

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.7; 681.5.01; 691

И. А. Гарькина, А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков

СИСТЕМНЫЕ МЕТОДОЛОГИИ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ: ПРОМЫШЛЕННЫЕ И АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ*

Аннотация. Рассматриваются промышленные и аэрокосмические приложения системных методологий, теорий идентификации систем и управления, исходя из единой концепции проектирования сложных технических систем: авиакосмические тренажеры для подготовки операторов, разработка и управление качеством материалов специального назначения, анализ экологической опасности от деятельности объектов по хранению и уничтожению химического оружия.

Ключевые слова: идентификация систем, теория управления.

Abstract. From the point of view of joint concept of complex technical systems' design (creation of flight simulators for training of personnel, development and quality management of special-purpose materials, analysis of environmental consequences caused by stores of chemical weapons) the industrial and aerospace applications of system methodology, system identification theory and control theory are considered.

Keywords: system identification, control theory.

Введение

В рамках создания «единой геометрической теории управления» и «теории структур управления» А. Г. Бутковский сформулировал два общих принципа в рамках их общефилософского и методологического осмысления [1, 2]:

- «принцип (закон) 100 % эффективности математики»
- «управленческую парадигму Мира».

Под идентификацией в широком смысле предлагается понимать выработку точного языка описания реальности и соответствующих *понятий* и *категорий*, т.е. понятий крайне высокого, насколько это возможно, уровня. Сложность понятий – цена за простоту языка описания реальности, ее «законов». Наблюдаемая реальность («Мир») рассматривается как одна большая система многосвязного регулирования.

В каждый конкретный исторический период могут быть недостаточными ресурсы для получения с заданной точностью нужного для решения практической проблемы описания реальности. Возникает необходимость использования присущих только человеку способностей в процессе управления. Бо-

* Выполнена при поддержке гранта Президента РФ (гос. рег. № 01200609111) и по заказу Минобразования и науки РФ (гос. рег. № 01200850940).

лее того, любая система или непосредственно (в явном виде) содержит человеческий фактор, или является элементом системы, которая содержит человеческий фактор подобным образом. Следовательно, *любая эффективная методология идентификации должна включать процесс человеческого выбора*, т.к. именно в результате выбора вырабатывается текущее управление процессом идентификации.

1 Описание и постановка задач

Нижеуказанный подход используется при решении задач идентификации в весьма *разных* областях приложений:

- разработка и управление качеством материалов специального назначения [3];
- разработка авиакосмических тренажеров для подготовки операторов [4];
- анализ экологической опасности, возникающей в связи с деятельностью объектов по хранению и уничтожению химического оружия [5,6].

Работы выполнены по заданиям министерств, Российской академии архитектуры и строительных наук, по Федеральной программе уничтожения химического оружия в соответствии с межведомственными программами сотрудничества и Международной конвенцией.

Во *всех* рассматриваемых задачах в *иерархической структуре критериев* эффективности системы на верхнем (*первом*) уровне находятся: полезность системы (выходные характеристики, важность, актуальность, перспективность, область применения – критерии *второго* уровня); качество функционирования (помехозащищенность, точность, надежность, чувствительность, качество управления); организация системы (совершенство структуры, сложность и т.д.); эволюционная эффективность (осуществимость, ресурсы, возможности модификаций и другие характеристики развития); экономическая эффективность.

Декомпозиция системы продолжается до тех пор, пока на нижнем уровне не будут получены элементы, принадлежащие разработанным типам, или сформулированы задачи создания необходимых элементов [7].

Зависимости между критериями выявлялись методами факторного анализа и математической статистики и др.; они представляют собой эмпирические закономерности или получаются на основе процедур оценки гипотез и взвешивания факторов.

Иерархические структуры системы с оценками ее элементов строились в соответствии с введенной иерархией критериев и выделенными комплексами решаемых частных задач (являются основой перспективного планирования всего комплекса разработок и отдельных систем).

При синтезе материалов специального назначения, связанном с выбором рецептуры, технологии и способов управления качеством, использовались различные способы оптимизации параметров системы, в том числе *векторная* оптимизация [3].

Неопределенность целей преодолевалась путем использования линейной свертки, введения некоторых контрольных показателей, построения множеств Парето и т.д.

При участии в процессе управления человека-оператора, как в случае авиационных тренажеров (АТ), задача осложнялась трудностями формализа-

ции деятельности оператора по управлению объектом, оценки переноса навыков управления с АТ на летательный аппарат (ЛА) и т.д.

2 Методы решения задач

При разработке **единой концепции проектирования сложных управляемых в пространстве технических систем** решается комплекс взаимосвязанных задач:

- формализуется понятие управляющих движений оператора;
- определяются параметры управляющих движений летчика как непрерывного, дискретного, импульсного процессов, потока заявок, временного ряда и др.;
- разрабатываются функционалы качества, позволяющие операторам дать объективную оценку пилотажных характеристик самолета;
- определяются связи между техническими параметрами объекта и функционалами качества;
- с точки зрения формирования у обучаемых требуемых навыков пилотирования разрабатывается методика и выбирается структура авиационных тренажеров;
- осуществляется синтез и настройка параметров различных видов АТ;
- даются методы выбора параметров вычислительного цикла с учетом влияния временного запаздывания в имитаторах, динамических характеристик ЛА и др.;
- разрабатываются методы решения аппроксимационных задач для подготовки баз данных и т.д.

В связи с быстрым ростом стоимости тренажеров, трудностями их перенастройки и модернизации использовалась основная концепция последнего десятилетия – *модульность конструкции и программно-математического обеспечения* [8].

На *первом уровне иерархии* находятся комплексные авиационные тренажеры (КТС), на *втором* – специализированные (штурманский, бортингенера и др.), представляющие конструктивно законченные изделия, состоящие из модулей (*третий уровень*). Предусматривается возможность любого объединения модулей, например в тренажер для отработки слепого полета (без имитации визуальной обстановки), в штурманский тренажер или тренажер бортингенера, в тренажер для оператора бортовых систем и т.д.

Синтез АТ осуществлялся из условий *адекватности* управляющих воздействий оператора при управлении летательным аппаратом и на АТ. При синтезе *имитатора динамики полета* ЛА с уравнением движения вида $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{f}(t)$, где \mathbf{x} , \mathbf{u} , $\mathbf{f}(t)$ – соответственно векторы фазовых координат, управляющих и возмущающих воздействий, использовался функционал следующего вида:

$$\Phi_0(S) = \frac{a}{\max_i |\alpha_i|} + b \max_i \left| \frac{\beta_i}{\alpha_i} \right| + c \max_i |\beta_i| + \frac{d}{\max_i |\beta_i|}.$$

Здесь $\lambda_i = \alpha_i + j\beta_i$ – собственные числа матрицы \mathbf{A} , a, b, c, d – весовые константы.

Области равных оценок качества строились по экспериментальным данным в виде

$$d_{k-1} \leq \Phi(S) < d_k,$$

где k – класс системы; $k = \overline{1, N}$; N – балльность шкалы ($N = 10$ для шкалы Купера–Харпера) [4].

Качество системы тем выше, чем меньше $\Phi(S)$.

Аналогичный подход использовался и при синтезе материалов специального назначения с регулируемой структурой и свойствами. Строилась обобщенная модель и осуществлялась параметрическая идентификация наиболее распространенных видов кинетических процессов. В большинстве случаев кинетический процесс $x(t)$ представлялся как решение некоторой задачи Коши:

$$\ddot{z} + 2n\dot{z} + \omega_0^2 z = 0, z = x - x_m, x(0) = x_0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0; n^2 - \omega_0^2 \geq 0,$$

где x_0, \dot{x}_0, x_m определяются видом исследуемого кинетического процесса.

В ряде случаев использовались модели четвертого порядка. Функционал качества принимался в виде

$$\Phi(S) = f\lambda_m + a \frac{1}{\lambda_m} + br + c \frac{1}{r},$$

$$\lambda_m = \min_i \{\lambda_i\}, r = \max_i \left\{ \frac{\lambda_i}{\lambda_m} \right\},$$

где $(-\lambda)_i$ – корни характеристического полинома, $\lambda_i > 0, i = \overline{1, k}$; f, a, b, c – весовые константы.

При решении задач обеспечения безопасности объектов хранения и уничтожения химического оружия (ОУХО) риск от тяжелых аварий на ОУХО анализировался с точки зрения медико-биологических, экономико-экологических и глобально-социальных факторов с использованием понятия «приемлемый риск». Риск от тяжелых аварий определялся в виде

$$R(P, C) = \sum_{i=1}^k P_i C_i,$$

где $A = (A_1, A_2, \dots, A_k)$ – перечень событий, соответствующих тяжелым авариям; $P = (P_1, P_2, \dots, P_k)$ и $C = (C_1, C_2, \dots, C_k)$ – соответственно вероятности и последствия указанных аварий; $R(P, C)$ должно стремиться к минимуму; естественно $R_{\min}(P, C) = R_0 \neq 0$ (R_0 – допустимый или приемлемый риск; $R > R_0$ определяет класс недопустимого риска).

Выбор приемлемого риска производился для общего случая, когда функции $P = P(q_1, q_2, \dots, q_n, t)$, $C = C(c_1, c_2, \dots, c_m, t)$ являлись неизвестными.

При составлении математической модели ОУХО, выборе и обосновании типа случайного процесса, адекватно описывающего его состояние, использовались марковские цепи, диффузионные процессы, ветвящиеся процессы, случайные процессы со стационарными приращениями и т.д. Для марковских процессов, задавая переходные вероятности с использованием уравнений Колмогорова–Смолуховского–Чепмена, получали нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных относительно плотности распределения вероятностей для непрерывных случайных процессов или распределение для дискретных случайных величин. Последствие аварий $C = C(c_1, c_2, \dots, c_m, t)$ отображает физико-химические изменения в окружающей среде и, как правило, находится из решений уравнений математической физики. На основе описания объекта и экологических последствий аварий получается операторное нелинейное уравнение

$$L(C, P) = R,$$

совпадающее по форме с уравнением теории упругости (R – внешняя нагрузка).

В рассматриваемом случае оно представимо в виде двух операторных уравнений:

$$L_1(R, P, C) = P,$$

$$L_2(R, P, C) = C.$$

С введением вектор-функции $X = (P, C)^T$ и нелинейного оператора A первое из них представится в виде операторного уравнения

$$A(R, X) = X.$$

Так как физико-химические изменения в окружающей среде должны соответствовать экологическим нормам, а вероятность возникновения аварий должна быть близка к нулю, то последнее уравнение имеет решение $X = 0$ при всех значениях риска R . При некоторых значениях R может иметь ненулевые решения, соответствующие скачкообразным изменениям (катастрофам) в экологической обстановке окружающей среды и изменению значений вероятностей аварий. Риск $R_{кр}$ назовем **критическим**, если при некоторых значениях R , близких к $R_{кр}$, это уравнение имеет малые ненулевые решения ($R_{кр}$ – точка бифуркации оператора $A(R, X)$). Таким образом, анализ безопасности ОУХО сводится к чисто математической задаче определения точек бифуркации $A(R, X)$, например, на основе линеаризации нелинейного оператора (отыскание точек бифуркации сводится к определению характеристических значений соответствующего линейного оператора). Каждое нечетнократное (в частности, простое характеристическое значение линейного оператора) является точкой бифуркации нелинейного оператора $A(R, X)$. Если характеристическое значение линейного оператора имеет четную кратность, то требуется дополнительный анализ, который сводится к конструированию так называемого поля вращения и доказательству его невырожденности.

Определение точек бифуркации нелинейного оператора значительно сложнее. Упрощения возможны, если известны функция последствий аварий или вероятность распределения. Функция последствий аварий определяется в результате расчета экологического состояния среды при заданном количе-

стве разлитого отравляющего вещества (ОВ) и необходимого времени ликвидации последствий аварий. При известном распределении вероятностей (или плотности распределения), построив случайный процесс, можно определить вероятности изменения состояния ОУХО во времени. Далее определяется значение критического риска $R_{кр}$ и значение критического риска, для которого вероятность скачкообразного изменения экологической обстановки (экологическая катастрофа) наибольшая. Система «объект–экология» является упругой. При этом наибольшая вероятность потери ее устойчивости (катастрофа) наступает при $R_{кр}$.

В качестве иллюстрации приведем составление математической модели аварий на основе марковских процессов. Анализ процессов осуществляется с использованием производящих функций $F(t, x) = Mx^{\mu(t)}$, где M – математическое ожидание.

Предполагается, что произошла тяжелая авария с разрушением помещения и авиабомб; $\mu(t)$ – число авиабомб, находящихся в зоне аварии в неразрушенном состоянии, $\mu(0) = m_0$, $\mu\Delta t + O(\Delta t)$ – вероятность перехода $m \rightarrow (m-1)$, $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{O(\Delta t)}{\Delta t} = 0$ (за время Δt с вероятностью $\mu\Delta t + O(\Delta t)$ разрушается одна авиабомба и происходит разлив отравляющего вещества).

Справедливо соотношение

$$\frac{\partial F(t, x)}{\partial t} = \mu(1-x) \frac{\partial F(t, x)}{\partial x}.$$

Решение этого уравнения:

$$F(t, x) = \psi \left(t - \frac{1}{\mu} \ln(1-x) \right),$$

где ψ – функция, определяемая из начального условия

$$F(0, t) = \psi \left(\ln(1-x) \frac{1}{\mu} \right) = x^{\mu(0)} = x^{m_0}.$$

$$\text{Отсюда } F(t, x) = (1 - e^{-\mu t} (1-x))^{m_0}.$$

Дифференцируя $F(t, x)$ m раз по x и используя производящую функцию, найдем

$$P \left(\mu(t) = m \left(\mu(0) = m_0 = \frac{1}{m!} F_x^{(m)}(t, 0) \right) \right).$$

Вероятность того, что в момент t число неразрушенных авиабомб равно m при $\mu(0 = m_0)$, имеет следующий вид:

$$P(m, t) = \frac{m_0!}{m! (m_0 - m)!} (1 - e^{-\mu t})^{m_0 - m} e^{-\mu m t}.$$

Введя $m_k = m_0 - m$ (число разрушенных авиабомб в момент t), найдем

$$P(m_k, t) = \frac{m_0!}{m_k! (m_0 - m_k)!} (1 - e^{-\mu t})^{m_k} e^{-\mu(m_0 - m_k)t},$$

что вероятностно и описывает процесс тяжелой аварии на ОУХО. Наиболее вероятное количество разрушенных в результате аварии авиабомб определится из условий экстремума:

$$m_{k \max} \approx \frac{3}{4} m_0, (\mu t)_{\max} = \ln 4.$$

Заключение

1. *Правильность и перспективность использования приведенных методологических принципов синтеза технических систем подтвердились:*

– разработанные с использованием предлагаемой методики авиационные тренажеры согласно результатам независимой экспертизы обладают требуемыми эксплуатационными, техническими и экономическими характеристиками;

– сверхтяжелые бетоны для защиты от радиации являются конкурентоспособными на международном рынке защитных материалов (удостоены медалей РААСН (Москва, 2003) и VII Международного салона инноваций и инвестиций (Москва, ВВЦ, 2007), дипломов международных выставок в Лейпциге, Лондоне, Астане, Н. Новгороде).

2. Результаты исследований по *обеспечению безопасности объектов хранения и уничтожения химического оружия* прошли государственную экспертизу и положены в основу проектирования ОУХО.

Список литературы

1. **Бутковский, А. Г.** К философии и методологии проблем управления / А. Г. Бутковский // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'03 : пленарные доклады II Международной конференции (г. Москва, 29–31 января 2003 г., ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова). – М., 2003.
2. **Прангишвили, И. В.** SICPRO'03 – предварительный обзор / И. В. Прангишвили, В. А. Лотоцкий, К. С. Гинсберг, В. В. Смолянинов // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'04 : пленарные доклады III Международной конференции (г. Москва, 28–30 января 2004 г., ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова). – М., 2004. – С. 109–129.
3. **Прошин, А. П.** Разработка и управление качеством строительных материалов с регулируемой структурой и свойствами для защиты от радиации / А. П. Прошин, А. М. Данилов, Е. В. Королев и др. // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'03 : пленарные доклады II Международной конференции (г. Москва, 29–31 января 2003 г., ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова). – М., 2003. – С. 2437–2460.
4. **Данилов, А. М.** Методологические принципы проектирования сложных управляемых в пространстве динамических систем в приложении к разработке авиационных тренажеров / А. М. Данилов, А. Н. Анисимов и др. // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'04 : пленарные доклады III Международной конференции (г. Москва, 28–30 января 2004 г., ИПУ РАН им. В. А. Трапезникова). – М., 2004. – С. 279–311.

5. **Еремкин, А. И.** Анализ экологической опасности от деятельности объекта по уничтожению химического оружия / А. И. Еремкин, А. П. Прошин, А. М. Данилов, И. А. Гарькина // Вестник Волжского регионального отделения РААСН. – Вып. 5. – Нижний Новгород, 2002. – С. 31–34.
6. **Гарькина, И. А.** Теория катастроф в решении задач безопасности объектов хранения и уничтожения химического оружия / И. А. Гарькина, О. А. Голованов, А. М. Данилов и др. // Вестник Волжского регионального отделения российской академии архитектуры и строительных наук. – Вып. 4. – Нижний Новгород, 2000. – С. 110–115.
7. **Danilov, A.** Methodological principles of the development and quality control of special-purpose building materials / A. Danilov, E. Korolev, A. Proshin, O. Figovsky, I. Gar'kina, A. Bormotov // Scientific Israel –Technological Advantages. – 2002. – № 3 «Civil Engineering». – V. 4. – P. 36–42.
8. Авиационные тренажеры модульной архитектуры / Э. В. Лапшин, А. М. Данилов, И. А. Гарькина и др. ; под ред. Э. В. Лапшина, А. М. Данилова. – Пенза : Информационно-издательский центр ПензГУ, 2005. – 146 с.

Гарькина Ирина Александровна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра высшей математики,
Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства

Garkina Irina Aleksandrovna

a Cand.Tech.Sci., the senior lecturer,
chair higher mathematics,
the Penza state university
of architecture and building

Данилов Александр Максимович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
высшей математики,
Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства

Danilov Alexander Maksimovich

a Dr.Sci.Tech., the professor,
managing chair
of higher mathematics,
the Penza state university
of architecture and building

Лапшин Эдуард Владимирович

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

Lapshin Edward Vladimirovich

a Dr.Sci.Tech., the professor,
chair of designing and radio
equipment manufacture,
the Penza state university

E-mail: edlapshin@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет

Yurkov Nikolay Kondratevich

a Dr.Sci.Tech., the professor,
managing chair of designing
and manufacture of radio equipment,
the Penza state university

E-mail: yurkov_nk@mail.ru

УДК 519.7; 681.5.01; 691

Гарькина, И. А.

Системные методологии, идентификация систем и теория управления: промышленные и аэрокосмические приложения / И. А. Гарькина, А. М. Данилов, Э. В. Лапшин, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1 (9). – С. 3–11.