

СТЕНИН А.А.,
СТЕНИН С.А.,
ТКАЧ М.М.,
ГУБСКИЙ А.Н.

СИНТЕЗ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ПРИ АНАЛИЗЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В настоящей статье предложен многоуровневый системный подход к формированию иерархической структуры критериев оценки при анализе деятельности операторов сложных систем. Практическая реализация такого метода показана на примере оценки деятельности операторов технологическим процессом подвижных объектов.

The subject of the article is a systematic approach to the multi-level hierarchical structure formation evaluation criteria in the analysis of the activities of the operators of complex systems. The practical implementation of this method is demonstrated by the example of the evaluation of process operators of moving objects.

1. Введение

Результаты многочисленных научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок неоспоримо свидетельствуют, что отличительной особенностью сложных систем, состоящих из многих подсистем, является осуществление взаимодействия иерархическим образом. Как известно, при рассмотрении подобных систем наиболее важную роль играют три основных аспекта[1]:

- принятый уровень абстракции (степень агрегированности модели системы);
- уровень сложности принятия решений;
- уровень приоритета в системе, состоящей из многих подсистем.

В настоящее время уже с полной определенностью можно утверждать, что ни одна из существующих теорий анализа сложных технических систем не может претендовать на то, что единственно она дает адекватное описание процесса ее функционирования. Скорее всего имеется целый спектр теорий, в той или иной мере трактующих проблемы анализа. Это прежде всего обусловлено сложностью и большой степенью неопределенности процесса взаимодействия отдельных подсистем, имеющегося множества аспектов, для исследования которых приходится привлекать знания из различных дисциплин.

Многоуровневый системный подход в теории анализа в первую очередь характеризуется представлением сложной системы в виде взаимосвязанных подсистем, обладающих правом принимать решения и образующих строгую

иерархию. Это в значительной мере позволяет решить следующие вопросы:

- установить особенности, характеризующие цели и задачи профессиональной деятельности операторов;
- найти способы отображения функций, выполняемых системой на ее иерархическую структуру;
- определить методы и математические средства, применяемые для оценки деятельности операторов сложных технических систем.

Среди всех тех непосредственных преимуществ, которые представляет применение теории многоуровневых систем к исследованию процесса оценки, можно указать, в первую очередь, следующие:

- создание единой основы для различных подходов посредством введения системы понятий и методов, что позволяет сравнить, противопоставить и взаимно дополнить различные теории;
- строго математическая формулировка как основных понятий, так и получаемых результатов;
- получение отправных точек для исследования различных аспектов и проблем анализа и проектирования эргатических систем с помощью математических методов и моделирования на ЭВМ.

Многоуровневый системный подход, базируясь на математических методах, прежде всего, связан с коммуникацией, управлением, координацией и так далее.

Координирование подразделяется на две части: установление операционных правил, предписывающих законы функционирования для подсистем и практическая реализация этих законов в рамках функционирования всей системы. Первая из них, по сути, соответствует выбору подходящих критериев для оценки эффективности деятельности отдельных подсистем, или в общем смысле, выбору способов координирования при достижении тех или иных формализованных целей.

Следует отметить, что для оценки деятельности оператора в значительной степени характерно качественное определение и слабая формализация таких целей функционирования, как степень эффективности процесса управления. Очевидно, что такое представление цели дает мало конструктивных рекомендаций, как для выработки стратегии ее достижения, так и для интерпретации полученных результатов.

Можно отметить следующие основные способы задания целей.

1. Цель может задаваться посредством перечня внешних требований, которым должен удовлетворять предполагаемый результат.
2. Цель может задаваться путем определения свойств и характеристик, которыми должен обладать предполагаемый результат. Свойства отличаются от требований тем, что относятся непосредственно к своему результату, в то время как требования выступают в качестве внешних условий, которым должны удовлетворять свойства.
3. Цель может быть задана в виде четко сформулированного по содержанию и по форме представления достигаемого результата.

Для многоуровневой системы характерна вполне определенная иерархия целей, формально описываемых соответствующими типами задач: глобальными и решаемыми подсистемами на том или ином уровне иерархии. Очевидно, что для успешной работы всей системы существенно, чтобы цели (задачи) ее подсистем были согласованы с глобальной целью. Совместимость целей формально вытекает из следующих положений:

- только нижестоящие решающие элементы многоуровневой системы являются подсистемами, находящимися в непосредственной связи со всем процессом;
- достижение глобальной цели может быть осуществлено только посредством нижестоящих решающих элементов;

- задачи, решаемые на каждом из таких уровней или расположенные на этом уровне решающие элементы, должны быть координируемы относительно решаемой глобальной задачи;
- вышестоящий решающий элемент, осуществляя координацию, воздействует на нижестоящие элементы, имея в виду свои собственные цели, то есть задачи, решаемые на уровне нижестоящих элементов, должны быть координируемы по отношению к задачам, решаемым вышестоящими элементами;
- глобальная задача, как правило, лежит вне сферы деятельности системы с той или иной иерархией, то есть ни один из решающих элементов внутри иерархии специально не обеспечен полномочиями решать глобальную задачу и тем самым преследовать общую (глобальную) цель, хотя, задача определена в терминах всего процесса.

Таким образом, для совместимости решаемых задач, а тем самым и целей внутри многоуровневой системы, координация задач, решаемых нижестоящими элементами, относительно задачи вышестоящего элемента должна быть соответствующим образом связана с подлежащей решению глобальной задачей.

При разработке системы оценки в качестве глобальной цели следует, очевидно, считать получение некоторого объективного критерия, оценивающего весь процесс деятельности оператора на некотором наборе тестовых режимов работы. Поскольку совокупность тестовых режимов работы, как правило, строится на базе параметрических моделей объекта управления, то формализация процесса оценки действий оператора, по сути дела, сводится к установлению отношений, связывающих параметры динамики объекта управления со значениями обобщенного критерия. При этом обобщенный критерий позволяет дать количественное определение цели оценки, заданной на качественном уровне и указать на эффективные способы их достижения. Если же существует однозначная связь между целью процесса оценки и средствами ее достижения, то критерий оценки может быть задан в виде соответствующего аналитического выражения. В этом случае критерий, оценивающий эффективность деятельности оператора позволяет определить совокупность действий, обеспечивающих достижение заданной цели управления. Эта ситуация может

иметь место исключительно для так называемых “простых” задач управления.

2. Постановка задачи

Естественно, что в сложных системах управления, где глобальная цель носит качественный характер, не представляется возможным определить ее в аналитической форме и единственной альтернативой является формирование многоуровневого критерия. Будучи характерным для системного подхода, критерий такого вида позволяет определить при оценке не только достижение цели управления на заданном наборе тестовых задач, но и контролировать входящие в него как частные режимы, так и отдельные переменные этих режимов.

Такое представление приводит к необходимости рассматривать векторный критерий эффективности обучения:

$$F(\bar{x}) = \bar{f}(\bar{x}) = \{f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_n(\bar{x})\}. \quad (1)$$

В этом случае каждый из частных критериев преследует достижение своей локальной цели. В результате, достижение реальной глобальной цели всегда будет каким-то компромиссом, каким-то сочетанием требуемых качеств, причем заранее неизвестных. В этом и заключается основная проблема многокритериальности (неопределенности целей).

Существует целый ряд способов преодоления неопределенности целей, которая в данном случае заключается в выборе дополнительных гипотез, обеспечивающих минимальное значение критериальных функций $f_1(\bar{x}), f_2(\bar{x}), \dots, f_n(\bar{x})$ одновременно.

Чаще всего они сводятся к тем или иным способам приведения многокритериальных задач к обычным задачам с одним критерием, поскольку для последних (особенно если целевая функция достаточно гладкая) существуют хорошо разработанные методы решения, либо к исключению из нормального анализа тех вариантов решения, которые заведомо будут плохи.

Второй подход в теории принятия решений называется “принцип Парето” и заключается в том, что в качестве решения следует выбирать только тот вектор \bar{x} , который принадлежит множеству Парето. Следует, однако, отметить, что принцип Парето не выделяет единственного решения, он только сужает множество альтернатив. Окончательным выбором все-таки остается за лицом, принимающим решение. Построен-

ное множество Парето лишь облегчает процедуру выбора решения.

В этом случае более приемлемым оказывается первый подход (линейная свертка), когда вместо n частных критериев f_i рассматривается лишь один обобщенный критерий вида:

$$F(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i f_i(\bar{x}), \quad (2)$$

где λ_i – некоторые положительные числа, тем или иным способом нормированные (например $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$).

Такой способ свертки вводит, по существу, отношение эквивалентности различных целевых функций $f_i(\bar{x})$, так как величины λ_i показывают, насколько изменяется целевая функция $F(\bar{x})$ при изменении критерия $f_i(\bar{x})$ на единицу:

$$\lambda_i = \frac{\partial F}{\partial f_i}. \quad (3)$$

Коэффициенты λ_i являются результатом экспертизы и отражают представление оперирующей стороны о содержании компромисса, который она вынуждена принять. Таким образом, содержание компромисса состоит в ранжировании целей, которые вместе с назначением весовых коэффициентов и является той дополнительной гипотезой, позволяющей свести задачу со многими критериями к задаче с единственным критерием.

Очевидно, что количественный результат, полученный согласно указанному выше способу, должен определенным образом отражать качественную сторону процесса оценки, то есть удовлетворять исходной глобальной цели. Это может быть достигнуто, в частности, введением шкалы эффективности, отражающей соответствие шкалы количественного результата принятой шкале балльной оценки действий. Рассмотрим синтез иерархической структуры на примере оценки деятельности операторов технологических процессов и объектов движения.

3. Решение задачи

Нижним уровнем иерархии будем считать критерии оценки качества управления объектом по переменным (параметрам) движения; средним уровнем – критерий оценки качества выполнения того или иного режима движения на основе ранее сформированных оценок по параметрам движения; верхним уровнем иерархии

будет- комплексный критерий, оценивающий действия оператора на заданной совокупности режимов.

Формирование значений частных и обобщенных критериев производится на основе сравнения эталонных (программных) параметров динамики технологических процессов или объектов движения с текущими, полученными в процессе отработки тех или иных тестовых режимов работы.

Пусть рассогласование между текущими и программными значениями по i -той переменной определяется как:

$$|\Delta \tilde{x}_i(t)| = |x_i(t) - x_i^*(t)|, \quad t = [0, T], \quad i = \overline{1, M}, \quad (4)$$

где $x_i^*(t)$ – эталонное изменение i -той переменной;

M – число переменных;

T – интервал управления.

При этом для i -той переменной должен быть задан допустимый диапазон отклонений $\Delta x_{i \max} = \text{const}$, в котором производится оценка качества управления подвижным объектом. Так как рассогласования $|\Delta \tilde{x}_i(t)|$ i -тых переменных имеют различную физическую природу, а, следовательно, и различный диапазон изменений, необходимо его пронормировать. Если принять:

$$|\Delta x_i(t)| = \frac{|\Delta \tilde{x}_i(t)|}{\Delta x_{i \max}}, \quad (5)$$

то все рассогласования будут лежать в нормированном диапазоне $[0, 1]$ и одинаково влиять на результат последующей суммарной оценки.

Таким образом, критерием контроля и оценки качества управления по i -тому параметру на некотором интервале управления T может служить критерий вида:

$$I_i = \frac{1}{T} \int_0^T |\Delta x_i(t)| dt. \quad (6)$$

Однако, непосредственное его использование может дать необъективную оценку качества управления, в частности, при наличии кратковременных существенных отклонений i -го параметра от его эталонного значения. Поэтому необходимо модифицировать данный критерий. Пусть считается, что в нормированном диапазоне $[0, 1]$ всегда могут быть условно выделены согласно рис. 2.1 три зоны, соответствующие оценкам “5”, “4”, “3” по принятой пятибалльной системе. В общем случае значения коэф-

фициентов δ_{1i} и δ_{2i} (рис. 1), определяющих эти зоны, определяются либо на основе экспертных оценок, либо в результате анализа тестовых реализаций процесса управления технологическим процессом или подвижным объектом.

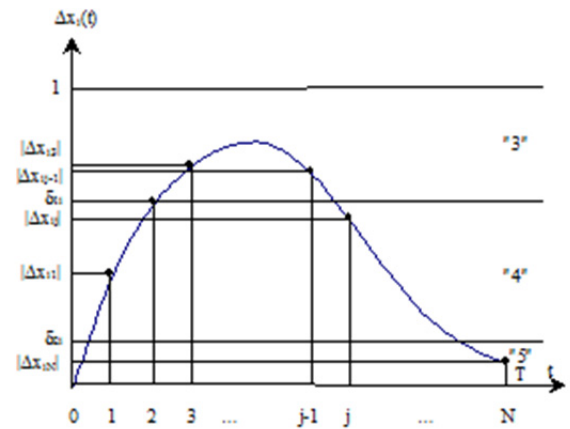


Рис.1. Экспертная градация уровней нормированного диапазона

Такая градация уровней позволяет учитывать при оценке как величину, так и длительность кратковременных отклонений (“выбросов”) переменной относительно ее программных значений на интервале управления T .

При этом формирование значений оценки по параметрам движения производится следующим образом. На интервале управления T через дискретные промежутки времени, длительностью Δt , формируется последовательность отклонений i -той переменной Δx_{ij} ($j = \overline{1, N_i}$), где

$N_i = \frac{T}{\Delta t_i}$. Пусть n_{1i} – количество точек, попавших в область “3”, n_{2i} – в область “4” и n_{3i} – в область “5”. При этом должно выполняться условие:

$$n_{1i} + n_{2i} + n_{3i} = N_i. \quad (7)$$

В этом случае суммарная (интегральная) оценка i -той переменной определится как

$$I_i = \frac{1}{n_{1i} + n_{2i} + 1} \left[\sum_{j=1}^{n_{1i}} |\Delta x_{ij_1}| + \sum_{j=1}^{n_{2i}} |\Delta x_{ij_2}| \right], \quad (8)$$

которая позволяет избежать неопределенности в ситуации, когда $n_{1i} = 0$, $n_{2i} = 0$, а $n_{3i} = N_i$.

Важным вопросом является выбор шага дискретизации Δt_i , значение которого лежит в пределах $\Delta t_{i \min} < \Delta t_i < \Delta t_{i \max}$. В этом случае в качестве верхнего уровня Δt_i может быть выбрана величина:

$$\Delta t_i = \frac{1}{2} \Delta t_{i \max} = \frac{\delta_{1i} |\Delta x_{i \max}|}{2 |\dot{\Delta x}_{i \max}|}, \quad (9)$$

что исключает “проскакивание” очередной дискретной точкой минимальной из выбранных областей (рис. 2.1). Требования к нижней границе определяются технологическими характеристиками датчиков и вычислительной аппаратуры, применяемых для формирования и обработки указанных массивов информации.

При управлении большинством существующих технологических процессов и подвижных объектов зачастую возникает необходимость в оценке требуемого сочетания качеств, характеризующих данную цель управления. Являясь, как известно, задачами векторной оптимизации, они решаются, как правило, на основе компромисса, с учетом важности того или иного частного критерия, поэтому используется линейная свертка критериев нижнего уровня по числу переменных, входящих в данный режим.

В результате для данного l -го режима ($l = \overline{1, L}$) критерий эффективности среднего уровня запишется как

$$\theta_l = \sum_{i=1}^{M_l} \lambda_{li} I_i, \quad (10)$$

где M_l – число переменных в l -том режиме; λ_{li} – коэффициенты, учитывающие важность i -той переменной в l -том режиме.

Для определения значения коэффициентов λ_{li} для i -тых критериев нижнего уровня предлагается использовать известные методы экспертных оценок [2]

Найденный таким образом критерий эффективности среднего уровня вида (10) оказывается весьма удобным для оценки действий оператора в l -м режиме, так как учитывает важность каждой переменной этого режима в их совокупности. Однако, с точки зрения его количественной оценки как в данном l -том режиме, так и среди других режимов критерий вида (10) необходимо привести к некоторому единому диапазону его значений. Наиболее удобным оказывается диапазон $[0, 1]$, приведение к которому осуществляется по формуле:

$$\bar{\theta}_l = \frac{\theta_l}{\theta_{l\max}}, \quad (11)$$

где $\theta_{l\max} = \sum_{i=1}^{M_l} \lambda_{li} |\Delta x_{i\max}|$.

Если ввести нормированное уравнение вида $\sum_{i=1}^{M_l} \lambda_{li} = 1$, то с учетом $|\Delta x_{i\max}|=1$ и $\theta_{l\max}=1$ тогда $\bar{\theta}_l = \theta_l$.

Поскольку существует определенный набор тестовых режимов, возникает необходимость в выборе соответствующего критерия для формирования результирующей оценки по целому ряду режимов. При этом для несмещенности и состоятельности комплексной оценки необходимо выполнение следующих условий.

1. Предельная относительная погрешность суммарной оценки должна лежать в пределах, определяемых значениями максимальной и минимальной погрешностей слагаемых.
2. Результирующая оценка должна определенным образом учитывать важность каждого режима или группы подобных режимов.

Таким условием удовлетворяет критерий вида:

$$J_k = \frac{\sum_{l=1}^{N_k} \left(\frac{1}{\theta_l} \right)^{p_l-1}}{\sum_{l=1}^{N_k} \left(\frac{1}{\theta_l} \right)^{p_l}}, \quad p_l \geq 1, \quad (12)$$

значение которого определяется на основе ранее сформированных относительных оценок $\theta_l, (l = \overline{1, N_k})$ по N_k режимам, а k определяет собой порядковый номер тестового режима.

С помощью выбора соответствующего значения p_l можно произвести целенаправленное, с учетом качества выполнения того или иного режима, а также степени его важности, изменение значений критерия в диапазоне от 0 до 1. При этом если все слагаемые имеют одну и ту же (приблизительно одинаковую) предельную относительную погрешность, то и сумма имеет ту же (или приблизительно такую же) предельную относительную погрешность [3]. Иными словами, в этом случае точность суммы (в процентном выражении) не уступает точности слагаемых. Однако при значительном числе слагаемых, сумма, как правило, гораздо точнее слагаемых, так как в этом случае происходит взаимная компенсация погрешностей, поэтому истинная погрешность суммы лишь в исключительных случаях совпадает с предельной погрешностью или близка к ней.

Следовательно, основным фактором, определяющим изменения значений этой суммы в диапазоне $0 \div 1$, является выбор соответствующего для каждого режима p_l , что достигается следующим образом. Все N_k режимов данной

k -той учебной задачи объединяются по степени их важности, определенной ранжированием по методу экспертных оценок [4], в ряд групп, соответствующих близким значениям оценок. Например, для k -того тестового режима методом экспертных оценок получено следующее разбиение (см табл. 1).

Таблица 1. Пример разбиение режимов по группам

$\theta_1, \theta_3, \theta_6$...	$\theta_2, \theta_9, \theta_{11}$...	$\dots \theta_{N_k-1}, \theta_{N_k}$
1-я группа	j -я группа	R -я группа

Таким образом, N_k частных критериев $\theta_l, (l = \overline{1, N_k})$ разбиты на R групп по $S_j, (j = \overline{1, R})$ элементов в каждой группе разбиения. Известно [3], что общее число перестановок в этом случае будет равно:

$$P_0 = N_k! = \left(\sum_{j=1}^R S_j \right)! \quad (13)$$

Число перестановок, при которых хотя бы один из N_k частных режимов попадает из своей группы в чужую, что в свою очередь должно штрафовать, определяется как:

$$P_B = \left(\sum_{j=1}^R S_j \right)! - \prod_{j=1}^R (S_j)! \quad (14)$$

Тогда доля этого числа перестановок от общего числа определяется следующим образом:

$$\Delta p = \frac{P_B}{P_0} = \frac{\left(\sum_{j=1}^R S_j \right)! - \prod_{j=1}^R (S_j)!}{\left(\sum_{j=1}^R S_j \right)!}, \quad (15)$$

и может служить величиной дискретного шага штрафа p_l . При этом, если для некоторого l -го частного режима, оценка по которому должна находиться в j -ой группе ($j = \overline{1, R}$), попадает в i -тую группу ($i = \overline{1, R}$), то соответствующее значение p_l определяется согласно выражению:

$$\begin{cases} p_l = 1 + (i - j)\Delta p & i > j; \\ p_l = 1, & i \leq j. \end{cases} \quad (16)$$

Полученные таким образом количественные значения комплексного критерия (равно как и значения критерия оценки по режимам), должны быть интерпретированы в более приемлемой бальной системе оценок. Бальная система оценок состоит в том, что диапазон изменения какой-либо переменной, в данном случае критериев J_k или θ_l , разбиваются на ряд интервалов, каждому из которых присваивается оценка (балл). Чаще всего для этих целей используют интервальные шкалы. В этой, как и в других шкалах, соблюдается основное правило шкал, а именно, преобразование числовых значений при сохранении неизменными выполняемых ею функций. Интервальная шкала вводится с точностью до линейного преобразования:

$$\{x_i\} \rightarrow \{x'_i\} = ax_i + b \quad (17)$$

и предполагает трансформации оценок, полученных на одной шкале, в оценки на другой шкале с помощью линейного преобразования.

4. Выводы

Предложенный подход носит универсальный характер и может быть использован для оценки деятельности операторов широкого класса эргодических систем.

Список литературы

1. Вдовин В. М. и др. Теория систем и системный анализ – М. Изд Дашков и К. 2010-638с.
2. Бешелев С.Л., Гурвич Ф.Г. Математические методы экспертных оценок – М. Физматгиз 1980-263с
3. Семендяев Н. В. Справочник по высшей математике – М. Физматгиз.1981