

Квалиметрия систем на основе энтропийных потенциалов параметров

Прикладные аспекты для пищевой промышленности и нанотехнологий

Канд. техн. наук В. Л. ЛАЗАРЕВ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

The paper considers issues of optimizing equipment development and improvement expenses as well as those for a control system, with the view of providing necessary efficiency level of the total system functioning. A priori uncertainty being typical of present-day complex industrial systems, quality control problems are proposed to be solved on the basis of the methods of entropy potentials theory; models and approaches for solving the set problems being presented.

Keywords: qualimetry, optimization, entropy potentials, prior uncertainty, disturbances, monitoring and system control.

Ключевые слова: квалиметрия, оптимизация, энтропийные потенциалы, априорная неопределенность, возмущения, мониторинг и управление системой.

Ключевая проблема создания и модернизации сложного оборудования — оптимизация соотношений между затратами на разработку или совершенствование отдельных элементов, обеспечивающих повышение качества функционирования всей системы. Одной из таких задач является оптимизация вложений в разработку или модернизацию технологического оборудования и вложений в разработку или совершенствование устройства управления, обеспечивающих необходимый уровень эффективности работы всей системы при наличии ограничений на затраты или требований по их минимизации. Решению этой проблемы уделяется значительное внимание в промышленности. Обзор и систематизация существующих разработок приведены в работах [1, 2]. Причем актуальность проблемы возрастает, так как решение подобных задач существующими методами для современного сложного и дорогостоящего промышленного оборудования представляется весьма затруднительным, а зачастую и невозможным. В первую очередь это связано с имеющимся на практике «дефицитом» информации о режимах и условиях работы систем, характеристиках случайных воздействий, поступающих по различным каналам, и др., т. е. с наличием априорной неопределенности. Такая ситуация характерна для многих процессов и производств пищевой индустрии, где, в отличие от общетехнических измерений, исследования состава и свойств сырья, полуфабрикатов, ингредиентов и готовой продукции и динамики их изменения требуют значитель-

но больших материальных затрат и времени [3, 4]. Для процессов нанотехнологий возникают дополнительные проблемы, связанные с организацией контроля элементов изделий наноразмеров: толщины пленок, пленочных мембран и фильтров; размеров отверстий в них и др. [5]. Поэтому необходимой и актуальной является разработка подходов, направленных на решение задач квалиметрии систем в условиях априорной неопределенности. Далее рассматривается подход к решению таких задач на основе методов теории энтропийных потенциалов, которая находит приложение в различных областях.

В предлагаемом подходе качество функционирования всей системы и отдельных ее элементов (устройство управления, объект управления) оценивается неопределенностью их функционирования в детерминированных режимах. Оценка неопределенности состояния системы по какому-либо параметру x в этом случае осуществляется по величине вероятностной энтропии $H(x)$ для вариаций этого параметра относительно детерминированных значений. Отправным положением для решения проблемы квалиметрии систем является известная зависимость энтропии системы $H(x, y)$, где x — вариация управляющего воздействия, а y — вариация выходного параметра, от энтропии устройства управления $H(x)$ и условной энтропии объекта при наличии управляющего воздействия $H(y/x)$ в виде [6, 7]

$$H(x, y) = H(x) + H(y/x). \quad (1)$$

Вывод этого выражения приведен, например, в учебном пособии [6].

Величина энтропии $H(x)$ обусловлена наличием различных возмущений, дестабилизирующих работу объекта или устройства управления в детерминированном режиме.

Условная энтропия $H(y/x)$ характеризует «уровень несовершенства объекта» для реализации управления или, другими словами, неопределенность или неоднозначность реакции объекта на конкретное воздействие устройства управления вследствие разного рода помех, возмущений и нарушений в работе канала управления, а также в работе самого объекта. В идеально функционирующей системе, когда осуществляются полное подавление и компенсация возмущений и помех в канале управления и объекте, т. е. реакция объекта на воздействие однозначна, $H(y/x) = 0$. В этом случае энтропия всей системы, согласно выражению (1), определяется только энтропией устройства управления.

Применение выражения (1) для решения различных задач связано с проведением больших объемов измерений параметров и обработки измерительной информации для построения гистограмм и вычисления соответствующих энтропий, что снижает практическую ценность такого подхода. Этот недостаток может быть устранен при переходе к понятиям энтропийных потенциалов. Энтропийный потенциал по каждому параметру определяется как половина диапазона равномерного распределения, имеющего такую же энтропию, как и закон распределения этого параметра. При таком подходе исходная энтропия $H(y)$ однозначно выражается через соответствующий энтропийный потенциал Δ_e в виде [8, 9]

$$H(y) = \ln 2\Delta_e. \quad (2)$$

Величина Δ_e является обобщенной унифицированной характеристикой неопределенности состояния объекта при любом законе распределения параметра $p(y)$: чем выше уровень неопределенности, тем больше величина Δ_e и наоборот. Удобство использования величины Δ_e для решения различных задач состоит в том, что она также выражается через характеристики рассеяния параметра: величину среднеквадратического отклонения σ и энтропийный коэффициент закона распределения K_e ($\Delta_e = K_e \sigma$). Определение этих характеристик в ряде случаев требует меньших затрат, чем значений $H(y)$.

Аналогичное, более частное понятие — энтропийное значение погрешности было введено в [8] для анализа погрешностей средств измерений.

Понятие энтропийного потенциала для энтропии двумерной величины $H(x, y)$, как характеристики неопределенности состояния такой системы, может быть введено формально, по аналогии с выражением (2). Очевидно, что при этом обеспечивается однозначное соответствие между этими величинами.

На основе использования положений теории энтропийных потенциалов разработаны способы мониторинга и управления системами в условиях неопределенности, которые находят применение в различных областях [9–11].

Выразив входящие в выражение (1) энтропии через соответствующие им энтропийные потенциалы (2), получим

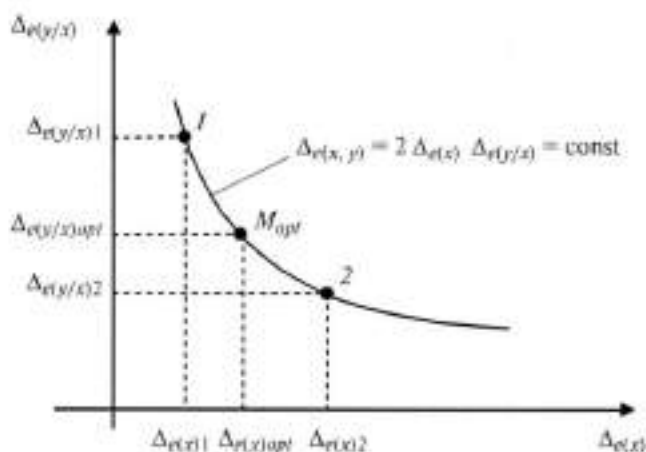
$$\begin{aligned} \ln 2\Delta_{e(x,y)} &= \ln 2\Delta_{e(x)} + \ln 2\Delta_{e(y/x)} = \\ &= \ln 4\Delta_{e(x)}\Delta_{e(y/x)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Откуда следует

$$\Delta_{e(x,y)} = 2\Delta_{e(x)}\Delta_{e(y/x)}. \quad (4)$$

Выражение (4) описывает неопределенность состояния всей системы в зависимости от неопределенности работы устройства управления и непредсказуемости работы объекта в пространстве энтропийных потенциалов.

На основании вышесказанного величина энтропийного потенциала системы $\Delta_{e(x,y)}$, как и величина энтропии $H(x, y)$, характеризует нестабильность, неопределенность ее состояния и в конечном счете качество ее функционирования. Поэтому постоянный уровень качества функционирования системы $\Delta_{e(x,y)} = \text{const}$, согласно выражению (4), может быть обеспечен множеством состояний величин энтропийных потенциалов устройства управления $\Delta_{e(x)}$ и объекта управления $\Delta_{e(y/x)}$. Это положение может быть наглядно проиллюстрировано с помощью линии постоянного энтропийного (изоэнтропийного) потенциала состояния системы — изотропы в плоскости энтропийных потенциалов $\Delta_{e(x)}$ и $\Delta_{e(y/x)}$ (рисунок).



Плоскость энтропийных потенциалов элементов системы с изотропой ее состояния

Каждому конкретному варианту реализации системы будет соответствовать изображающая точка на энтропийной плоскости. Причем условию $\Delta_{e(x,y)} = \text{const} = C_1$ будет соответствовать бесчисленное множество точек, которые и образуют одну изотропу. Это означает, что

одно и то же качество функционирования системы (в энтропийном смысле) может быть достигнуто множеством различных вариантов сочетаний энтропийных потенциалов объекта и устройства управления. Эти показатели напрямую связаны с затратами на модернизацию или разработку соответствующих элементов. Следовательно, одно и то же качество функционирования системы может быть получено различными вариантами соотношений затрат на модернизацию объекта управления, его совершенствование по повышению управляемости, т. е. формирование величины $\Delta_{e(y/x)}$, и затрат на создание или модернизацию устройства управления, т. е. формирование величины $\Delta_{e(x)}$.

В качестве примера на рисунке показаны два таких варианта, обозначенные изображающими точками 1 и 2 с соответствующими значениями $\Delta_{e(x)}$ и $\Delta_{e(y/x)}$. Очевидно также, что повышение качества работы системы будет характеризоваться переходом изображающей точки на изотропу с меньшим значением величины $\Delta_{e(x,y)}$.

Минимизация суммарных затрат на разработку и модернизацию элементов системы при неизменном качестве ее работы, т. е. постоянстве величины $\Delta_{e(x,y)}$, является актуальной задачей. Другими словами, требуется определить координаты точки $M_{opt}(\Delta_{e(x)opt}; \Delta_{e(y/x)opt})$, соответствующие варианту системы с минимально возможными затратами на ее реализацию. Для решения этой задачи необходимо наличие эконометрической модели энтропийного потенциала, которая количественно описывает взаимосвязь получаемого энтропийного потенциала Δ_e и величины соответствующих затрат m . На основании проведенных исследований предлагается следующая модель, полученная эмпирическим путем:

$$\Delta_e = \frac{A}{m}, \quad (5)$$

где A — коэффициент затрат, величина которого зависит от вида объекта, устройства, их природы и характеризует степень сложности, трудоемкости проведения работ по созданию или модернизации конкретного элемента системы.

Следует отметить, что предложенная модель не противоречит здравому смыслу и является достаточно адекватной для реальных диапазонов изменения величины Δ_e . Действительно, целенаправленное увеличение вложений на разработку или модернизацию системы или каких-либо ее элементов для уменьшения неопределенности их состояния, согласно выражению (5), приводит к уменьшению величины Δ_e и наоборот. Адекватность такой модели ухудшается только на «хвостах» в областях достаточно малых и больших значений Δ_e . Это объясняется тем, что практически для любого объекта или устройства управления существует минимальный предел $\Delta_{e\min}$, преодоление которого практически невозможно либо требует несоизмеримо больших затрат, чем те, которые определяются из выражения (5). С другой стороны, для устойчи-

вых систем, работающих в реальных диапазонах изменения случайных воздействий, существует максимальный предел $\Delta_{e\max}$, который априори обеспечивается системой при минимальных вложениях.

Теперь на основании изложенной модели затрат можно получить зависимость качества функционирования системы (в виде величины $\Delta_{e(x,y)}$) от величин затрат на модернизацию объекта m_y и разработку или модернизацию устройства управления m_x . Для этого в выражении (4) выразим величины энтропийных потенциалов элементов системы $\Delta_{e(y/x)}$ и $\Delta_{e(x)}$ через соответствующие величины затрат с помощью выражения (5):

$$\Delta_{e(x,y)} = 2\Delta_{e(x)}\Delta_{e(y/x)} = 2\frac{A_x}{m_x}\frac{A_y}{m_y}, \quad (6)$$

где A_x и A_y — коэффициенты затрат для устройства управления и объекта соответственно.

Из выражения (6) следует, что различные варианты системы, соответствующие заданному уровню качества ее функционирования $\Delta_{e(x,y)} = C = \text{const}$, т. е. описываемые одной изотропой на рисунке, будут определять связи, налагаемые на величины затрат m_x и m_y в следующем виде:

$$m_x m_y = \frac{2A_x A_y}{\Delta_{e(x,y)}} = \frac{2A_x A_y}{C}. \quad (7)$$

Теперь для нахождения координат точки M_{opt} необходимо сформулировать условие минимизации суммарных затрат на разработку или модернизацию всей системы в виде $m_{x,y} = \varphi(m_x, m_y) \rightarrow \min$. Вид функции φ определяется конкретикой решаемой задачи и зависит от множества факторов. Так, например, для ряда практических задач вполне приемлемой является функция затрат в виде $m_{x,y} = c_1 m_x + c_2 m_y$, где c_1 и c_2 — весовые коэффициенты, которые характеризуют приоритеты затрат на соответствующие устройства. Для удобства иллюстрации излагаемого подхода положим, что элементы системы с точки зрения специфики их модернизации имеют равные приоритеты. В результате получим условие минимизации суммарных затрат, которое будет иметь вид

$$m_{x,y} = m_x + m_y \rightarrow \min. \quad (8)$$

Совокупность условий (7) и (8) является математической формулировкой задачи минимизации затрат на разработку или модернизацию системы с заданным уровнем энтропийного потенциала — качеством ее функционирования. Применяв процедуру нахождения экстремума (\min) функции с использованием первой производной, получаем решение в виде

$$m_{xopt} = m_{yopt} = \sqrt{\frac{2A_x A_y}{\Delta_{e(x,y)}}} = \sqrt{\frac{2A_x A_y}{C}}. \quad (9)$$

Теперь, подставляя полученное решение в выражение (5), определяем координаты точки M_{opt} :

$$\Delta_{e(x)opt} = \frac{A_x}{m_{xopt}} = \sqrt{\frac{A_x \Delta_{e(x,y)}}{A_y \cdot 2}}, \quad (10)$$

$$\Delta_{e(y/x)opt} = \frac{A_y}{m_{yopt}} = \sqrt{\frac{A_y \Delta_{e(x,y)}}{A_x \cdot 2}}. \quad (11)$$

Разделив выражение (10) на (11), получаем выражение, описывающее соотношение оптимальных (по затратам) величин энтропийных потенциалов элементов системы через соответствующие коэффициенты затрат:

$$\frac{\Delta_{e(x)opt}}{\Delta_{e(y/x)opt}} = \frac{A_x}{A_y}. \quad (12)$$

Анализируя полученные результаты (10)–(12), можно сделать вывод, что для решения задачи минимизации затрат при синтезе или модернизации системы с заданным уровнем энтропийного потенциала (качеством ее работы) нет необходимости определять коэффициенты затрат для каждого отдельного элемента. Для нахождения решения в виде (10) и (11) необходимо наличие только отношения этих коэффициентов $B = A_x/A_y$, которое предлагается определить как коэффициент кратности затрат. Этот коэффициент определяется отношением затрат, необходимых для изменения энтропийного потенциала элементов системы на одну и ту же величину, и зачастую может быть определен специалистом опытно-интуитивным путем. Для штатных ситуаций, например типовые блоки управления (типовые регуляторы с корректирующими звеньями) — типовое оборудование (теплообменные аппараты, автоклавы, ректификационные колонны конкретных типов, оборудование для нанесения наноструктурированных покрытий и производства наночастиц и др.), величины коэффициентов кратности затрат могут быть заранее определены и табулированы.

В рамках данной работы для изложения сути подхода к проблеме квалиметрии систем на основе энтропийных потенциалов параметров использованы упрощенные модели затрат (5), (8). В случае необходимости возможна корректировка или замена моделей. При этом постановка задачи, суть подхода, технологии и алгоритмы нахождения решений сохранятся.

Для иллюстрации изложенного подхода рассмотрим следующий пример. Имеется климатическая камера для проведения температурных испытаний различных объектов и образцов с устройством управления для поддержания температурных режимов. Камера по производственной необходимости эксплуатируется в помещении, где имеют место значительные колебания температуры и влажности наружного воздуха. Эти обстоятельства оказывают влияние на условия теплообмена с окружающей средой и являются возмущениями температурного режима в камере.

Для конкретной производственной ситуации величина энтропийного потенциала температуры при задан-

ной уставке $X = 180^\circ\text{C}$ составляет $\Delta_{e(y/x)} = 8^\circ\text{C}$, что недопустимо по условиям испытаний. Возникает необходимость модернизации системы в целях понижения величины $\Delta_{e(y/x)}$ до 4°C . Указанная цель может быть достигнута как путем модернизации объекта (камеры), так и путем совершенствования функционирования устройства управления, а также за счет совместной реализации этих способов. Модернизация объекта в данном случае предусматривает увеличение дополнительной тепло- и гидроизоляции корпуса камеры, что приведет к уменьшению влияния вышеуказанных возмущений и, соответственно, к уменьшению величины $\Delta_{e(y/x)}$. Значение величины коэффициента затрат для данного объекта в относительных условных единицах $A_y = 10$.

Модернизация устройства управления может быть направлена, например, на совершенствование закона регулирования, введение в контур управления дополнительного корректирующего звена или изменение структуры устройства, например за счет введения дополнительного контура компенсации возмущения. Значение усредненной величины коэффициента затрат в тех же единицах $A_x = 8$.

При модернизации системы необходимо обеспечить общую минимизацию затрат. Определим оптимальное соотношение затрат при модернизации элементов системы. Оптимальное соотношение величин энтропийных потенциалов, а также величину $\Delta_{e(x)opt}$ определим из выражения (12). В результате получим $\Delta_{e(x)opt} = \Delta_{e(y/x)} A_x/A_y = 3,2$. При этом величина коэффициента кратности затрат $B = 0,8$. Величины затрат в условных единицах для элементов системы, согласно выражению (5), будут составлять: для устройства управления $m_x = A_x/\Delta_{e(x)opt} = 2,5$; для объекта управления (камеры) $m_y = A_y/\Delta_{e(y/x)opt} = 2,5$. Суммарная величина минимизированных затрат на модернизацию всей системы, согласно условию (8), $m_{x,y} = m_x + m_y = 5$.

Полученные результаты (5)–(12) в силу общности изложения справедливы для различных типов систем. Представленные модели основаны на ряде упрощающих допущений, поэтому их использование в ряде случаев может не дать высоких уровней адекватности в расчетах по квалиметрии. Тем не менее они являются компактными, удобными для работы, требуют минимального количества исходных данных и могут использоваться в условиях априорной неопределенности, характерных для многих практических задач.

Список литературы

1. *Остилов М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М.* Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. — М.: Наука, 2006.
2. *Андрианов Ю. М., Субетто А. И.* Квалиметрия в приборостроении. — Л.: Машиностроение, 1990.

3. Информационные технологии пищевых производств в условиях неопределенности / А. Е. Краснов, О. В. Красуля, О. В. Большаков, Т. В. Шленская. — М.: ВНИИМ, 2001.
4. Лазарев В. Л. Автоматизированный мониторинг и управление процессами низкотемпературных и пищевых технологий на основе методов теории энтропийных потенциалов / Сб. докладов Международной конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». — СПб., 2007.
5. Лазарев В. Л. Организация процессов нанотехнологий на основе энтропийных потенциалов параметров / Сб. докладов Международной конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». — СПб., 2007.
6. Лазарев В. Л. Робастные системы управления в пищевой промышленности: Учеб. пособие. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2003.
7. Благовещенская М. М., Злобин Л. А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами: Учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 2005.
8. Электрические измерения неэлектрических величин / А. М. Турчин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина и др.; Под ред. П. В. Новицкого. — Л.: Энергия, 1975.
9. Лазарев В. Л. Энтропийный подход к организации мониторинга и управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2005. № 6.
10. Пат. 2296356 RU, МПК G05B13/00. Способ контроля и управления динамической системой / Лазарев В. Л. (RU). Опубл. 2007.03.27. Бюл. № 9.
11. Лазарев В. Л. Исследование систем на основе энтропийных и информационных характеристик // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 2. (<http://www.ioffe.rssi.ru/journals/jtf/2010/02/p1-7.pdf>).