

УДК 621.3.083.92

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Колесников В.А., Юров В.М.

*Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова, Караганда,
e-mail: kolesnikov.vladimir@gmail.com*

В работе предложен метод энтропийного анализа информационно-измерительных систем. Показано, что точность информационно-измерительной системы можно повысить путем увеличения емкости ее каналов. Получено условие оптимальной структуры информационно-измерительной системы в сравнении с уровнем помех. Полученные результаты иллюстрируются на примере разработанных авторами информационно-измерительных систем. Наилучший результат получается в одноканальной системе с датчиком, который имеет особые свойства. Предложенный в работе анализ позволяет качественно, а иногда и количественно, определить основное направление проектирования информационно-измерительных систем в зависимости от решаемых ею задач.

Ключевые слова: энтропия, информация, термодинамика, информационно-измерительная система

THE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

Kolesnikov V.A., Jurov V.M.

Karaganda state university of E.A.Buketov, Karaganda e-mail: kolesnikov.vladimir@gmail.com

In work the method the entropy analysis of information-measuring systems is offered. It is shown, that accuracy of information-measuring system can be raised by increase in capacity of its channels. The condition of optimum structure of information-measuring system in comparison with level of hindrances is received. The received results are illustrated on an example of the information-measuring systems developed by authors. The best result turns out in single-channel system with the gauge which has special properties. The analysis offered in work allows qualitatively, and sometimes and quantitatively, to define the basic direction of designing of information-measuring systems depending on problems solved by it.

Keywords: entropy, the informationa, the thermodynamics, information-measuring system

Информационно-измерительная система (ИИС) – это комплекс измерительных устройств, обеспечивающий получение оператором или ЭВМ информации о состоянии объекта [1,2]. Объекты измерения часто имеют сложную природу, в которых могут происходить разнообразные процессы и явления. Задача, решаемая ИИС, – это объединение совокупности параметров объекта и создание достаточно полного его описания.

Становление теории информации в середине XX века связано с работами В.А. Котельникова и К. Шеннона и было вызвано потребностями практики – техники связи. Дальнейшее развитие информационных систем – измерительных, вычислительных, автоматических систем управления – расширило область интереса к информационным процессам далеко за пределы одного процесса передачи информации [3].

На начальном этапе развития кибернетики и теории информации существовало мнение, что малая энергоёмкость информационных процессов существенно отличает их от энергетических. С развитием и усложнением информационных систем встал вопрос и об определении энергетической сложности различных информационных

процессов, выяснения предельных соотношений при получении, хранении и обработке информации. Это послужило толчком к применению основных положений термодинамики к теории информации [3]. Однако существенного внимания со стороны исследователей вопросы термодинамики информационных процессов не получили. Исключение составляют основополагающие работы Р.П. Поплавского [4]. Им было подчеркнуто, что термодинамика информационных процессов, в отличие от равновесной термодинамики и термодинамики открытых систем, является термодинамикой переходных процессов. Им было также установлены предельные соотношения между информационными характеристиками (точность, количество информации) и термодинамическими (энергия, энтропия).

Предложенный нами в работе [5] подход отличается от подхода Р.П.Поплавского только в части математической формулировки задачи, но не выходит за рамки идеологии переходных процессов, связанных с наличием термостата.

В настоящей работе применительно к информационно-измерительным системам мы воспользуемся подходом, развитым в работе [5].

Энтропия диссипативных процессов

В основе всей теории информации лежит открытие, заключающееся в том, что информация допускает количественную оценку. Наиболее четко, вплоть до введения количественной меры информации, эта мысль, по-видимому, впервые была высказана Хартли в 1928 г., а затем, уже на более высоком уровне, развита и обобщена Шэнноном, Винером, фон Нейманом, Фишером, Колмогоровым и другими [6]. Подробное обсуждение понятий энтропии и информации изложено в огромном количестве работ и не является предметом настоящей работы, поэтому мы отсылаем читателя к более специальным обзорам и монографиям [6–11]. Отметим лишь, что изменение энтропии объекта обратно пропорционально количеству ΔI информации о нем:

$$\Delta S = \frac{k \ln 2}{\Delta I}, \quad (1)$$

где $k \ln 2$ – энергетический эквивалент информации.

Всякий процесс измерения связан с взаимодействием тех или объектов (или поля и объектов) и всякий процесс взаимодействия сопровождается диссипативными процессами, приводящими к потере части информации и возникновению погрешности измерения. Для вероятности диссипативных процессов в работе [5] получено выражение:

$$P = \frac{2\Delta S}{k\tau} \exp \left\{ -\frac{E_m - G^0/N}{kT} \right\}, \quad (2)$$

где ΔS – изменение энтропии в диссипативном процессе; E_m – среднее значение энергии основного состояния системы; τ – время релаксации, G^0 – энергия Гиббса термостата, в который погружена система, N – число структурных элементов системы, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Большинство диссипативных процессов описывается уравнением Аррениуса:

$$P = \nu \exp(-E_a / kT), \quad (3)$$

где E_a – энергия активации, ν – частотный фактор.

Сравнивая это выражение с (2) находим:

$$\Delta S = \frac{\nu k \tau}{2} \exp \left(-\frac{E_m + E_a - G^0/N}{kT} \right). \quad (4)$$

Частотный фактор в большинстве практически важных случаях $\nu = 1/\tau$ и выражение (4) переписывается в виде:

$$\frac{2\Delta S}{k} = \exp \left\{ -\frac{E_m + E_a - G^0/N}{kT} \right\}. \quad (5)$$

Используя (1) и (5), для количества информации, получим выражение:

$$\Delta I = \frac{1}{2 \ln 2} \exp \left\{ \frac{Q - G^0/N}{kT} \right\}. \quad (6)$$

Здесь $Q = E_m + E_a$ – энергетическая емкость системы. В случае ИИС под Q следует понимать канальную емкость.

Точность информационно-измерительных систем

Основной характеристикой ИИС является точность. Точность работы ИИС определяется динамическими характеристиками: быстродействием, помехоустойчивостью, разрешающей способностью. Она определяется как внутренними факторами (структура системы, алгоритм функционирования и обработки сигналов и т.п.), так и внешними условиями (условия измерений, наличие естественных помех и т.п.).

Техническую эффективность ИИС по показателю точности количественно оценивают ошибкой [12]:

$$\mathcal{E}_T = \Delta = y = y^*, \quad (7)$$

где y – вектор фактической реакции системы; y^* – вектор желаемой реакции системы.

В общем случае количественной мерой точности служит функция от ошибки Δ , называемая функцией потерь $R(y_i, y_i^*)$. Эта функция определяет потери, соответствующие комбинации y и y^* в каждой отдельной (i -й) реализации.

Оценка точности системы по показателю точности оказывается довольно сложной. В общем случае ошибка Δ является случайной функцией времени

$$\Delta(t, \alpha) = y(t, \alpha) - y^*(t), \quad (8)$$

где $\alpha = \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l$ – вектор параметров системы.

Полное описание случайного процесса $\Delta(t)$ дается многомерной плотностью вероятностей $W(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_l)$ для любого сколь угодно большого t внутри интервала наблюдения $[0, T]$. Однако такая характеристика для оценки точности системы практически непригодна, так как ее сложно получить как аналитически, так и моделированием на ЭВМ. Поэтому обычно ограничиваются одномерной или двумерной плотностью вероятностей ошибок.

На каждом этапе элементарного информационного взаимодействия рост энтропии термостата ΔS лежит в пределах [4]:

$$1/\Delta^2 \geq \Delta S \geq \Delta S_{\min} = 2/\Delta. \quad (9)$$

Левая граница соответствует предельно необратимой реализации переходного процесса, а правая – оптимальному замедлению его.

С другой стороны, негэнтропийный эффект (эффект упорядочивания в системе, $\Delta K = -\Delta S$), согласно [13, 14]:

$$\Delta I \rightarrow \max, \quad Q - G^0 / N \gg 1, \quad Q \gg G^0 / N. \quad (12)$$

Таким образом, точность информационно-измерительной системы можно повысить путем увеличения канальной емкости. Это возможно при использовании многомерных информационно-измерительных систем [15].

Необходимо отметить следующее: в реальных системах и канальная емкость Q и число каналов N ограничено. Первое связано с архитектурой ИИС и используемой системой кодирования информации, второе – с числом параметров (датчиков), определяющих состояние системы с наибольшей степенью полноты.

Энергия Гиббса термостата G^0 характеризует влияние среды на точность ИИС, т.е. – средний уровень помех. Очевидным условием подавления помех является условие:

$$Q \cdot N \gg G^0. \quad (13)$$

Однако следует заметить, что величины G^0 и N взаимозависимы. С увеличением числа датчиков и других вспомогательных систем возрастает средний уровень помех, так что оптимальным условием является:

$$Q \rightarrow \max \text{ при } N \rightarrow 1. \quad (14)$$

Ниже мы рассмотрим примеры применения соотношения (14) к разработанным нами ИИС.

Бортовой комплекс для систем сбора данных о состоянии подвижных объектов

Известны устройства сопровождения и управления транспортными средствами [16], которые содержат: навигационную антенну; навигационный приемник с процессором; радиоантенну; приемопередатчик с процессором; энергонезависимую память; бортовые подсистемы и бортовой контроллер; связанный соответствующим образом с перечисленными блоками и содержащий

$$\Delta K \approx \ln(1/\Delta) \approx \ln \sqrt{U/T} \approx \Delta I, \quad (10)$$

где ΔI – полученное в процессе измерения количество информации.

В этом случае энтропийная эффективность информационно-измерительного процесса:

$$\eta \leq \eta_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\Delta K}{\Delta S_{\min}} \ll 1, \quad \Delta \ll 1. \quad (11)$$

Минимальное значение энтропии реализуется при условии максимума количества информации:

микропроцессорный элемент с входными и выходными буферами. При этом бортовой контроллер подключен к одному из выходов микропроцессорного элемента, а выход связан с входом СБРОС микропроцессорного элемента. Блок контроля функционирования бортового контроллера включает генератор импульсов, счетчик и формирователь коротких импульсов, вход последнего является входом блока контроля функционирования бортового контроллера, а выход связан с R-входом счетчика. С-вход контроллера связан с выходом генератора, а выход счетчика является выходом блока контроля функционирования бортового контроллера. Устройство способно передавать данные от установленных на транспортных средствах датчиков на центральный диспетчерский пункт и может быть использовано в системе автоматического управления.

Недостатком данного устройства является то, что комплекс усложнен энергонезависимой памятью и радиоприемником, информация с которого обрабатывается на микропроцессоре, что ведет к дополнительной нагрузке процессора. Иными словами, данное техническое решение приводит к возрастанию G^0 и, соответственно, уровня помех. В данном устройстве $N \geq 10$ и поэтому должно быть $Q \gg 0,1 G^0$. Нижний предел величины G^0 можно оценить по характеристикам используемых элементов описанной выше ИИС. Оценка показала, что $Q \approx 0,01 G^0$, что, в общем-то, недостаточно.

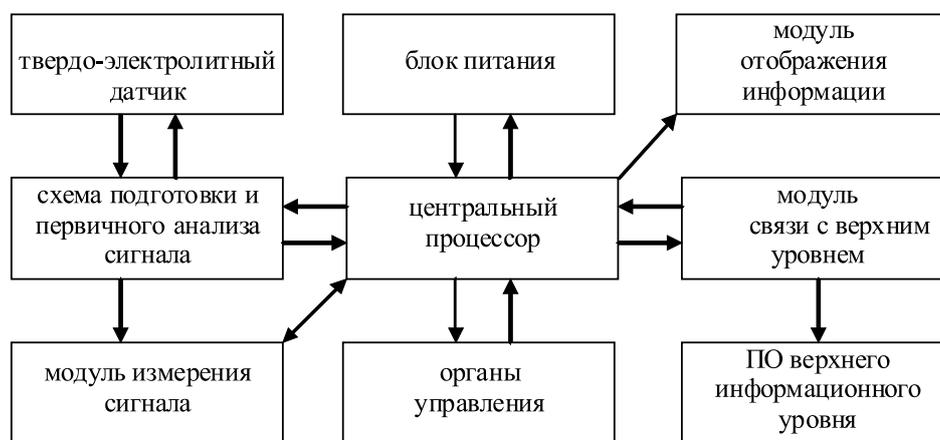
Чтобы условие $Q \gg 0,1 G^0$ выполнялось, нами разработан бортовой комплекс, способный работать автономно и полностью исключаящий одновременную передачу информации от двух бортовых комплексов [17]. При этом исключаются взаимные помехи работы комплексов. Поставленная задача решена таким образом, что в известном бортовом комплексе введены трехпроцессорный контроллер с подключенными

соответственно к первому, второму, третьему, четвертому и пятому входам-выходам трехпроцессорного контроллера блока согласования для сбора информации от системы RFID, памяти энергонезависимой, модуля индикации режимов работы, модуля согласования с системами верхнего уровня и стабилизированного источника питания. При этом шестой, седьмой и восьмой входы-выходы трехпроцессорного контроллера соединены соответственно с входами-выходами датчиков технологического состояния

транспортного средства, навигационной антенны с GPS-приемником и приемо-передающим устройством с радиоантенной.

Информационно-измерительная система для определения влажности зерна

Случай выполнения условия (14) реализован нами при создании ИИС для измерения влажности зерна [18]. Структурная схема ИИС для определения влажности, на основе твердоэлектrolитного датчика представлена на рисунке.



Структурная схема ИИС для определения влажности на основе твердоэлектrolитного датчика

Как видно из рисунка, комплекс состоит из твердоэлектrolитного датчика, схемы первичной подготовки и анализа сигнала, модуля измерения сигнала, модуля центрального процессора, органов управления и отображения информации, а также порта связи с верхним информационным уровнем и программное обеспечение.

Основными элементами комплекса являются твердоэлектrolитный датчик, схема подготовки и измерения сигнала и центральный процессор, под управлением которого осуществляется измерение и производится обработка сигнала от датчика.

Выполнение условия (14) достигается за счет синтеза твердого электrolита, ионная проводимость которого изменяется на 4 порядка при изменении влажности от 5% до 90%. Это приводит к тому, что в ИИС необходим только один канал ($N=1$), связанный с измерением проводимости чувствительного к влаге сенсора. Произведенная оценка показала, что в нашем случае $Q \approx 10^{-4} G^0$, т.е. точность работы нашей ИИС на 3 порядка больше, чем зарубежных аналогов.

Заключение

В настоящее время при проектировании современных ИИС используются методы структурного и системного анализа. Это позволяет проектировать ИИС с помощью средств компьютерной техники, что создает предпосылки для разработки автоматизированных комплексов управления проектами, широкого внедрения многомерных средств преобразования и передачи информации в информационно-измерительных системах. В настоящее время за рубежом, в частности в США, стоимость работ по автоматизации проектирования ИИС составляет более 1/3 стоимости разработки больших проектов, что свидетельствует о сложности и дороговизне автоматизированного проектирования [19]. Предложенный в настоящей работе энтропийный анализ ИИС позволяет качественно, а иногда и количественно, определить основное направление проектирования ИИС в зависимости от решаемых ею задач.

Список литературы

1. Калашников В.И., Нефедов С.В., Путилин А.Б. и др. Информационно-измерительная техника и технологии. – М.: Высшая школа, 2002. – 587 с.
2. Ранеев Г.Г., Суротина В.А., Калашников В.И. Информационно-измерительная техника и электроника. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 512 с.
3. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. – М: Физматгиз, 1960. – 340 с.
4. Поплавский Р.П. Термодинамика информационных процессов. – М: Наука, 1981. – 255 с.
5. Яворский В.В., Юров В. М. Прикладные задачи термодинамического анализа неравновесных систем. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 338 с.
6. Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информации. – М: Мир, 1966.- 340 с.
7. Митюгов В.В Физические основы теории информации. – М: Сов. радио, 1976. – 264 с.
8. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. – М.: ИЛ, 1963. – 829 с.
9. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия количества информации. // Проблемы передачи информации. – 1965. Т.1, Вып. 1. – С. 3-34.
10. Хазен А.М. Введение меры информации в аксиоматическую базу механики. – М.: РАУБ. 1998 – 312 с.
11. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. – М.: Едиторная УРСС, 2004. – 288 с.
12. Борисов Ю.П. Математическое моделирование радиосистем. – М.: Советское радио, 1976. – 296 с.
13. Поплавский Р.П. О термодинамических пределах точности физического измерения // ДАН СССР, Т.202, 1972. – С. 562-565.
14. Поплавский Р.П. Термодинамические модели информационных процессов // УФН, Т.115, № 3, 1975. – С. 465-501.
15. Тен Т.Л., Яворский В.В., Юров В.М. Многомерные распределители импульсов и термодинамика информационных процессов // Вестник КарГУ. Сер. Физика, № 1(41), 2006. – С. 26-30.
16. Лаптев В.У., Иванов В.Э., Дубров И.А. и др. Система диспетчерского управления наземным транспортом // Патент РФ № 21113013, Оpubл. 10.06.1998, бюл. №8.
17. Колесников В.А., Галлиев С.Ж., Намазбаев Т.С. и др. Бортовой комплекс для системы сбора данных о состоянии подвижных объектов // Патент РК №22446. Оpubл. 15.04.2010, бюл. № 4.
18. Халенов О.С., Колесников В.А., Юров В.М. Датчики влажности на основе нанопористой керамики // Труды VIII междунар. научной конф «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», Алматы, 2011. Ч.1. – С. 487-494.
19. Грекул В.И., Денищенко Г.Н., Коровкина Н.Л. Проектирование информационных систем. – М.: Интернет-университет, 2005. – 345 с.

Работа выполнена по программе МОН РК 055 «Научная и/или научно-техническая деятельность», подпрограмма 101 «Грантовое финансирование научных исследований». Контракт № 1932 от 25.10.2012.