

УДК 389.62

Г.И. Манко, А.И. Карнин

*Украинский государственный химико-технологический университет, Днепрпетровск*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

*Исследуются возможность и методы использования концепции неопределенности для оценки качества управления. Для оценки неопределенности управляющего воздействия предложено использовать информационный критерий неопределенности в виде отношения количества вносимой управляющим устройством дезинформации к максимально возможному ее количеству. Сформулированы основные определения и выведены математические выражения для оценки неопределенности управляющих воздействий автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП).*

**Ключевые слова:** неопределенность, критерий, качество управления, целевая область, дезинформация, информационная насыщенность, интегральная характеристика изменчивости.

### Введение

**Постановка проблемы.** В ходе решения задач анализа и синтеза АСУ ТП возникает необходимость оценки эффективности и качества управления. Существует много подходов к оценке качества и эффективности управления. Соответственно используются и множество критериев, часто противоречивых. Улучшение одного показателя приводит к ухудшению другого.

Очевидно, что целесообразным было бы разработать некоторый обобщенный критерий, обеспечивающий комплексную оценку качества средств управления. Поскольку управление базируется на информации об управляемом объекте и заключается в выработке управляющей информации, оценивать качество управления следует с учетом потерь и искажений информации. При этом можно использовать опыт исследований в области измерений.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Понятие неопределенности измерений прочно вошло в международную метрологическую практику и закреплено документами Международной организации стандартизации ISO (см., например, [1, 2]). Согласно дефиниции [3], неопределенность измерения – это параметр, связанный с результатом измерения и характеризующий разброс значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны измеряемой величине.

Для количественной оценки неопределенности естественным является использование информационных критериев, поскольку информацию обычно рассматривают как меру уменьшения неопределенности знаний о каком-либо объекте в процессе его познания. В работах [4] и [5] использован информационный подход к оценке неопределенности измерений. Введено понятие информационной неопределенности и предложены методы ее измерения.

В ряде работ рассматриваются вопросы управления в условиях неопределенности информации. Например, в [6] анализируются виды неопределенности, требующие учета в процессах управления и контроля современных технологических комплексов. Показаны преимущества применения теории нечетких множеств при решении задач контроля и управления.

В [7, 8] разработаны начала информационной теории управления. Выявлены соотношения между такими характеристиками систем управления, как сложность, упорядоченность, организованность и энтропия. Рассмотрены динамические свойства ценности информации, информационные передаточные функции систем. Однако работы эти носят, в основном, постановочный характер. Изложенные в них подходы не нашли еще широкого применения в практике анализа и синтеза АСУ ТП.

**Целью статьи** является обоснование целесообразности использования концепции неопределенности для оценки качества управления, а также разработка методов её практического применения.

### Изложение основного материала

Состояние технологического процесса характеризуется вектором  $\dot{X}$  значений технологических параметров. Составляющими  $x_i$  вектора  $\dot{X}$  являются переменные, характеризующие технологический процесс: температуры и давления в аппаратах, расходы и составы технологических потоков и т.п.

Технологическим регламентом процесса определяется область  $\mathfrak{Z}$  значений  $x_i$ , соответствующих нормальному протеканию процесса. Будем называть такую область целевой областью.

На рис. 1 показан примерный вид целевой области для случая, когда вектор  $\dot{X}$  имеет две составляющие:  $x_1$  и  $x_2$ .

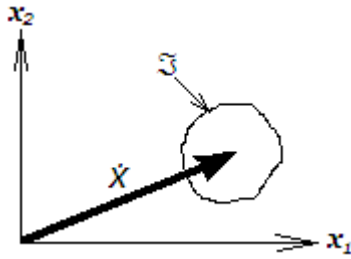


Рис. 1. Вектор состояний  $\dot{X}$  и целевая область  $Z$  технологического процесса

Границы областей достижения цели могут быть нечеткими, местоположение границ может иметь случайный характер. В простейшем случае целевая область может рассматриваться как  $n$ -мерный куб, где  $n$  – число составляющих вектора  $\dot{X}$ . Проекция этого куба на координатную ось  $n$ -мерного пространства определяет диапазон допустимых значений соответствующего технологического параметра.

Целью функционирования АСУ ТП является приведение вектора  $\dot{X}$  в целевую область и удержание в ней. По терминологии [7, 8], вектор, находящийся в целевой области, следует называть эталонным порядком, а систему в таком состоянии – упорядоченной. Мера отличия реального вектора  $\dot{X}$  от эталонного  $\dot{X}_{\text{эт}}$  называется неупорядоченностью  $\bar{Y}$  функционирования АСУ ТП.

Неупорядоченность – величина переменная, принимающая разные значения в различных ситуациях и в различные моменты времени. Более обобщенной характеристикой системы является организованность. Организованной мы можем называть такую АСУ ТП, которую в большинстве ситуаций и большую часть времени можно считать упорядоченной. Для количественной оценки организованности удобнее использовать противоположную характеристику – неорганизованность, которая является обобщением неупорядоченности для всех ситуаций ее проявления и для всех рассматриваемых моментов времени.

Пусть мы имеем  $m$  ситуаций, вероятности которых  $P_1, P_2, \dots, P_m$ . Для ансамбля ситуаций

$$\begin{pmatrix} \bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_m \\ P_1, P_2, \dots, P_m \end{pmatrix}$$

операцию обобщения можно выполнить взвешиванием неупорядоченности по вероятностям ситуаций. Тогда неорганизованность можно рассчитать как [7]:

$$\bar{O} = \sum_{j=1}^m P_j \log \Pi_{\bar{y}_j}, \quad (1)$$

где  $\Pi_{\bar{y}_j}$  – некоторая числовая характеристика отличия  $\dot{X}$  от  $\dot{X}_{\text{эт}}$ , называемая параметром неупорядоченности.

Рассмотрим устройство управления, вырабатывающее управляющее воздействие  $Y$  на основе входной информации, в качестве которой выступают либо

данные об отклонении  $\Delta$  параметра состояния объекта управления от заданного значения, либо данные о возмущении  $Z$ , действующем на объект. Для обобщения обозначим вход устройства управления как  $X$ . Таким образом, устройство управления выполняет функциональное преобразование  $Y = f(X)$ .

Пусть  $P = \{p(x_j)\}$  – распределение вероятностей величины  $X$ , а  $Q = \{q(y_j)\}$  – распределение вероятностей величины  $Y$ . В случае идеальной работы устройства управления эти распределения совпадают. Неупорядоченность реального устройства управления будем оценивать параметром  $\Pi_{\bar{y}_j} = p(x_j)/q(y_j)$ . Тогда

(1) примет вид

$$\bar{O} = \sum_{j=1}^m p(x_j) \log \frac{p(x_j)}{q(y_j)}. \quad (2)$$

Выражение (2) имеет определенный информационный смысл. Оно с точностью до знака совпадает с формулой полезной информации Бонгарда [9]:

$$I_{\Pi} = \sum_j p_j \log(q_j / p_j) = -\bar{O}. \quad (3)$$

Учитывая смену знака, следует говорить о дезинформации, которую вносит устройство управления.

В качестве критерия оценки неопределенности управляющего воздействия целесообразно использовать, по аналогии с [4], отношение количества дезинформации  $D$ , вносимой управляющим устройством, к максимально возможному  $D_{\text{max}}$ :

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{D}{D_{\text{max}}} = -\frac{\sum_j p(x_j) \log \frac{p(x_j)}{q(y_j)}}{\sum_j p(x_j) \log q(y_j)} = \\ &= 1 - \frac{\sum_j p(x_j) \log p(x_j)}{\sum_j p(x_j) \log q(y_j)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Значение относительной неопределенности  $\eta$  изменяется от 0 (для идеального устройства управления) до 1.

В метрологии различают два типа расчетов неопределенности: а) вычисление по типу А – путем статистического анализа результатов многократных наблюдений; б) вычисление по типу В – с использованием других способов. Стандартная неопределенность по типу А – это неопределенность результата измерений, выраженная в виде среднего квадратического отклонения. Для её расчета необходимо иметь выборку экспериментальных данных достаточного объема.

Неопределенность по типу В определяется на основе научного суждения, использующего всю доступную информацию об измеряемой величине, например:

а) данные предшествующих измерений входящих в уравнение измерения; сведения о виде распределения вероятностей;

б) данные, основанные на опыте исследователя или общих знаниях о поведении и свойствах ответствующих приборов и материалов;

в) неопределенности констант и справочных данных;

г) данные поверки, калибровки, сведения изготовителя о приборе.

Методы оценки информационной неопределенности средств измерений для различных вариантов исходных данных, имеющихся в распоряжении исследователя, описаны в [5]. Рассмотрим возможные варианты для задач анализа и синтеза АСУ ТП.

Часто возникает задача оценки качества системы автоматического регулирования (САР) того или иного технологического параметра. В настоящее время для оценки качества управления используется множество критериев, характеризующих управляющую систему с разных сторон и часто противоречащих друг другу. Например, ГОСТ 23222-88 устанавливает, что для оценки точности выполнения предписанной функции средств автоматизации следует определить перерегулирование, колебательность, продолжительность переходного процесса, время установления, время достижения первого максимума, запас устойчивости, быстродействие и частоту собственных колебаний системы автоматического управления. Для сравнения, качество измерительного устройства можно охарактеризовать единственным параметром – погрешностью измерений в случае классического подхода или неопределенностью при использовании концепции неопределенности. Аналогичным образом качество САР будем оценивать информационным критерием (4).

Качество управления может быть потеряно как вследствие неполноты входной информации, так и из-за несовершенства управляющего устройства. В первом случае следует учитывать неопределенность измерений параметров объекта и(или) внешних факторов, во втором – неопределенность выработки управляющих воздействий.

Целью функционирования САР является воспроизведение задающего воздействия с заданной точностью. Неупорядоченность САР – мера различия значений регулируемой величины  $y(t)$  и задающего воздействия  $g(t)$ . В обычной практике такой мерой часто выступает ошибка  $\varepsilon(t)=y(t)-g(t)$ . В качестве обобщенной характеристики точности регулирования удобно использовать информационную неопределенность в виде

$$D = \sum_{j=1}^m p(g_j) \log(p(g_j)/q(y_j)). \quad (5)$$

Соответственно обобщенной характеристикой используемого в САР регулятора следует использовать относительную информационную неопределенность в виде

$$\eta_p = 1 - \sum_j p(g_j) \log p(g_j) / \sum_j p(g_j) \log q(y_j). \quad (6)$$

Распределения  $P=\{p(g_j)\}$  и  $Q=\{Q(y_j)\}$  могут быть получены в результате статистической обработки данных экспериментального исследования САР. Этот вариант соответствует вычислениям по типу А. При отсутствии данных статистического эксперимента используются варианты вычислений по типу В.

1. Если имеются сведения о виде распределения значений задающего воздействия и регулируемой величины, оценку неопределенности можно получить аналитическим путем. Для этого выражения (5) и (6) следует представить в интегральной форме:

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} f(g) \log \frac{f(g)}{\phi(y)} dt; \quad (7)$$

$$\eta_p = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f(g) \log f(g) dt / \int_{-\infty}^{\infty} f(g) \log \phi(y) dt, \quad (8)$$

где  $f(g)$  и  $\phi(y)$  – плотности вероятностей значений задающего воздействия и регулируемой величины.

2. Если имеется возможность получения переходной характеристики САР, используем метод, описанный в [10]. Здесь показано, что информационная насыщенность детерминированного сигнала  $y(t)$  зависит от интенсивности его изменения, характеризуемой величиной

$$\pi_y(t) = \frac{dy}{dt} / \varepsilon_y, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_y$  – порог различимости значений  $y(t)$ . В качестве меры информации в детерминированном процессе используется интегральная характеристика изменчивости переменной  $y(t)$ :

$$U_y = \int_T \pi_y(\theta) \log [\pi_y(\theta) \varepsilon_t] d\theta / \int_T \pi_y(\theta) d\theta, \quad (10)$$

где  $\theta = t/T$  – относительное время;  $T$  – интервал времени наблюдения переменной  $y(t)$ ;  $\varepsilon_t$  – порог различимости времени. Поскольку в системах управления применяются, как правило, цифровые устройства, в качестве порогов различимости  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_t$  целесообразно использовать шаг квантования и интервал дискретизации сигнала  $y(t)$ .

Используя выкладки, приведенные в [4], и заменяя в них вероятностные информационные характеристики соответствующими выражениями на основе формулы (10), получим «детерминированный» аналог формулы (5):

$$D = \int_T \pi_g(\theta) \log \frac{\pi_g(\theta)}{\pi_y(\theta)} d\theta / \int_T \pi_g(\theta) d\theta. \quad (11)$$

Для практических расчетов удобно использовать дискретную форму выражения (11):

$$D = \sum_i \pi_{gi} \log \frac{\pi_{gi}}{\pi_{yi}} / \sum_i \pi_{gi}, \quad (12)$$

где  $\pi_{gi}$  и  $\pi_{yi}$  – значения интенсивности изменения задающего воздействия и регулируемой величины, определяемые для момента времени  $\theta_i$ .

Аналогичным образом может быть получен аналог критерия (6):

$$\eta = 1 - \sum_i \pi_{gi} \log \pi_{gi} / \sum_i \pi_{gi} \log \pi_{yi}. \quad (13)$$

Поскольку для расчетов интенсивности изменения сигналов приходится выполнять операцию дифференцирования, то при получении переходного

процесса САР нельзя использовать ступенчатый сигнал (в точке скачка задающего воздействия производная принимает бесконечно большое значение). В качестве тестового следует использовать синусоидальный или непрерывно возрастающий сигнал.

3. Если степень достижения цели характеризуется интервальной оценкой, то существуют только два варианта: значение параметра цели либо покрывается доверительным интервалом  $\Delta$ , либо нет. Причем вероятность первой ситуации оценивается как  $\beta$  (доверительная вероятность), вероятность второй – как  $(1-\beta)$ . В этом случае

$$D = \beta \log \frac{\beta}{\alpha} + (1-\beta) \log \frac{1-\beta}{1-\alpha}, \quad (14)$$

где  $\alpha$  – априорная (до получения интервальной оценки) доверительная вероятность;  $\beta$  – апостериорная доверительная вероятность.

Для априорной доверительной вероятности может быть выбрано значение, которое обычно применяется в технических расчетах:  $\alpha = 0,95$ .

4. В документации регуляторов, серийно выпускающихся промышленностью, обычно указывается предел допускаемой основной погрешности  $\Delta_{\text{доп}}$ . В этом случае можно использовать выведенные в [4] соотношения между относительной неопределенностью и погрешностью, например, следующую формулу приближенного расчета относительной неопределенности:

$$\eta_p = 1 - \frac{0,51 + \log(y_{\text{max}} - y_{\text{min}})^2}{0,51 + \log[(y_{\text{max}} - y_{\text{min}})^2 + 4\Delta_{\text{доп}}^2]}. \quad (15)$$

## Выводы

Обобщенным критерием качества управления может служить информационная неопределенность управляющего воздействия. Критерий оценки неопределенности определяется как отношение количества вносимой управляющим устройством дезинформации к максимально возможному ее количеству.

Для расчета значений критерия могут использоваться различные данные: результаты статистического эксперимента, переходная характеристика, интервальные оценки степени достижения цели функционирования, характеристики погрешности регуляторов.

## Список литературы

1. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [Text]* - Geneva : ISO, 1993. – 101 p.
2. РМГ 43-2001. Рекомендации по межгосударственной стандартизации, ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» [Текст].
3. *Международный словарь основных и общих терминов в метрологии (VIM), 2-е изд., ISBN 92-67-10175-1*
4. Манко, Г.И. Использование информационных характеристик для оценки неопределенности измерений [Текст] / Г.И. Манко, Н.С. Шевчук // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2008. – Вып. 8 (73). – С. 82–84.
5. Методы оценки информационной неопределенности средств измерений [Текст] / Г.И. Манко, Н.С. Шевчук, Н.А. Минакова, Е.В. Леценко // Системы обработки информации. – Х.: ХУПС, 2009. – Вып. 3 (77). – С. 46–49.
6. Алтунин, А.Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях : монография [Текст] / А.Е. Алтунин, М.В. Семухин. – Тюмень : Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.
7. Электрические системы. Кибернетика электрических систем [Текст] : учеб. пос./ для электроэнерг. вузов / Под ред. В.А. Веникова. – М. : Высш. школа, 1974. – 328 с.
8. Горский, Ю.М. Информационные аспекты управления и моделирования [Текст] / Ю.М. Горский. – М. : Наука, 1978. – 223 с.
9. Бонгард, М.М. Проблемы узнавания [Текст] / М.М. Бонгард. – М. : Наука, 1967. – 320 с.
10. Информационная оценка точности моделирования химико-технологических процессов [Текст] / В.В. Кафаров, Г.И. Манко, В.П. Мешиалкин, В.И. Пинский // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 1. – С. 170-182.

Поступила в редколлегию 29.12.2012

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. И.М. Черненко, Украинский государственный химико-технологический университет, Днепрпетровск.

## ВИКОРИСТАННЯ КОНЦЕПЦІЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ В ЗАДАЧАХ АНАЛІЗУ І СИНТЕЗУ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Г.І. Манко, О.І. Карнін

Досліджуються можливість і методи використання концепції невизначеності для оцінки якості керування. Для оцінювання невизначеності керуючої дії запропоновано використовувати інформаційний критерій невизначеності у вигляді відношення кількості дезинформації, що вноситься керуючим пристроєм, до максимально можливої її кількості. Сформульовані основні визначення і виведені математичні вирази для оцінки невизначеності керуючих дій автоматизованих систем керування технологічними процесами.

**Ключові слова:** невизначеність, критерій, якість керування, цільова область, дезинформація, інформаційна насиченість, інтегральна характеристика мінливості.

## THE USE OF THE UNCERTAINTY CONCEPTION IN TASKS TO THE ANALYSIS AND SYNTHESIS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

G.I. Manko, A.I. Karnin

There are investigated the possibility and methods of the use of the uncertainty conception for the control quality estimation. For estimation of the control action uncertainty there is proposed to use the information criterion of uncertainty in a form of ratio of the misinformation value which is made by a control device, toward its maximally possible amount. The basic determinations are formulated and mathematical expressions are shown out for the estimation of uncertainty of control actions of the technological processes automated control systems.

**Keywords:** uncertainty, criteria, quality estimation, target area, misinformation, information intensive, integrated characteristic of variability.