

УДК 004.8

DOI: 10.15827/0236-235X.119.373-377

Дата подачи статьи: 13.04.17

2017. Т. 30. № 3. С. 373–377

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

*А.А. Генов, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник, kt-mati@mail.ru
(Центр визуализации и спутниковых информационных технологий ФНЦ НИИСИ РАН,
Нахимовский просп., 36, корп. 1, г. Москва, 117218, Россия);*

*К.Д. Русаков, младший научный сотрудник, rusakov.msk@yandex.ru
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ул. Профсоюзная, 65, г. Москва, 117997, Россия);*

*С.Ш. Хиль, к.т.н., доцент, skhill@mail.ru
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Волоколамское шоссе, 4, г. Москва, 125993, Россия)*

В статье обозначена актуальная задача идентификации функционального состояния сложной технической системы в условиях повышенной зашумленности с помощью перехода к другому пространству признаков наблюдаемого состояния, определено понятие «функциональное состояние».

Задача оценки функционального состояния показана как дуальная задача идентификации и распознавания образов. Уделено внимание возможному выбору параметров математических моделей, а также их структур в качестве новых признаков наблюдаемого состояния. Для решения задачи параметрической идентификации выбран метод наименьших квадратов, показывающий смену функционального состояния.

В задачах контроля и испытания сложными техническими системами немаловажную роль играет процесс анализа измерительной информации. Только пройдя все этапы обработки, можно принять решение о том или ином состоянии объекта испытаний. Однако сделать это сложно в случае поступления информации очень низкого качества. Устранение данной проблемы сводится в основном к поиску решений по формированию и совершенствованию соответствующих правил принятия управленческих решений. При этом в штатных условиях и ситуациях создание таких правил во многих случаях не вызывает особых проблем, однако в нештатных условиях сделать это проблематично. Анализ состояния сложных технических объектов или их подсистем по результатам измерений предполагает решение задач структурной и параметрической идентификации.

Управление сложными техническими объектами и их испытание характеризуются неопределенностью воздействия внешних факторов, аномальными и случайными погрешностями измерений. Для обеспечения требуемого качества анализа состояния их подсистем необходимо формирование принципов адаптивного управления процессом идентификации, методик оптимального выбора структуры моделей исходя из качества данных измерений. Особенно это актуально при автоматизации вторичной обработки на объектах с терминальным управлением.

Ключевые слова: *идентификация состояния, функциональное состояние, сложная техническая система, повышенная зашумленность, распознавание образов, параметрическая идентификация, метод наименьших квадратов.*

Повышение уровня автоматизации процессов управления состояниями сложных технических систем получает активное развитие. Решение данной проблемы сводится в основном к поиску способов формирования и совершенствования соответствующих правил принятия управленческих решений. При этом в штатных условиях и ситуациях создание таких правил во многих случаях не вызывает особых проблем, однако в нештатных условиях сделать это проблематично.

В задачах контроля и испытания сложных технических систем немаловажную роль играет анализ измерительной информации. Только пройдя все этапы обработки, можно принять решение о том или ином состоянии объекта испытаний. Однако это сложно сделать, если объем измерительной информации недостаточен и велика помеховая составляющая.

Дефиниция функционального состояния

Одним из показателей технического состояния объекта является правильное/неправильное функционирование. Заметим, что при функционировании объекта испытаний система управления задей-

ствует в нем различные функции, узлы, агрегаты. Из этого следует, что под воздействием системы управления объект будет находиться в различных устойчивых и равновесных фазах своего функционирования, которые будем определять как функциональные состояния объекта испытаний. Понятие функционального состояния является математической интерпретацией режимов функционирования сложного технического объекта.

В [1] отмечено, что модель объекта должна отвечать целям ее использования. Применительно к задачам ситуационного управления это означает, что должно существовать такое соответствие между множеством состояний выбранной модели и множеством возможных целей управления объектом, которое позволяет однозначно идентифицировать каждую цель во множестве этих состояний. В математической форме это требование может быть записано в следующем виде: $R \subset Q$, где Q – отношение эквивалентности, определенное на множестве состояний модели таким образом, чтобы множество его классов на этом множестве взаимно-однозначно соответствовало множеству имен целей в управлении объектом. Все модели, удовлетворяющие данному условию, могут быть

использованы для решения задач ситуационного управления поведением объектов в пространстве их состояний. Это означает, что им присуще свойство *функциональности*, выражающееся в наборе возможностей (функций), которые предоставляет (выполняет) данный объект. На этом основании такие модели будем называть функциональными моделями объекта, а используемые в них состояния – функциональными состояниями. Таким образом, *функциональное состояние* – это атрибут детерминированной модели управляемых изменений в процессах функционирования технического объекта, который

а) характеризует в модели устойчивую и равновесную фазу этих процессов относительно заданного подмножества воздействий внешней среды и выбранного интервала времени существования объекта;

б) имеет уникальное имя, семантическую интерпретацию и идентифицируется в значениях параметров этих процессов, знание которых и оказываемых на объект управляющих воздействий в выбранный момент времени является необходимым и достаточным условием для прогнозирования будущих значений этих параметров через определенные в модели интервалы времени с точностью, позволяющей однозначно идентифицировать соответствующие им имена этого атрибута.

Постановка задачи оценки функционального состояния как задачи идентификации

Постановка задачи в общем виде будет следующей.

1. Система, относящаяся к классу динамических систем: $\dot{g} = f_g(g, t, F, u)$, где g – вектор состояния динамической системы $g^T = [g_1 \ g_2 \ \dots \ g_n]$, g_i – параметры вектора состояния; u – вектор внешних воздействий динамической системы $u^T = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_n]$; F – множество функциональных состояний динамической системы $F_i \in F$, $F_i = f(t, \Pi, \nu)$, где Π – правило принятия решения об изменении функциональных состояний, которое выглядит следующим образом:

если $g \in G_1$, то $F \rightarrow F_1$,
 если $g \in G_2$, то $F \rightarrow F_2$,
 \vdots \vdots \vdots
 если $g \in G_n$, то $F \rightarrow F_n$

при следующих ограничениях:

при $g \in G_1$ $T \geq T_1$
 при $g \in G_2$ $T \geq T_2$
 \vdots \vdots
 при $g \in G_n$ $T \geq T_n$

2. Модель наблюдений: $y = H \cdot g + \xi(t)$, где y – вектор наблюдения; H – матрица связи наблюдаемых параметров и вектора состояния системы; $\xi(t)$ – внешнее воздействие.

3. Модель измерений с аддитивной помехой: $z = y + n(t)$.

По результатам измерений $z(t)$, $t \in \Omega$, определить функциональное состояние системы $F_i = f(t, \Pi, \nu)$ на интервале времени $t \in [t_k \dots t_n]$ при максимуме вероятности правильного принятия решения о функциональном состоянии системы: $P_{\text{прФС}} \rightarrow \max$.

Особенностью и новизной данной постановки является наличие зависимости изменений функциональных состояний от соответствующих правил принятия решений.

Постановка задачи оценки функционального состояния как задачи распознавания образов. Выбор признаков

Для решения данной задачи необходимо решить задачу классификации.

1. Известна модель функционирования объекта испытаний $G(t) = \{g_k(t)\}$, $k = 1, \dots, q$, где $g_k(t)$ – внутренние параметры состояния объекта.

2. На основе априорного анализа задано множество классов функционального состояния объекта испытаний: $F = \{F_l\}$, $l = 1, \dots, r$.

3. Известно множество признаков $\Pi = \{\pi_j\}$, $j = 1, \dots, m$, обеспечивающих наблюдаемость функциональных состояний при выбранном методе. При этом признаки являются функциями от внутренних параметров состояния объекта испытаний $\pi_j = z[g_k(t)]$.

4. Задано отношение $H : F \rightarrow \Pi$ между множествами классов функциональных состояний F и признаков контроля в виде соответствующей матрицы.

5. Задано множество измеряемых параметров $\Lambda = \{\lambda_i\}$, $i = 1, \dots, n$, позволяющее определить значения признаков. Известно, что в общем случае наблюдаемые параметры являются нелинейными функциями от параметров состояния $\lambda(t) = h[g(t)] + \Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ – погрешность измерений, и признаков контроля $\lambda_j = s(\pi)$.

6. Измерительная система представлена в виде операторов измерений $L: \{g_k(t)\} \rightarrow \lambda(t)$, операторов первичной $L_1: \lambda(t) \rightarrow \{\pi^*; t\}$ и вторичной $L_2: \{\pi^*; t\} \rightarrow \{F_l^*\}$ обработки измерений, где каждый из операторов задается на множестве методов $\{M\}$ и алгоритмов $\{A\}$ обработки и анализа информации.

7. Задан показатель эффективности решения задачи определения функционального состояния $P_{\text{прФС}} \rightarrow \max$.

Стоит отметить, что вероятность правильного принятия решения уменьшается при увеличении шумовой составляющей в измерительной информации. Для ее повышения целесообразно перейти к другому пространству признаков наблюдаемого состояния. В качестве новых признаков будем рассматривать модели соответствующих функциональных состояний и параметры этих моделей.

Численное моделирование

На примере гипотетической динамической системы, описывающей изменение заряда аккумуляторной батареи СА (рис. 1), покажем результат применения различных моделей функционального состояния в условиях высокого уровня помех (отношение сигнал/шум 20 дБ).

На рисунке 2 представлена часть информации, показывающей переход из одного функционального состояния в другое в условиях шума.

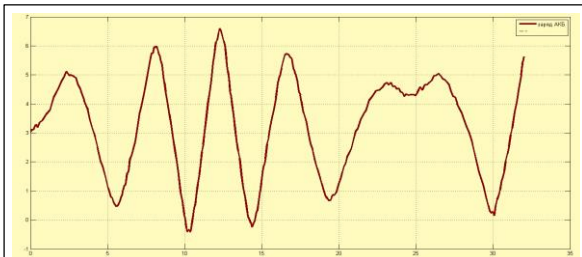


Рис. 1. Изменение заряда аккумуляторной батареи СА

Fig. 1. Changing CA battery charge

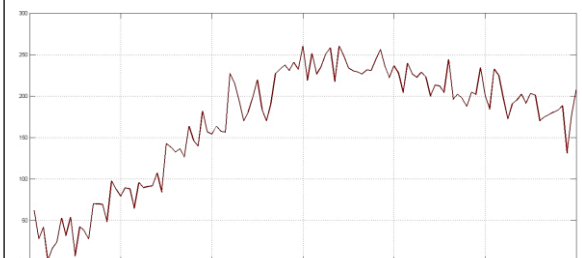


Рис. 2. Измерительная информация

Fig. 2. Measurement data

Интуитивно можно сделать вывод, что при высоком уровне шума более «грубая» модель точнее опишет процесс. Применяя модель более низкого порядка, например полином первой степени, отслеживаем изменение параметров этого полинома и, как только эти параметры изменились, можем сделать вывод о смене функционального состояния. Так как наиболее распространенным методом оценивания параметров, служащим базовым подходом к параметрической идентификации, является метод наименьших квадратов, который в предположении линейности и дискретности во времени объекта приводит к наиболее простым и универсальным решениям, воспользуемся им. Задача состоит в следующем: по имеющимся выборочным данным наблюдений за входным и выходным сигналами с интервалом дискретизации Δt требуется оценить значения параметров, обеспечивающих минимум величины функционала невязки между модельными и фактическими данными.

Таким образом, структура модели имеет вид $y = a_1x + a_2$ при заданных коэффициентах $a_1 = 4$, $a_2 = 5$.

Критерий минимума среднеквадратичной ошибки в этом случае определяется функционалом

$$\min_{a_i} J(a_i) = \min_{a_1, a_2, a_3} \sum_{j=1}^N [y_j - (a_2 + a_1x_j)]^2.$$

Система уравнений для нахождения коэффициентов a_i принимает вид

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a_2} = -2 \sum_{j=1}^N (y_j - a_2 - a_1x_j) = 0, \\ \frac{\partial J}{\partial a_1} = -2 \sum_{j=1}^N (y_j - a_2 - a_1x_j)x_j = 0. \end{cases}$$

Преобразуя данное соотношение, получим следующую систему в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{j=1}^N x_j \\ \sum_{j=1}^N x_j & \sum_{j=1}^N x_j^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N y_j \\ \sum_{j=1}^N y_j x_j \end{bmatrix}.$$

Для удобства примем следующие обозначения:

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{j=1}^N x_j \\ \sum_{j=1}^N x_j & \sum_{j=1}^N x_j^2 \end{bmatrix} = X, \quad \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N y_j \\ \sum_{j=1}^N y_j x_j \end{bmatrix} = Y.$$

Таким образом, решением системы являются искомые выражения для коэффициентов уравнения

$$a_i: \begin{bmatrix} a_2 \\ a_1 \end{bmatrix} = X^{-1}Y.$$

Результаты представлены на рисунке 3.

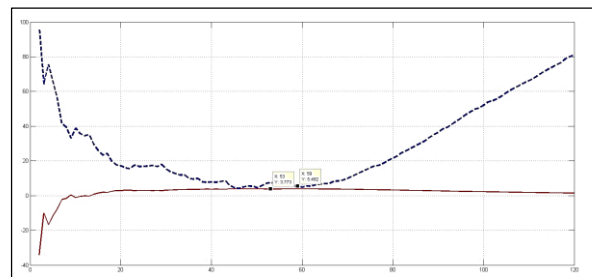


Рис. 3. Идентификация параметров линейной модели

Fig. 3. Identification of linear model parameters

Заключение

Результаты эксперимента показывают, что в условиях шума в измерительной информации примерно на 60-й секунде происходит изменение параметров модели в виде полинома первой степени, что говорит о смене функционального состояния системы. Стоит отметить, что в зависимости от динамики процесса, уровня шумовых воздействий и режимов функционирования применяемые модели будут различными.

Таким образом, другие, более грубые модели, а также их параметры можно использовать в качестве признаков наблюдаемого состояния системы в

условиях различного качества измерительной информации, а следовательно, получить достоверную оценку функционального состояния системы.

Литература

1. Кириллов Н.П. Функциональное состояние технического объекта. Дефиниция понятия // Авиакосмическое приборостроение. 2010. № 10. С. 31–40.
2. Васильев В.В. Математические методы анализа летательных аппаратов как объектов управления и испытания. М.: Изд-во МО РФ, 1992.
3. Дилигенская А.Н. Идентификация объектов управления. Самара: Изд-во СГТУ, 2009. 136 с.
4. Русаков К.Д. К оценке функционального состояния объектов РКТ в условиях различного качества измерительной информации // Нейрокомпьютеры и их применение: тез. докл. XIV Всерос. науч. конф. М.: Изд-во МГППУ, 2016. С. 89.
5. Русаков К.Д., Хиль С.Ш. О задаче выбора признаков наблюдаемого состояния сложного динамического объекта в условиях различного качества измерительной информации // Нейрокомпьютеры и их применение: тез. докл. XV Всерос. науч. конф. М.: Изд-во МГППУ, 2017. С. 246–248.
6. Рожнов А.В., Кривоножко В.Е., Лычев А.В. Построение гибридных интеллектуальных информационных сред и компо-

нентов экспертных систем на основе обобщенной модели анализа среды функционирования // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2013. № 6. С. 3–12.

7. Кириллов Н.П. Структурно-функциональная модель причинно-следственных закономерностей управляемого поведения технических систем // Тр. СПИИРАН. СПб: Наука, 2008. Вып. 5. С. 285–299.

8. Васильев В.В., Галаев С.А., Лесниченко Р.И., Мезенцев А.В., Потюпкин А.Ю., Рудаев С.А. Методологические основы испытаний сложных технических систем. М.: Изд-во ВА ВВСН им. Петра Великого, 2013. 286 с.

9. Потюпкин А.Ю., Чечкин А.В. Интеллектуализация сложных технических систем: монография. М.: Изд-во МО РФ, 2013. 289 с.

10. Дмитриев А.К., Мальцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 192 с.

11. Рожнов А.В. Творческие материалы «круглого стола». Часть II. Системная интеграция и моделирование новых эффектов в сфере интеллекта // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2016. № 3. С. 3–12.

12. Лобанов И.А. Регенеративный анализ в задаче формирования адаптивного информационно-управляющего пространства // Нейрокомпьютеры и их применение: тез. докл. XIV Всерос. науч. конф. М.: Изд-во МГППУ, 2016. С. 26–28.

Software & Systems

DOI: 10.15827/0236-235X.119.373-377

Received 13.04.17

2017, vol. 30, no. 3, pp. 373–377

IDENTIFICATION OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM FUNCTIONAL STATE UNDER CONDITIONS OF MEASUREMENT DATA AMBIGUITY

A.A. Genov¹, *Dr.Sc. (Engineering), Professor, Leading Researcher, kt-mati@mail.ru*

K.D. Rusakov², *Junior Researcher, rusakov.msk@yandex.ru*

S.Sh. Hill³, *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, skhill@mail.ru*

¹ *Center of Visualization and Satellite Information Technologies SRISA, Nakhimovskiy Ave. 36/1, Moscow, 117218, Russian Federation*

² *V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Profsoyuznaya St. 65, 117997, Russian Federation*

³ *Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe Highway, 4, Moscow, 125993, Russian Federation*

Abstract. The article considers a topical problem of identification of a complex technical system functional state in conditions of increased noisiness using a transition to another attribute space of the observed state. The authors define the term “functional state”.

The paper shows the problem of estimating a functional state as a dual problem of identification and pattern recognition. It pays attention to a possible selection of parameters of mathematical models and their structures as new signs of the observed state. As an example, in order to solve the parametric identification problem, the authors have selected the method of least squares. It shows the changing of the functional state.

The process of analyzing measuring information plays an important role in the tasks of monitoring and testing by complex technical systems. Only after passing through all stages of processing, it is possible to decide on the condition of the test object. However, it is difficult to do in case of poor quality information. Elimination of this problem is mainly comes to searching solutions in order to form and improve relevant rules for management decision-making. At the same time, in normal conditions and situations, creation of such rules in many cases does not cause any special problems. Nevertheless, in abnormal conditions it is problematic. The state analysis of complex technical objects or their subsystems according to the measurement results assumes the solution of structural and parametric identification problems.

Management of complex technical objects and their testing is characterized by uncertainty of external influence, anomalous and accidental measurement errors. To ensure the required quality of their subsystems state analysis, it is necessary to form the principles of identification process adaptive control, the methods of an optimal choice of a model structure based on the quality of measurement data. This is particularly topical for automation of secondary processing at terminal control facilities.

Keywords: state identification, functional state, complex technical system, increased noisiness, pattern recognition, parametric identification, least squares method.

References

1. Kirillov N.P. Functional condition of technical object concept definition. *Aviakosmicheskoe priborostroenie* [Aerospace Instrument-Making]. 2010, no. 10, pp. 31–40 (in Russ.).
2. Vasilev V.V. *Matematicheskie metody analiza letatelnykh apparatov kak obektov upravleniya i ispytaniya* [Mathematical Methods for Analysis of Aircrafts as Controlled and Test Objects]. Moscow, MO RF Publ., 1992.
3. Diligenskaya A.N. *Identifikatsiya obektov upravleniya* [Identification of Controlled Objects]. SSTU Publ., 2009.
4. Rusakov K.D. To the evaluation of the functional state of rocket and space equipment objects under conditions of different quality of measuring information. *XIV Vseros. nauch. konf. "Neyrokompyutery i ikh primeneniye"* [Proc. 14th All-Russian Science Conf. "Neurocomputers and Their Application"]. Moscow, MSUPE Publ., 2016, p. 89 (in Russ.).
5. Rusakov K.D., Khil S.Sh. On the problem of selecting the characteristics of the observed state of a complex dynamic object under conditions of different quality of the measurement information. *XV Vseros. nauch. konf. "Neyrokompyutery i ikh primeneniye"* [Proc. 15th All-Russian Science Conf. "Neurocomputers and Their Application"]. Moscow, MSUPE Publ., 2017, pp. 246–248 (in Russ.).
6. Rozhnov A.V., Krivonozhko V.E., Lychev A.V. Construction a hybrid intelligent information framework and components of expert systems using the generalized data envelopment analysis model. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* [Jour. Neurocomputers]. 2013, no. 6, pp. 3–12 (in Russ.).
7. Kirillov N.P. The skeleton-functional model of the cause-effect regularities of the managed behavior of technical systems. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proc.]. 2008, St. Petersburg, Nauka Publ., iss. 5, pp. 285–299 (in Russ.).
8. Vasilev V.V., Galaev S.A., Lesnichenko R.I., Mezentsev A.V., Potyupkin A.Yu., Rudaev S.A. *Metodologicheskie osnovy ispytaniy slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Methodological Basis for Testing Complex Technical Systems]. Moscow, Peter the Great Strategic Rocket Forces Academy Publ., 2013, 286 p.
9. Potyupkin A.Yu., Chechkin A.V. *Intellektualizatsiya slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Intellectualization of Complex Technical Systems]. Monograph, MO RF Publ., Moscow, 2013, 289 p.
10. Dmitriev A.K., Maltsev P.A. *Osnovy teorii postroyeniya i kontrolya slozhnykh sistem* [Fundamentals of the Theory of Construction and Control of Complex Systems]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1988, 192 p.
11. Rozhnov A.V. Round-table discussion. P. II. System integration and artificial intelligence new effects simulation. *Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye* [Jour. Neurocomputers]. 2016, no. 3, pp. 3–12 (in Russ.).
12. Lobanov I.A. Regenerative analysis in the task of forming an adaptive information-control space. *XIV Vseros. nauch. konf. "Neyrokompyutery i ikh primeneniye"* [Proc. 14th All-Russian Science Conf. "Neurocomputers and Their Application"]. Moscow, MSUPE Publ., 2016, pp. 26–28 (in Russ.).

Примеры библиографического описания статьи

1. Генев А.А., Русаков К.Д., Хиль С.Ш. Идентификация состояния сложной технической системы в условиях неопределенности измерительной информации // Программные продукты и системы. 2017. Т. 30. № 3. С. 373–377. DOI: 10.15827/0236-235X.119.373-377.
2. Genov A.A., Rusakov K.D., Hill S.Sh. Identification of a complex technical system functional state under conditions of measurement data ambiguity. *Programmnye produkty i sistemy* [Software & Systems]. 2017, vol. 30, no. 3, pp. 373–377 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.119.373-377.