

К. т. н. М. Д. СКУБИЛИН, д. ф.-м. н. В. К. СТЕФАНЕНКО,
д. т. н. В. И. ФИНАЕВ

Россия, г. Таганрог, ТТИ ЮФУ
E-mail: scubilin@hotmail.ru.

Дата поступления в редакцию
19.08 2009 г.

Оппонент к. т. н. В. А. БОЛТЕНКОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Анализируется возможность электронной оценки состояния автоматических и автоматизированных систем управления.

Для эффективной работы технической системы управления с человеком-оператором в контуре управления (эргатической системы) необходимо обеспечить должное состояние как ее технической, так и биологической составляющих. Своевременное обнаружение зарождающихся переходов системы из штатного состояния в нештатное — один из путей предупреждения и/или минимизации последствий нарушения штатного состояния системы управления.

Состояние (в смысле способности достижения цели управления) систем управления (СУ), как и их обобщенные характеристики, в общем случае определяется значениями n различных параметров, представляемых функциями одного или нескольких аргументов. К числу таких аргументов в зависимости от типа рассматриваемой СУ относят количество элементов, узлов или сборочных единиц.

При решении любой конкретной задачи учитываемые параметры СУ всегда образуют конечное множество параметров P_i ($i=1, 2, \dots, n$), причем индексация параметров не ставится в зависимость от степени их важности. Характер учета отдельных параметров и их групп в процессе решения задачи, как правило, различен. Поэтому множество P обычно разбивают на ряд подмножеств P^1, P^2, \dots, P^d в соответствии с используемыми признаками $d \leq n$, если n — количество учитываемых параметров. Разбиение производится по правилам:

$$P^\eta \cap P^\xi = 0, \quad f_i(x_1, x_2, \dots, x_k), \\ \eta \in \{1, 2, \dots, d\}, \quad \xi \in \{1, 2, \dots, d\};$$

$$\bigcup P^\eta = P, \quad P^\eta \neq 0. \quad (1)$$

В отдельных случаях решения практических задач допустимо при соблюдении условий (1) трансформировать их к виду

$$P^\eta \cap P^\xi \neq 0.$$

Комплексный учет всех необходимых параметров при оценке состояния СУ практически перекрывает частные оценки, когда на базе одного или нескольких параметров строятся некоторые критерии рабо-

тоспособности. Такие частные оценки могут использоваться лишь при синтезе относительно несложных СУ и только в случаях, когда на значения их параметров не накладываются жесткие ограничения [1].

Когда все параметры P_i определяются значениями всех аргументов x_i ($i=1, 2, \dots, k$), при оценке состояния СУ рассматривается система функций

$$P_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_k).$$

Аргументы x_i могут быть как дискретными, так и непрерывными, что определяется их физической сущностью, а также условиями функционирования СУ. Для СУ аргументы часто являются дискретными, что определяет и дискретность функций f_i ($i=1, 2, \dots, n$). Так, например, если f_1 представляет вес узла СУ как ее параметр и зависит от принятой разрядности x_1 и типа используемых для синтеза элементов x_2 , тогда f_1 определена только на допустимых наборах аргументов x_1 и x_2 и является сугубо дискретной функцией.

Реальные СУ проектируются с учетом различных требований, накладываемых на значения параметров. В общем случае эти ограничения являются двухсторонними, поэтому система функций P_i дополняется следующей системой неравенств:

$$A_i \leq f_i(x_1, x_2, \dots, x_k) \leq B_i, \quad (2)$$

где A_i и B_i ($i=1, 2, \dots, n$) — некоторые числа, определяющие соответственно нижний и верхний пределы допустимых значений i -го параметра.

Для различных параметров, используемых на практике, характер ограничений может не совпадать. Это учитывается при решении конкретных задач, в частности характер ограничений как один из признаков учитывается при разбиении множества параметров на подмножества в соответствии с (1).

Общий критерий состояния СУ формируется с учетом системы неравенств (2), которая выражает основные требования, предъявляемые к данной СУ. При этом используются допустимые значения параметров, удовлетворяющие условиям (2).

Структура СУ оптимальна в том случае, когда все ее параметры, учитываемые при синтезе, имеют оптимальные значения; в противном случае она относится к неоптимальным структурам. Таким образом,

$$S \in S_{\text{опт}}, \quad (3)$$

если $A_i \leq P_i \leq B_i$ для всех $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Соотношения (3) представляют собой признаки выявления оптимальной в принятом смысле структуры СУ. Эти признаки оказываются основными для формирования общего критерия состояния СУ и выявления условий существования оптимальной ее структуры.

Если все аргументы x_i берутся с тем или иным шагом дискретности, что отвечает реальным случаям постановки задачи выявления оптимальных структур, то множество возможных значений любого x_i конечно; множество N всех возможных наборов аргументов также конечно, а его мощность не превосходит некоторую величину H . Обозначим через $N^i \subset N$ множество наборов аргументов, на которых функция f_i , представляющая i -й параметр, принимает оптимальные значения. Тогда для любого i количество таких наборов практически всегда меньше величины H .

Структура СУ оптимальна, если существует хотя бы один набор аргументов, на котором все параметры, учитываемые при решении конкретной задачи и задаваемые функциями f_i , принимали бы оптимальные значения. С учетом введенных обозначений это условие существования оптимальной структуры записывается в виде

$$\bigcup_i N^i \neq \emptyset, i \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (4)$$

Таким образом, оптимальная структура СУ существует, если объединение всех пересечений множеств N^i , т. е. множеств наборов аргументов, на которых отдельные параметры принимают оптимальные значения, не является пустым множеством.

Условие (4) представляет собой и общий критерий работоспособности, т. к. позволяет разделить СУ или их структуры по степени пригодности в конкретных условиях. Кроме того, оно может служить критерием выявления оптимальных структур СУ — при синтезе и оптимизации его применение позволяет исключить из рассмотрения структуры, не отвечающие предъявляемым требованиям. Эффективность применения полученного критерия зависит от достоверности и полноты функциональных зависимостей для всех параметров. Большое значение имеет также конкретный реализуемый алгоритм, построенный на базе общего алгоритма выявления оптимальных структур, однако полученный общий критерий не обеспечивает непосредственного определения лучших из числа выявленных структур СУ.

Общий алгоритм выявления оптимальных структур, базирующийся на условии (4), строится для ограниченного числа учитываемых параметров, представляемых функциями нескольких аргументов (например, учитываются время реализации алгоритма, вес, габариты, энергоемкость, вероятность безотказной работы, рассчитываемые в зависимости от количества элементов, необходимых для синтеза различных структур СУ, и характеристик стандартных элементов, приемлемых для данных конкретных условий эксплуатации СУ). Он предусматривает: определение наборов аргументов N^i , на которых функции, представляющие параметры СУ, удовлетворяют условиям (2); кодирование множеств N^i для обеспече-

ния эффективного использования принимаемых методов решения задачи выявления оптимальных структур; выявление пересечений множества N^i , т. е. выявление оптимальных структур систем.

При реализации алгоритма необходимо находить значения функций на всех наборах аргументов и сравнивать их с их допустимыми величинами. Так, для вычисления одного значения функции f_i требуется выполнить G_i операций. Общее же количество операций, выполняемых при решении задачи с учетом односторонних ограничений, достигает значения

$$N_{\text{оп}} = H(n + \sum_{i=1}^n G_i), \quad (5)$$

тогда как при двухсторонних ограничениях для всех параметров оно оценивается по формуле

$$N_{\text{оп}} = H(2n + \sum_{i=1}^n G_i). \quad (6)$$

Решение задачи кодирования осуществляется путем присвоения наборам N^i условных номеров, формируемых из двух частей, одна из которых представляет собой признак функции, а другая — номер набора, на котором эта функция принимает оптимальное значение.

Выявление пересечений множеств N^i , т. е. реализация заключительной части алгоритма, сводится к сравнению кодов наборов, имеющих различные признаки.

Общий критерий состояния СУ не позволяет выявлять максимально приемлемые в конкретных условиях оптимальные структуры, поэтому приходится общие критерии дополнять частными, при формировании которых не обязателен учет всех возможных параметров СУ.

Использование частных критериев в качестве основных при оптимизации структур СУ допустимо в тех случаях, когда на значения отдельных параметров не накладываются жесткие ограничения, а указывается лишь направление желаемого их изменения. Кроме того, они могут использоваться для предварительной оценки состояния известных или возможных структур, а также при решении частных задач синтеза СУ. Примером частного критерия могут служить соотношения $P_i \leq P_{i\text{доп}}; P_{2\text{опт}} = P_{2\text{мин}}$, которые, в частности, отвечают случаю выявления структуры со временем реализации алгоритма, не большим допустимого, и с минимальным аппаратным составом [2].

К частным критериям во многих случаях решения практических задач относятся и функциональные критерии, которые при синтезе СУ используются как частные, позволяющие выявить лучшую из общептимальных структур, выявленных по общему критерию. Тогда система (6) трансформируется в

$$P_i \leq f_i^j(x), \quad (7)$$

где j — номер набора условий, изменяющихся одновременно для всех функций $f_i, j \in \{1, 2, \dots, r\}$;
 r — количество наборов условий.

Функциональные критерии в общем случае вводятся для определения данной структуры СУ. Она

считается подходящей или лучшей, если функционал Φ_0 (который может быть линейным или нелинейным)

$$\Phi_0 = \Phi(W_1 f_1; W_2 f_2; \dots; W_n f_n), \quad (8)$$

(W_i — некоторые коэффициенты) имеет экстремум или отличается от некоторого значения не более чем на установленную величину. При использовании нелинейных функционалов и незначительном числе учитываемых параметров в большей степени учитывается взаимосвязь параметров системы.

При проведении сравнительных оценок различных структур СУ нелинейные функциональные критерии строятся без учета коэффициентов W_i при сложной размерности, определяемой размерностью учитываемых параметров и видом принимаемых зависимостей.

Линейный функциональный критерий рассчитывается с учетом нормированных значений функций f_i^j , взятых с определенными весовыми коэффициентами w_i , по формуле

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^n w_i F_{i0}^{-1} f_i^j(x), \quad (9)$$

где F_{i0} — нормирующий делитель.

Параметры СУ могут представляться полиномами m -й степени от x , тогда и функциональный критерий (9) представляется полиномом, степень которого определяется максимальной степенью исходных полиномов, например степенью m . Использование линейного критерия при оценке состояния СУ, т. е. и при определении строго оптимальных структур, в этих случаях сводится к решению линейных алгебраических уравнений $(m-1)$ -го порядка вида

$$\sum_{q=0}^{m-1} (q+1)a_{q+1}x^q = 0. \quad (10)$$

Одним из основных вопросов, решаемых при формировании критерия (9), является вопрос об определении или назначении величин весовых коэффициентов w_i и нормируемых делителей F_{i0} .

Если величина F_{i0} назначается только для получения безразмерных функциональных критериев без должного учета ограничений (3), то имеет место система зависимостей

$$C_i \geq f_i^j(x)/F_{i0} \geq C'_i,$$

где C_i и C'_i — некоторые постоянные величины, причем

$$C_1 \neq C_2 \neq \dots \neq C_i \neq \dots \neq C_n \text{ и } C'_1 \neq C'_2 \neq \dots \neq C'_i \neq \dots \neq C'_n.$$

Поэтому при формировании критерия (10) отдельные параметры «взвешиваются» дважды. Устранение двойного «взвешивания» может быть обеспечено назначением таких w_i , которые дополнительно учитывают значения уже выбранных или назначенных величин F_{i0} , а так как это не всегда возможно, значения w_i и F_{i0} определяются без использования дополнительных функциональных связей.

Учет требования необходимости приведения нормируемых функций f_i^j к определенному уровню приводит к определению значений нормирующих дели-

телей F_{i0} . При проведении расчетов по (10) принимаются во внимание только те значения функций, которые удовлетворяют условиям (4). Поэтому для их нормирования и приведения к определенному уровню необходимо выполнение условий

$$A_i \leq F_{i0} \leq B_i \quad (11)$$

при пропорциональной связи между F_{i0} и $A_i(B_i)$, выражаемой через

$$F_{i0}:F_{20}:\dots:F_{n0}=0,5(A_1+B_1):0,5(A_2+B_2):\dots:0,5(A_n+B_n). \quad (12)$$

Если на параметры СУ накладываются односторонние ограничения, то принимается $A_i=0$ или $B_i=0$ при вычислениях по (12), а если на параметры накладываются двухсторонние ограничения, то значения F_{i0} определяются по (11) и (12).

Значения большинства параметров, характеризующих состояние (функциональную готовность) СУ, должны быть минимальными из всех возможных для оптимальных структур и при этом не должны отличаться от желаемых больше, чем на заданные величины, т. е.

$$(D_i - \Delta D_i) \leq f_i^j \leq (D_i + \Delta D_i), \quad (13)$$

где D_i — желаемое значение i -го параметра;

ΔD_i — допустимое отклонение значения i -го параметра от желаемого или заданного.

Для упрощения последующих действий целесообразно принять

$$F_{i0} = D_i \text{ и } \sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (14)$$

В реальных условиях функции f_i^j принимают оптимальные значения, равные D_i , при различных значениях аргумента x , но при условии, что относительные пределы изменения значений функционала не превосходят средние допустимые пределы составляющих его функций. Тогда

$$\Delta \Phi = n^{-1} \sum_{i=1}^n (\Delta D_i / D_i), \quad (15)$$

$$(1 - \Delta \Phi) \leq |\Phi_{\text{опт}}| \leq (1 + \Delta \Phi). \quad (16)$$

Совокупность условий и ограничений (13)—(16) обеспечивает решение общей задачи выявления оптимальных структур СУ. Соответствующий алгоритм предусматривает такую последовательность действий:

а) определяют величины $\Delta \Phi$, исходные для расчета на последующих этапах, согласно (16) с заданием шага Δx , определяющего частоту получения решений;

б) формируют функционал вида (10) с учетом соотношений (13);

в) рассчитывают значения функционала (10) с шагом Δx и выявляют функционалы, удовлетворяющие условию (15), с фиксацией значений аргумента x_i , отвечающих выделенным значениям Φ ;

г) для каждого Φ_0 , удовлетворяющего условию (16), рассчитывают значения всех составляющих его функций f_i^j ;

д) все найденные наборы f_i^j проверяют на соответствие условиям (15);

е) выявляют случаи удовлетворения условиям (14) и (16), т. е. выявляют оптимальные g -е структуры СУ по

$$S_g \in S_{\text{опт}}, \text{ если } (1 - \Delta\Phi) \leq |\Phi_{\text{опт}}| \leq (1 + \Delta\Phi), \\ (D_i - \Delta D_i) \leq f_i^j \leq (D_i + \Delta D_i) \quad (17)$$

для всех $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Все части алгоритма последовательно реализуются для различных наборов условий j .

Если по (16) оптимальные структуры не выявлены, то при последовательном увеличении значений $\Delta\Phi$ допустимо выявление квазиоптимальных структур различных градаций.

Все вышесказанное применимо для систем автоматического управления, например летательного аппарата с управлением автопилотом. Однако состояние автоматизированных систем управления, т. е. систем с человеком-оператором в контуре управления, в силу значительного объема информации о состоянии человека пока еще оценить аналитически невозможно. Раздельная оценка состояния технической составляющей эргатической системы управления и ее биологической части позволяет минимизировать временные и инструментальные затраты (например, пилот при управлении летательным аппаратом быстро оценивает состояние системы инструментально). Это позволяет принять меры и предупредить выход системы из штатного состояния [2, 3]. Первые, пока

что локальные, проверки текущего состояния пилота при управлении летательным аппаратом уже подтвердили целесообразность такой оценки [4, 5].

Таким образом, оценка текущего состояния (функциональной готовности) интегрированной системы «техническое оборудование — человек-оператор» позволяет оперативно принять адекватные меры по недопущению и/или минимизации последствий перехода системы в нештатное состояние.

Предлагаемый метод является достаточно универсальным и может быть рекомендован для нормализации ситуаций на транспорте, преимущественно в авиации.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шилейко А. В. Методика выбора оптимальной структуры цифровой модели // Автоматика и телемеханика.— 1961.— Т. XII.— № 1.— С. 16—18.
2. Пат. 23138276 России. Система сбора и регистрации полетной информации / М. Д. Скубилин.— 2007.— Бюл. № 36.
3. Пат. 2359609 России. Тонومتر / М. Д. Скубилин.— 2009.— Бюл. № 18.
4. Финаев В. И., Скубилин М. Д., Джавадов Н. Г. Программа оценки способности человека-оператора // Свидетельство RU 2009612572 о государственной регистрации программы для ЭВМ. 21.05 2009.
5. Скубилин М. Д., Спиридонов О. Б., Стефаненко В. К. Электронная техника, эргатические системы управления.— Таганрог: ЮФУ, 2009.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

Международный симпозиум

«НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО 2010»

24—31 мая 2010 г.
г. Пенза



Связь с Оргкомитетом

тел./факс +7(841-2) 56-43-46

тел. +7(841-2) 36-82-12

<http://www.nika-penza.ru>

E-mail: kipra@pnzgu.ru,

nika@nika-penza.ru

Основные направления работы симпозиума

- ✦ Информационные и коммуникационные технологии в образовании
- ✦ Основы экономической и правовой безопасности
- ✦ Информационные технологии в проектировании и производстве
- ✦ Физико-математические методы и модели обеспечения надежности и качества
- ✦ Безопасность жизнедеятельности и охрана труда
- ✦ Надежность и качество авиационной и космической техники
- ✦ Надежность и качество железнодорожной автоматики и телемеханики
- ✦ Информационные технологии испытаний и сертификации продукции и услуг
- ✦ Методологические проблемы обеспечения качества
- ✦ Научные основы системной безопасности
- ✦ Диагностика и контроль качества продукции
- ✦ Технологические проблемы повышения надежности и качества изделий
- ✦ Реновация средств и объектов материального производства
- ✦ Методы и средства измерений электрических и неэлектрических величин
- ✦ Автоматизированная обработка и анализ дефектоскопических и металлографических снимков
- ✦ Надежность биологических и экологических систем
- ✦ Проблемы информационной безопасности