

В.А.Колесников, Я.Ж.Байсагов

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: kolesnikov.vladimir@gmail.com)

Энтропийный анализ информационно-измерительных систем

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 задач.

Ключевые слова: энтропия, информация, измерительная система, управляющая система, эффективность, термодинамика, системный анализ.

Введение

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 них могут происходить разнообразные процессы и явления. Задача, решаемая ИИС, — это объединение совокупности параметров объекта и создание достаточно полного его описания.

Создание ИИС связано не только с решением чисто «системных» вопросов: метрологическая унификация средств измерений (датчиков, преобразователей) независимо от вида измеряемых величин; оптимизация распределения погрешностей между различными средствами измерений, входящими в ИИС, и т.д. Часто оно связано и с созданием самих датчиков и измерительных устройств, иногда на новых физических эффектах или на новых материалах и технологиях.

Становление теории информации в середине XX в. 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 энергоемкость информационных процессов существенно отличает их от энергетических. С развитием и усложнением информационных систем встал вопрос и об определении энергетической сложности различных информационных процессов, выяснении 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 подчеркнuto, что термодинамика информационных процессов, в отличие от равновесной термодинамики и термодинамики открытых систем, является термодинамикой переходных

процессов. Им были также установлены предельные соотношения между информационными характеристиками (точность, количество информации) и термодинамическими (энергия, энтропия).

Предложенный в работе [5] подход отличается от подхода Р.П.Поплавского только в части тематической формулировки задачи, но не выходит за рамки идеологии переходных процессов, связанных с наличием термостата. Такой подход оправдал себя применительно к процессам совершенно различной природы [6–8].

В настоящей работе применительно к информационно-измерительным системам мы воспользуемся подходом, развитым в работах [5–8]. Но в отличие от этих работ, где основное внимание уделено функции отклика системы, мы будем анализировать поведение ее энтропии в различных информационных процессах.

Энтропия и информация

Всякая (искусственная или естественная) система взаимодействующих объектов может рассматриваться как информационная система. Любая часть совокупности взаимодействующих объектов (в частности, и один из объектов) может изучаться с целью извлечения информации о другой части этой совокупности (в частности, о другом отдельном объекте), так как взаимодействие обеспечивает соответствие состояний, т.е. отражение, содержание информации. Объекты, образующие информационную систему, могут иметь совершенно произвольную природу.

Из этого, конечно, не следует, что теория информации призвана заменить или объять другие науки, изучающие специфические взаимодействия между объектами определенного класса. Но из этого следует, что среди бесконечного множества свойств, которые присущи любой системе взаимодействующих объектов, неотъемлемым является свойство объектов отражать друг друга, содержать информацию друг о друге. В некоторых явлениях информационные отношения не играют существенной роли или замаскированы. Тогда наука, изучающая эти явления, может достичь определенных успехов без привлечения теории информации; в других случаях информационный подход неизбежен.

Понятие энтропии возникло в связи с необходимостью ввести численную характеристику неопределенности случайного объекта на некотором этапе его рассмотрения. Все, что мы можем сказать априори о поведении случайного объекта, — это указать множество его состояний и распределение вероятностей по элементам этого множества.

В качестве меры неопределенности случайного объекта с конечным множеством возможных состояний A_1, A_2, \dots, A_n соответствующими вероятностями p_1, p_2, \dots, p_n разумно взять функционал

$$S(A) = S(p_1, p_2, \dots, p_n) = - \sum_{k=1}^n p_k \log p_k ,$$

где логарифмы берутся при произвольном основании. Величину $S(A)$ называют энтропией случайного объекта A . В последующем было показано, что при некоторых весьма общих требованиях к мере неопределенности вид функционала $S(A)$ является единственно возможным (с точностью до постоянного множителя) [9].

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 [10].

В силу статистической независимости символов вероятность сигнала длиной в n символов равна

$$p = \prod_{j=1}^n p_j ,$$

где p_j — вероятность j -го символа, $j = 1, 2, \dots, n$ — порядковый номер символа в сигнале. Если j -й символ повторяется в данном сигнале n_i раз, то

$$p = \prod_{i=1}^m p_i^{n_i} .$$

При достаточно больших n — $n_i \approx np_i$, поэтому

$$p = \prod_{i=1}^m p_i^{np_i} .$$

Отсюда окончательно получим:

$$I = -\log p = -n \sum_{i=1}^m p_i \log p_i.$$

Это соотношение носит название формулы Шэннона [11].

Обращает на себя внимание тот факт, что формула Шэннона для количества информации совпадает с формулой для величины энтропии множества возможных сигналов.

Подробное обсуждение понятий энтропии и информации изложено в огромном количестве исследований и не является предметом настоящей работы. При необходимости возможно с ними ознакомиться [12–14]. Отметим лишь, что изменение энтропии объекта обратно пропорционально количеству ΔI информации о нем, т.е.

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

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

Энтропия диссипативных процессов

Всякий процесс измерения связан с взаимодействием тех или иных 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 в природе 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 [15]:

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

где \mathbf{y} — вектор фактической реакции системы; \mathbf{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_i и y_i^* в каждой отдельной (i -той) 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, неэнтропийный эффект (эффект упорядочивания в системе, $\Delta K = -\Delta S$), согласно [16, 17]:

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

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:

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

Таким образом, точность информационно-измерительной системы можно повысить путем увеличения канальной емкости. Это возможно при использовании многомерных информационно-измерительных систем [18].

Необходимо отметить следующее: в реальных системах и канальная емкость Q , и число каналов N ограничены. 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 взаимосвязаны. С увеличением числа датчиков и других вспомогательных систем возрастает средний уровень помех, так что оптимальным условием является

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

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 [19], 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 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-выходом 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 $Q \gg 0,1G^0$. Нижний предел величины G^0 можно оценить по характеристикам используемых элементов описанной выше ИИС. Оценка показала, что $Q \approx 0,01G^0$, что, в общем-то, недостаточно.

Чтобы условие $Q \gg 0,1G^0$ выполнялось, нами разработан бортовой комплекс, способный работать автономно и полностью исключаящий одновременную передачу информации от двух бортовых комплексов. 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 приемопередающим устройством с радиоантенной.

На рисунке 1 изображена блок-схема бортового комплекса для системы сбора данных о состоянии подвижных объектов, который содержит навигационную антенну, GPS-приемник, радиоантенну, приемопередающее устройство, плату центрального процессора с пакетным модемом, блок согласования для сбора информации от системы RFID.

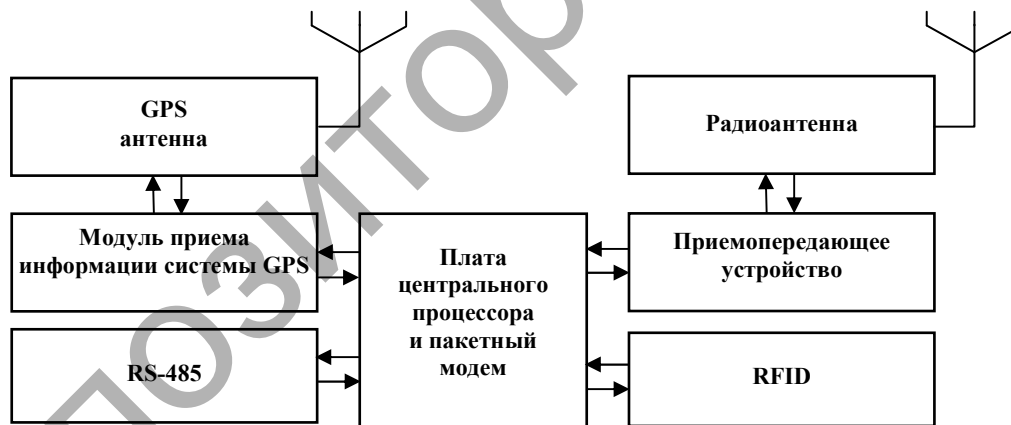


Рисунок 1. Блок-схема бортового комплекса для системы сбора данных о состоянии подвижных объектов

Трехпроцессорный контроллер состоит из трех однокристальных микропроцессоров. Структурная схема трехпроцессорного контроллера представлена на рисунке 2. Трехпроцессорный контроллер состоит из процессора пакетного модема, центрального процессора и процессора обработки подсистемы RFID. Представленное техническое решение позволяет разгрузить центральный процессор, полностью исключить взаимное влияние микропроцессоров и значительно повысить быстродействие контроллера. Достигается расширение функциональных возможностей и повышение помехоустойчивости бортового комплекса для системы сбора данных о состоянии подвижных объектов.



Рисунок 2. Структурная схема трехпроцессорного контроллера

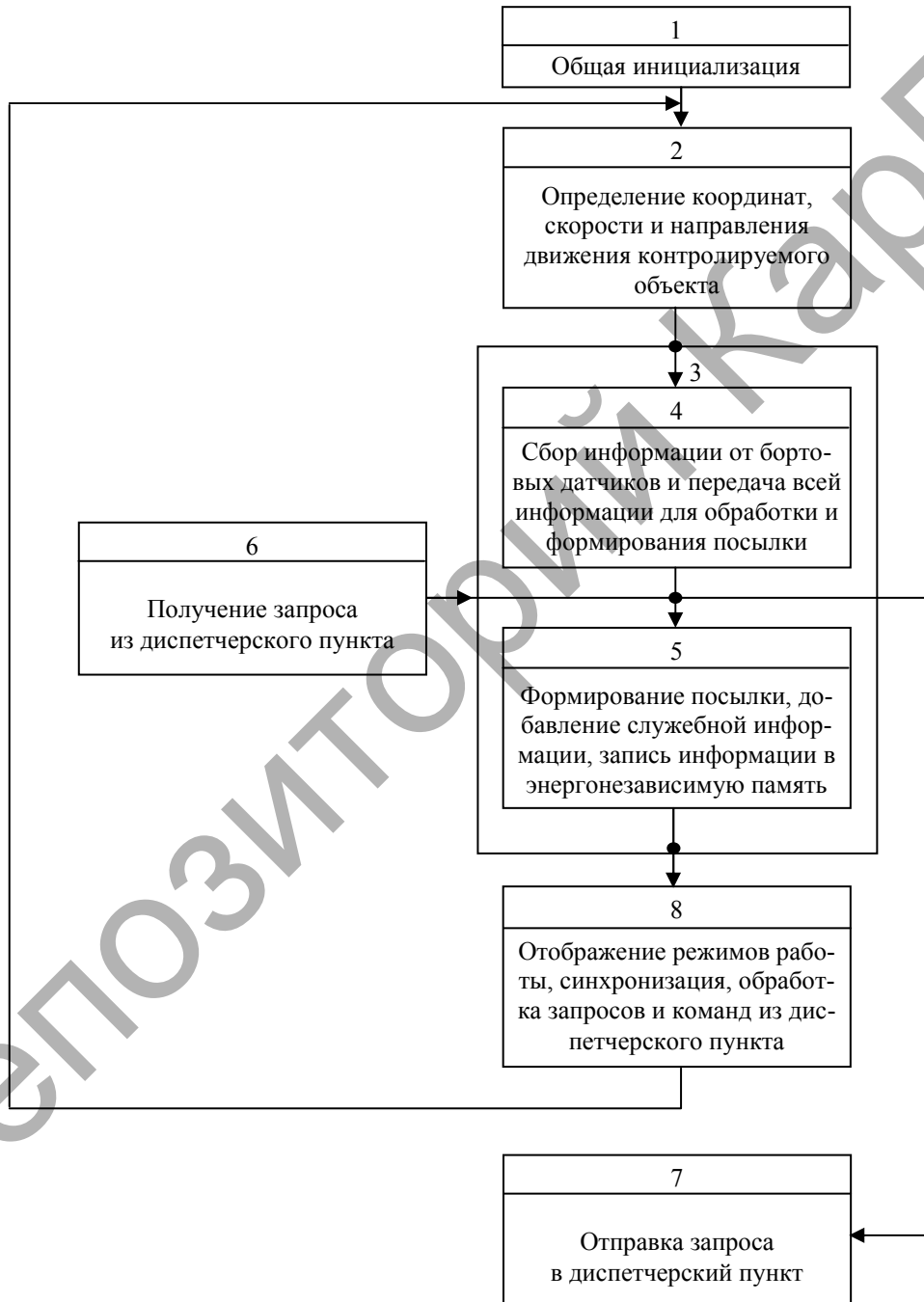


Рисунок 3. Алгоритм работы бортового комплекса для системы сбора данных о состоянии подвижных объектов

Бортовой комплекс для системы сбора данных о состоянии подвижных объектов работает по алгоритму, представленному на рисунке 3. После общей инициализации GPS-приемник определяет ме-

стоположение, скорость и направление движения контролируемого объекта. Затем происходит сбор информации от бортовых датчиков и передача полученной информации для обработки и формирования посылки. После этого идут формирование посылки, добавление служебной информации и запись информации в энергонезависимую память. В конце происходит отображение режимов работы, синхронизация, обработка запросов и команд из диспетчерского пункта. В любой момент времени может поступить запрос из диспетчерского пункта, на который происходит мгновенная отправка информации в диспетчерский пункт.

После завершения очередного цикла обработки информации программное обеспечение трехпроцессорного контроллера переходит в исходное состояние и начинает выполнение очередной итерации цикла обработки и подготовки информации.

Произведенная оценка показала, что в нашем случае $Q \approx 10^{-3} G^0$, т.е. точность работы нашей ИИС на порядок больше, чем в рассмотренных выше аналогах.

Информационно-измерительная система для определения влажности зерна

Случай выполнения условия (14) реализован нами при создании ИИС для измерения влажности зерна [20]. Структурная схема ИИС для определения влажности на основе твердоэлектrolитного датчика представлена на рисунке 4.

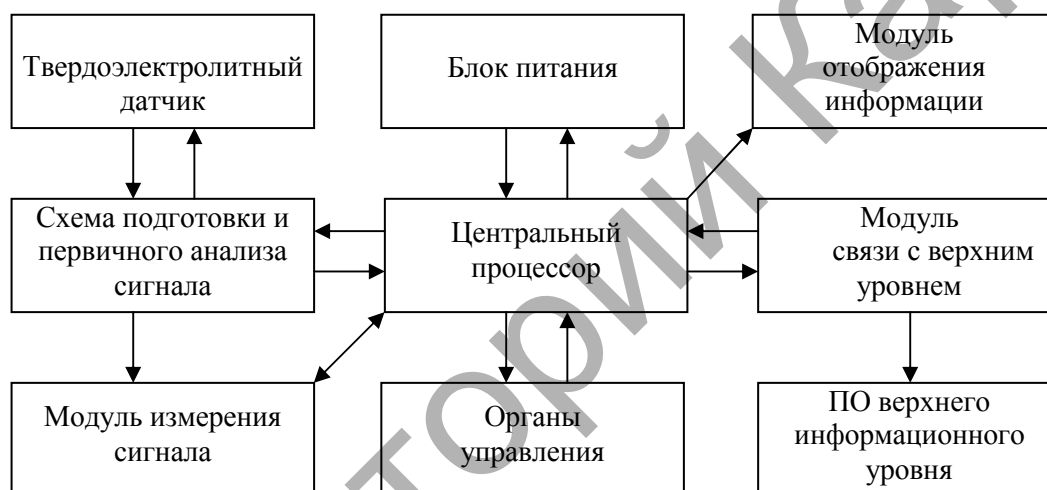


Рисунок 4. Структурная схема ИИС для определения влажности на основе твердоэлектrolитного датчика

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 электролита, 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 [21].

Предложенный в настоящей работе энтропийный анализ ИИС позволяет качественно, а иногда и количественно определить основное направление проектирования ИИС в зависимости от решаемых ею задач.

References

- 1 *Kalashnikov V.I., Nefedov S.V. et al.* The information-measuring techniques and technologies. — Moscow: The High School, 2002. — 587 p.
- 2 *Raneev G.G., Surotina V.A., Kalashnikov V.I.* The information-measuring techniques and electronics. — Moscow: Publishing centre «Academy», 2006. — 512 p.
- 3 *Brjullien L.* Science and the information theory. — Moscow: Physmathgiz, 1960. — 340 p.
- 4 *Poplavsky R.P.* Thermodynamics of information processes. — Moscow: Nauka, 1981. — 255 p.
- 5 *Yavorsky V.V., Jurov V.M.* Applied problems of the thermodynamic analysis of nonequilibrium systems. — Moscow: Energiatomizdat, 2008. — 338 p.
- 6 *Jurov V.M.* Thermodynamics of luminescent systems // *Vestnik KarGU. Physics Ser.* — 2005. — № 2. — P. 13–19.
- 7 *Portnov V.S., Jurov V.M.* Communication of a magnetic susceptibility of magnetic ores with thermodynamic parameters and the iron maintenance // *News of High Schools. Mountain magazine.* — 2004. — № 6. — P. 122–126.
- 8 *Jurov V.M., Eschanov A.N., Sidorenja Ju.S.* Nonequilibrium thermodynamics and radiating decomposition in solid states // *Vestnik KarGU. Physics Ser.* — 2005. — № 1. — P. 4–10.
- 9 *Brjullien L.* Scientific uncertainty and information. — Moscow: Mir, 1966. — 340 p.
- 10 *Mitjugov V.V.* Physical bases of the theory of the information. — Moscow: Soviet Radio, 1976. — 264 p.
- 11 *Schannon K.* Works under the theory of the information and cybernetics. — Moscow: IL, 1963. — 829 p.
- 12 *Kolmogorov A.N.* Three approaches to definition of concept of quantity of the information // *Information transfer Problems*, 1965. — Vol. 1. — № 1. — P. 3–34.
- 13 *Hasen A.M.* Introduction of a measure of the information in axiomatic base of mechanics. — Moscow: RAUB, 1998 — 312 p.
- 14 *Chernavsky D.S.* Synergetic and the information. — Moscow: Editornaja URSS, 2004. — 288 p.
- 15 *Borisov Ju.P.* Mathematical modeling of radio systems. — Moscow: Soviet radio, 1976. — 296 p.
- 16 *Poplavsky R.P.* About thermodynamic limits of accuracy of physical measurement // *Reports of Academy of sciences of the USSR.* — 1972. — Vol. 202. — P. 562–565.
- 17 *Poplavsky R.P.* Thermodynamic models of information processes // *Successes of Physical Sciences.* — 1975. — Vol. 115. — № 3. — P. 465–501.
- 18 *Ten T.L., Yavorsky V.V., Jurov V.M.* Multidimensional distributors of impulses and thermodynamics of information processes // *Vestnik KarGU. Physics Ser.* — 2006. — № 1(41). — P. 26–30.
- 19 *Semkin A.N., Cheremushkin V.I. et al.* On-board system for system maintenance and management of ground vehicles // *A utility model patent № 35677 (Russia).* It is published 10.06.1998. Bulletin № 16.
- 20 *Halenov O. S., Kolesnikov V. A., Jurov V.M.* Humidity gauges on a basis of nanoporous ceramics // *Perspective technologies, the equipment and analytical systems for materials technology and nanomaterials: Works of VIII internat. scient. conf.* — Almaty, 2011. — Part 1. — P. 487–494.
- 21 *Kolesnikov V.A., Halenov O.S. et al.* Information-measuring system for the analysis of harmful gases // *Proceedings of the 8th Internat. scient. conf. dedicated to 40th anniversary of the academician Y.A.Buketov KSU.* — Karaganda: KSU Publ., 2012. — P. 468–472.
- 22 *Grekul V.I., Denishchenko G.N., Korovkina N.L.* Designing of information systems. — Moscow: The Internet university, 2005. — 345 p.

В.А.Колесников, Я.Ж.Байсагов

Ақпараттық-өлшегіш жүйелерді энтропиялық талдау

Мақалада ақпараттық-өлшегіш жүйелерді энтропиялық талдау әдісі ұсынылды. Ақпараттық-өлшегіш жүйелердің каналдарының сыйымдылықтарын ұлғайту арқылы өлшеу дәлдігін арттыруға болатыны көрсетілген. Қолайсыз бөгеттер деңгейімен салыстырғанда ақпараттық-өлшегіш жүйенің тиімді құрылымының шарты анықталған. Алынған нәтижелер авторлардың өңдеген ақпараттық-өлшегіш жүйелерінде келтірілген. Ең жоғары нәтиже бір каналды жүйеде ерекше қасиеттерге ие датчикті қолдану арқылы алынған. Осы ұсынылған талдау ақпараттық-өлшегіш жүйелерді жобалаудың негізгі бағытын сапалы түрде, ал кей жағдайларда атқаратын жұмысына байланысты сандық түрде де анықтауға мүмкіндік береді.

V.A.Kolesnikov, J.Z.Bajsagov

The entropy analysis of information-measuring systems

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.

Репозиторий КАРГУ