегрального показателя и т.п.

Для некоторых целей моделирования, например для прогнозирования аномальных ситуаций, за основу базового компонента модели могут быть приняты минимальные или максимальные значения параметров исследуемого процесса, характеризующие наихудшее или, наоборот, наиболее благоприятное его состояние.

Построение дополнительных, уточняющих компонентов, как и в случае с базовым компонентом, также является неоднозначной задачей и при этом непосредственно зависит от

того, как был получен базовый компонент. Заметим, что введение любого дополнительного компонента может быть обусловлено следующими причинами:

- необходимостью учета в модели какого-либо фактора, влияющего на поведение исследуемого объекта;
- необходимостью применять модель при условиях, отличных от условий, для которых был получен базовый компонент.

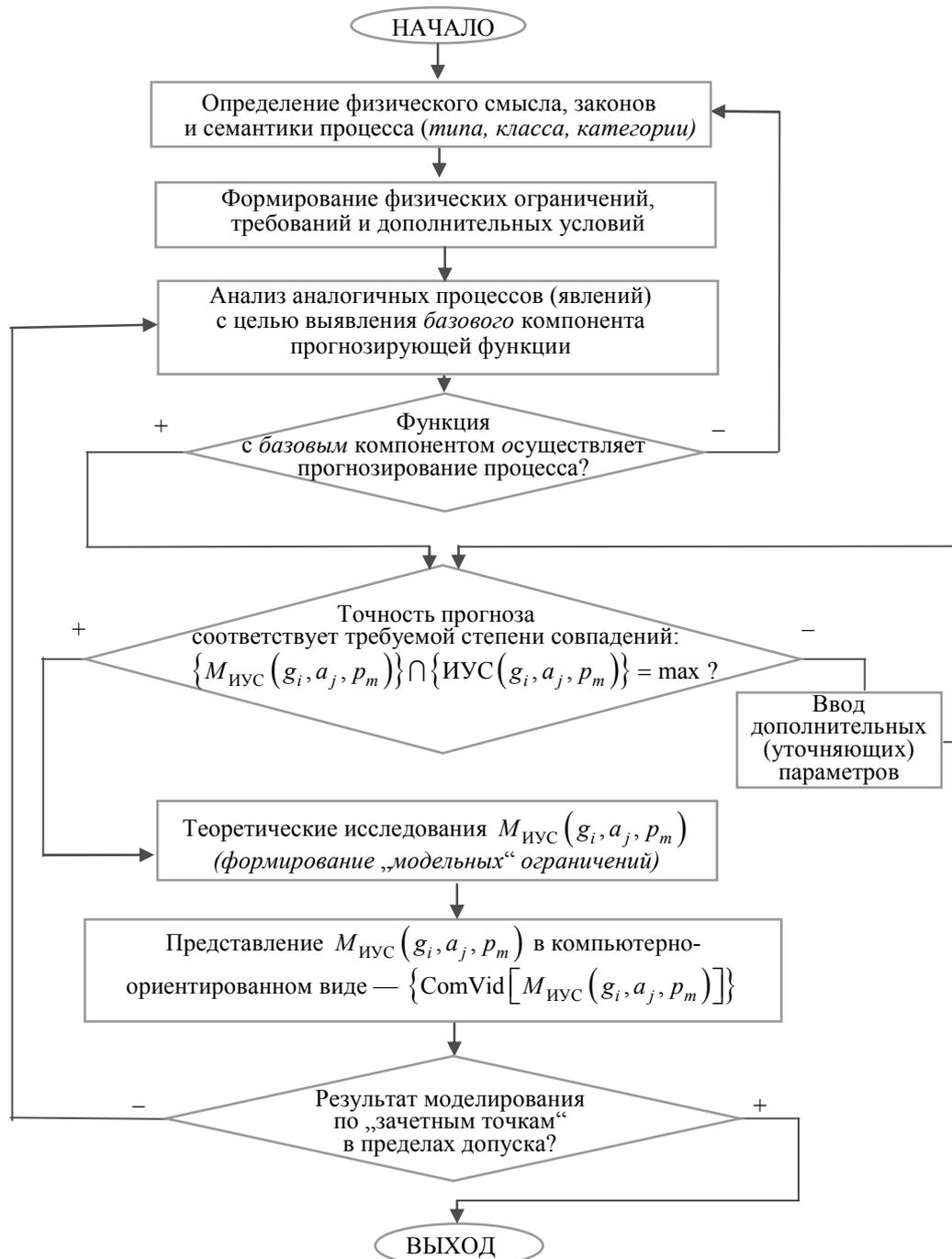


Рис. 3

Одним из способов построения дополнительных компонентов является аналитическое представление данных (см. рис. 3). Кроме того, в некоторых ситуациях вид дополнительного компонента может определяться известными физическими законами.

В качестве примера на рис. 4 показан графический вид аналитической модели аппроксимации экспериментальных данных, полученных при измерении скорости ветра (V) метеостанцией, описанной в работе [7].

Таким образом, в результате многоуровневого моделирования посредством прогнозирования и оценивания состояния системы проверяется гипотеза о правильности схемотехнических и параметрических решений по ее построению, т.е. дается ответ на вопрос о необходимости вмешательства в структуру исследуемой системы и ее коррекции [11—13].

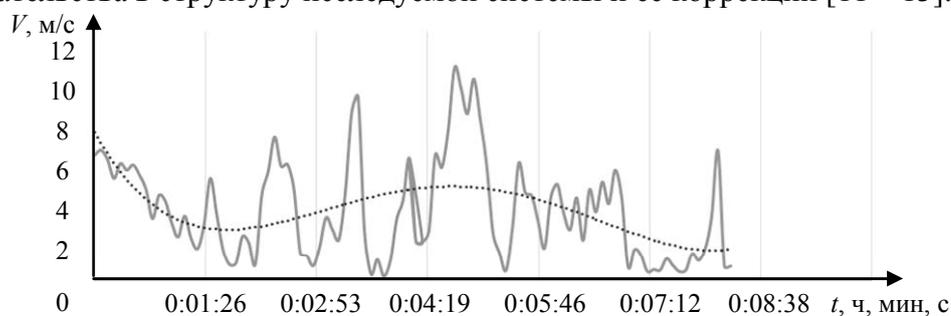


Рис. 4

Показано, что для построения многоуровневой модели прогнозирования, оценивающей состояние многопараметрической технической системы, необходимо определить текущие значения ее параметров (исходных экспериментальных данных), построив по ним аппроксимирующую функцию, исследовать модели, инвариантные относительно основных параметров, и затем построить модель в виде композиции базового и уточняющих компонентов и проверить ее на соответствие реальным данным по заданным критериям.

Автором настоящей статьи проводятся аналитические исследования в целях создания единых редуцированных функций оценки состояния многопараметрической технической системы и апробация результатов на практике. В ходе исследований создан алгоритм обработки экспериментальных данных и произведен их сравнительный анализ с теоретическими расчетами. Результаты работы использованы компанией ООО „ЛОМО Метео“ (Санкт-Петербург) и внедрены в учебный процесс в НИУ ИТМО [14—16].

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 14.Z50.31.0031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raysin K., Rice J., Dorman E., Matheny S. Telesonar network modeling and simulation // Oceans Conf. Record (IEEE). 1999. Vol. 2 P. 747—752.
2. Ahrens C. D. Essentials of Meteorology: An Invitation to the Atmosphere. Cengage Learning, 2011. 506 p.
3. Söffker D., Xingguang Fu, Hasselberg A., Langer M. Modeling of complex human-process interaction as framework for assistance and supervisory control of technical processes // Intern. Journal of Information Technology and Web Engineering. 2012. Vol. 7. 121 p.
4. Livingstone D. A. Practical Guide to Scientific Data Analysis. John Wiley & Sons, 2010. 358 p.
5. Демин А. В., Копорский Н. С. Имитационное моделирование информационно-измерительных и управляющих систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 138 с.
6. Arteta J., Marécal V., Rivière E.D. Regional modelling of tracer transport by tropical convection. Part 1: Sensitivity to convection parameterization // Atmospheric Chemistry and Physics. 2009. Vol. N 9 (18). P. 7081—7100.
7. Демин А. В., Дмитриева С. П. Модель прогнозирования состояния многопараметрической технической системы // Наст. вып. С. 920—926.

8. *Eusgeld I., Kröger W.* Comparative evaluation of modeling and simulation techniques for interdependent critical infrastructures // Proc. of the 9th Intern. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management. 2008. Vol. 1. P. 484—491.
9. *Vidal D., Zou X., Uesaka T.* Modeling coating structure development using a Monte Carlo deposition method. Part 1: Modeling methodology // Tappi Journal. 2003. Vol. 2 (4). P. 3—8.
10. *Jiang Z., Liu S., Dougal R. A.* Virtual-prototyping satellite electrical power systems using the virtual test bed // Proc. of the IEEE SOUTHEASTCON Conf. 2002. P. 113—120.
11. *Meliopoulos A. P., Cokkinides G., Beker B., Dougal R.* New tool for visualization and animation of power component and system operation // Proc. of the 33rd Annual Hawaii Intern. Conf. on System Sciences. 2000. P. 95.
12. *Fu Z. J., Zhou X. D., Chen Y. Q., Gong J. H., Peng F., Yan Z. D., Zhang T. L., Yang L. Z.* The influence of random slowdown process and lock-step effect on the fundamental diagram of the nonlinear pedestrian dynamics: An estimating-correction cellular automaton // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2015. Vol. 20 (3). P. 832—845.
13. *Bonilla J., Dormido S., Cellier F. E.* Switching moving boundary models for two-phase flow evaporators and condensers // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2015. Vol. 20 (3). P. 743—768.
14. *Демин А. В., Дмитриева С. П.* Разработка алгоритмов построения прогнозных многопараметрических моделей физических явлений // Тр. III Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям „IS&IT 14“. М.: Физматлит, 2014. Т. 3. С. 289—294.
15. *Dmitrieva S. P.* Development of scientific forecasting // Proc. of the IV Intern. Sci. Conf. “Science, Technology and Higher Education”. 2014. Vol. 2. P. 302—307 [Электронный ресурс]: <<http://science-canada.com/>>.
16. *Dmitrieva S. P.* Development of scientific forecasting: building predictive models // Proc. of the V Intern. Sci. Conf. “Science and Education”. 2014. Vol. 2. P. 180—185 [Электронный ресурс]: <<http://www.euscience.de/>>.

Сведения об авторе

Светлана Петровна Дмитриева — Университет ИТМО; кафедра оптико-цифровых систем и технологий; инженер-исследователь; E-mail: job_8@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и технологий

Поступила в редакцию
31.08.15 г.

Ссылка для цитирования: *Дмитриева С. П.* Алгоритм трехуровневого моделирования многопараметрической технической системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 11. С. 927—933.

ALGORITHM OF THREE-LEVEL MODELING OF MULTI-PARAMETER TECHNICAL SYSTEM

S. P. Dmitrieva

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: job_8@mail.ru

An analytical model is developed for multi-parameter technical system state assessment. The model allows monitoring of the system objective functions during its operation on the base of a posteriori information. The model construction calls for identification of basic and clarifying component varying degrees of detail at different levels, according to the principle of composition and decomposition of technical systems. Application of the analytical model to assessment of the state of a multi-parameter technical system considered in relation to complex hierarchical distributed multi-agent dynamic measuring systems to be designed in the framework of the project on construction of weather station complex.

Keywords: computer simulation, analytical model, predictive assessment of technical systems, algorithm, basic component, multi-parameter technical system.

Data on author

Svetlana P. Dmitrieva — ITMO University, Department of Optical and Digital Systems and Technologies; Research Engineer; E-mail: job_8@mail.ru

For citation: *Dmitrieva S. P.* Algorithm of three-level modeling of multi-parameter technical system // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 11. P. 927—933 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-11-927-933