

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ

*Докт. техн. наук, проф., лауреат Государственной премии КОЛЕШКО В. М.,  
канд. техн. наук, доц., лауреат Государственной премии ГУЛАЙ А. В., инж. ГУЛАЙ В. А.*

*Белорусский национальный технический университет*

Стремительное развитие такого новейшего научно-технического направления, как информатика, приводит к повышению интереса к моделированию различных информационных систем: коммуникационных, измерительных, сенсорных, вычислительных, кибернетических, интеллектуальных. Причем на современном этапе создания и исследования таких систем происходит отказ от тенденции противопоставления информационных и энергетических процессов, происходящих при их функционировании [1–3]. Напротив, в научно-технической литературе обсуждаются вопросы энергетической сложности различных информационных процедур и определяется энергетическая цена информации. Выясняются предельные соотношения при получении, передаче, хранении и обработке информации, в частности выявляется соотношение между информацией и энтропией.

Существенный интерес представляет использование термодинамических подходов к исследованию информационных процессов в компонентах интеллектуальных сенсорных систем. В связи с этим в работе проанализированы методологические аспекты построения термодинамических моделей функционирования сенсорной и интеллектуальной подсистем. Рассмотрена зависимость количества информации и энтропийной эффективности при сенсорном контроле от его точности. Выполнен анализ энергетической сложности процесса интеллектуальной обработки сенсорной информации. Результаты термодинамического анализа информационных процессов в устройствах сенсорного контроля и обработки информации используются при схемотехническом и технологическом проектировании интеллектуальных сенсорных систем.

**Методология термодинамического моделирования информационных процессов в интеллектуальной сенсорной системе.** При анализе соотношения между энтропией и информацией внимание обращается на основной аспект данного вопроса – на аспект, относящийся к процессам получения информации о макросостояниях термодинамической системы и дальнейшего использования этой информации для реализации управления [4]. Интеллектуальная сенсорная система при ее термодинамическом исследовании рассматривается как часть интеллектуальной системы управления, способной на основе заложенных в ней знаний и полученных сенсорных сведений сформулировать программу воздействия на объект и найти способ оптимальной реализации этой программы (рис. 1) [5]. С этой точки зрения основной чертой интеллектуального сенсорного контроля при термодинамическом моделировании можно считать то, что он непременно связан с некоторым упорядочением в структуре «интеллектуальная сенсорная система – объект управления».

В связи с изложенным выше следует сделать несколько замечаний, касающихся предмета рассмотрения. Проведем анализ термодинамических моделей информационных процессов, протекающих в основных структурно-функциональных компонентах интеллектуальной сенсорной системы: в подсистеме получения информации о контролируемом объекте и подсистеме последующей обработки сенсорных данных. Понимается, конкретные интеллектуальные сенсорные системы содержат, как правило, и другие элементы, реализующие такие информационные процедуры, как передача, кодирование, хранение, вывод сенсорных данных. Подроб-

ные термодинамические модели перечисленных информационных процессов в компонентах сенсорных систем требуют отдельного рассмотрения.

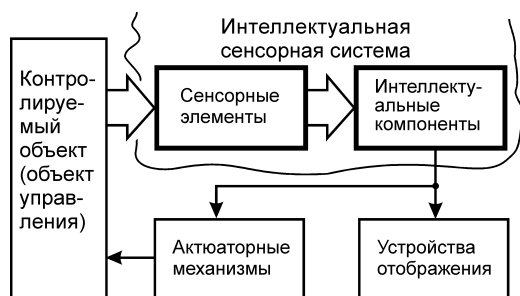


Рис. 1. Структурный состав интеллектуальной сенсорной системы как объекта термодинамического моделирования

Отдельного представления требует проблема термодинамического моделирования информационных процессов в цепи, замыкающей контур управления, – в подсистеме актуаторных механизмов. Более того, особой задачей является термодинамический анализ интеллектуальных функций системы. Так, интеллектуальная система в ходе эксплуатации пополняет базы данных: состояния среды, алгоритмов управления, параметров объекта. На основе анализа ситуации, в которой находится объект, и учета динамики изменения состояния окружающей среды система корректирует программу воздействия на объект. Кроме того, она вырабатывает команды на изменение структуры актуаторных механизмов с таким расчетом, чтобы цель управления была достигнута оптимальным способом.

В основу термодинамической модели функционирования интеллектуальной сенсорной системы в общем случае положен процесс взаимодействия двух тел, который называется элементарным информационным взаимодействием. Рассматриваются две термодинамические подсистемы ( $A, B$ ), находящиеся при температуре  $T$  и имеющие по одной степени свободы. Степени свободы характеризуются параметрами  $a, b$ , значения которых (вместе с  $T$ ) полностью определяют состояние каждой из подсистем  $A, B$ . Если внутренний параметр  $a$  подсистемы  $A$  имеет характер обобщенной силы, взаимодействие подсистем связано с совершением работы над  $B$  силой  $a$ . При этом

сформировавшаяся система  $A-B$  приходит в новое состояние равновесия, характеризуемое определенным (зависящим от  $a$ ) значением параметра  $b$  – обобщенной координаты подсистемы  $B$ .

В процессе взаимодействия подсистеме  $B$  передается энергия  $U$  и рассеивается некоторая энергия  $Q$ , которая определяет рост энтропии окружающей среды  $\Delta S_T = Q/T$ . Описанный процесс взаимодействия подсистем  $A, B$  дает некоторый негэнтропийный эффект (эффект упорядочения), который заключается в том, что ранее не связанные между собой величины  $a$  и  $b$  вследствие взаимодействия соответствующих им термодинамических систем становятся взаимосвязанными. Жесткость этой связи характеризуется точностью определения соответствующих параметров, или, что одно и то же, апостериорной неопределенностью значений параметров после взаимодействия. Под негэнтропией  $\Delta N$  понимается отклонение системы от состояния с максимальной энтропией, характеризующее исходную неравномерность в системе. Однако практически может быть установлена не начальная негэнтропия, а энергетическая цена информации, т. е. значение энергии  $Q$ , которую необходимо рассеять для достижения определенного информационного эффекта (например, получения заданной точности при сенсорном контроле).

Таким образом, основной проблемой моделирования термодинамики информационных процессов в интеллектуальной сенсорной системе будем считать определение энергетической цены информации при ее преобразовании элементами данной системы. Конкретнее эта задача состоит в оценке энтропийной эффективности сенсорного контроля, дающего негэнтропийный эффект, и определении энергетической сложности процесса обработки сенсорной информации, не обладающего негэнтропийным эффектом.

Рассмотрим термодинамическую модель, отражающую преобразование энтропии в информацию, а последней – в негэнтропию. Негэнтропийный принцип информационных процессов для рассматриваемой модели записывается в виде

$$\Delta S_T > \Delta I > \Delta N, \quad (1)$$

где  $\Delta I$  – количество информации, полученной в процессе сенсорного контроля. Приведенные неравенства характеризуют основные причины того, что энергетическая эффективность информационных процессов  $\eta = \Delta N / \Delta S_T < 1$  (более того,  $\eta \ll 1$ ). Во-первых, энергетическая цена информации обязательно больше  $T$ , т. е.  $\Delta S_T > \Delta I$ , во-вторых, при упорядочении негэнтропийный эффект всегда меньше информационного, т. е.  $\Delta I > \Delta N$ . Указанное значение  $\eta$  говорит о том, что все способы получения информации о макросостояниях системы и процедуры упорядочения информации строго необратимы.

Введение элементарного информационного взаимодействия, при котором ранее не связанные между собой подсистемы, находящиеся в состоянии равновесия, приводятся во взаимодействие, приносит существенную особенность в рассмотрение принятой термодинамической модели. В данном случае наблюдается своеобразный переходный процесс, когда образовавшаяся сложная система релаксирует к новому состоянию равновесия. Для анализа данного переходного процесса принципиально не подходит идеализация, связанная с обратимыми процессами. Наличие негэнтропийного эффекта (за счет возникновения связи между двумя ранее независимыми параметрами) нарушает аддитивность энтропии: энтропия сложной системы меньше суммы энтропий ранее не взаимодействовавших подсистем. Поэтому в процессе взаимодействия обязательно происходит компенсирующая это уменьшение энтропии диссипация энергии, при этом скорость взаимодействия подсистем всегда отлична от нуля.

Определение границы необратимости информационных процессов, протекающих в компонентах интеллектуальной сенсорной системы, – одна из основных задач их термодинамического моделирования. Следует отметить, что взаимодействие анализируемых подсистем и переход сенсорной системы в новое равновесное состояние происходят в случае любых информационных процессов в ней. Можно сказать, функционирование интеллектуальной сенсорной системы как информационного объекта характеризуется термодинамической моделью переходных процессов при реализации контроля.

Особенностью принятой модели является также признание решающей роли флуктуаций и принципиальной невозможности пренебрежения ими. Информация содержится лишь в тех степенях свободы системы, в которых средняя энергия превышает значение  $T/2$ . Поэтому точность сенсорного контроля и количество полученной при контроле информации ограничиваются тепловыми флуктуациями. При заданной  $T$  не может быть уменьшена абсолютная погрешность контроля, хотя относительная погрешность может быть получена сколь угодно малой за счет увеличения энергии  $U$  взаимодействия подсистем. Однако с повышением  $U$  увеличивается диссипируемая энергия  $Q$  и, следовательно, происходит рост энтропии, компенсирующий полезный эффект в системе.

**Термодинамическая модель процесса получения сенсорной информации при реализации контроля.** Наиболее подходящим для нашего рассмотрения является определение сенсорного контроля как процесса однозначного преобразования контролируемой физической величины в некоторую другую величину, характеризуемую электрическим параметром. Однако для термодинамического анализа процесс сенсорного контроля требует своего особого определения: необходимо представить сенсорный контроль как термодинамический процесс перехода системы из одного равновесного состояния в другое. Поэтому для выяснения общих термодинамических закономерностей процесса сенсорного контроля рассмотрим последовательную цепь преобразований из нескольких этапов (рис. 2). Здесь приняты следующие условные обозначения: КО – контролируемый объект; ЧЭ – чувствительный элемент; СИ – сенсорный интерфейс; РУ – регистрирующее устройство;  $l$  – свойство объекта;  $\lambda$  – контролируемый параметр;  $q$  – обобщенная координата;  $F$  – обобщенная сила;  $\psi$  – промежуточный параметр;  $\xi$  – регистрируемая величина.

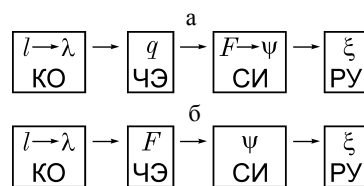


Рис. 2. Преобразование физических параметров в процессе сенсорного контроля при его термодинамическом моделировании: использование чувствительного элемента:  
а – без самогенерации; б – с самогенерацией

Очень часто контролируемое свойство  $l$  исследуемого объекта не может быть определено напрямую как физическая величина, воспринимаемая чувствительным элементом сенсорной системы. Поэтому промежуточный этап преобразования  $l \rightarrow \lambda$  учитывает, что контролируемая величина  $l$  входит во внутренний параметр объекта  $\lambda$  и отображается данным параметром, пригодным для восприятия чувствительным элементом. Изложенное можно пояснить на примерах возможных пар  $l \rightarrow \lambda$ : концентрация газа в смеси ( $l$ ) – количество адсорбированных молекул на поверхности ( $\lambda$ ) [6]; содержание органических веществ в почве ( $l$ ) – отражательная способность почвы ( $\lambda$ ) [7].

Следующим этапом является преобразование (которое производится с помощью чувствительного элемента сенсорной системы) контролируемого параметра  $\lambda$  в обобщенную координату  $q$  ( $\lambda \rightarrow q$ ) или обобщенную силу  $F$  ( $\lambda \rightarrow F$ ). Этап  $\lambda \rightarrow q$  реализуется в сенсорах без самогенерации, когда в процессе контроля вариации параметра  $\lambda$  приводят к изменению величины  $q$ , за счет чего производится модуляция напряжения или тока внешнего источника. Указанная модуляция осуществляется на следующем этапе преобразования ( $q \rightarrow F$ ) и реализуется с помощью сенсорного интерфейса. Непосредственное преобразование  $\lambda \rightarrow F$  происходит в сенсорных элементах с самогенерацией. Примерами сенсоров без самогенерации могут служить электростатические и тензорезистивные сенсоры, а сенсорами с самогенерацией являются, например, пьезоэлектрические и фотоэлектрические сенсорные элементы. В сенсорной системе для контроля газовой среды параметром  $q$  является сопротивление чувствительного элемента, а в системе цветоцветового контроля почвы осуществляется непосредственное преобразование  $\lambda \rightarrow F$ . Этап  $l \rightarrow \lambda$  может реализовываться в процедуре контроля неявно, когда наблюдение  $q$  или  $F$  производится при настройке сенсорной системы непосредственно на параметр  $l$ . При этом параметр  $\lambda$  выпадает из поля зрения исследователя, и наблюдаемым в таком случае является преобразование  $l \rightarrow \rightarrow q$

или

$$l \rightarrow \rightarrow F.$$

Действие обобщенной силы  $F$  (тока или напряжения) на устройство отображения (регистрации, управления), приводящее к соответствующему изменению  $\xi$ , реализуется не непосредственно, а через промежуточный параметр  $\psi$ . Например, если  $F$  – ток через газовый сенсор сопротивления, а  $\xi$  – концентрация того или иного компонента в газовой смеси, то  $\psi$  – отклонение величины тока от первоначального значения [6]. Если  $F$  – напряжение с фотодиода, принимающего оптическое излучение, отраженное от поверхности, а  $\xi$  – коэффициент яркости поверхности, то  $\psi$  – отношение напряжений при отражении излучения от исследуемой и эталонной белой поверхности [7]. Таким образом, часто этап  $F \rightarrow \psi$  отображает функцию сравнения  $F$  с неким эталоном контролируемой величины; это может быть, например, нулевое значение, оптимальный уровень, шкала измерения. Следует отметить, что предельные соотношения определяются непосредственным преобразованием  $F \rightarrow \xi$ , а введение любого дополнительного этапа ухудшает термодинамические (энергетические) оценки.

При наличии сенсора с самогенерацией источником свободной энергии, обеспечивающей взаимодействие исследуемого объекта с устройством отображения, является чувствительный элемент сенсора. В случае использования сенсора без самогенерации источник свободной энергии – это источник тока или напряжения, подключаемый с помощью сенсорного интерфейса. Таким образом, для термодинамического анализа сенсорного контроля в общем случае модель элементарного информационного взаимодействия усложняется за счет того, что в ее состав включаются чувствительный элемент сенсора и сенсорный интерфейс, введенные в одну из взаимодействующих подсистем. Функция сенсорного интерфейса заключается, например, в сравнении сигналов, линейаризации характеристик, частотной фильтрации, компенсации напряжения.

На основании приведенного описания элементарного информационного взаимодействия можно следующим образом конкретизировать

общий подход к термодинамическому моделированию сенсорного контроля. Сенсорный контроль связан с взаимодействием таких подсистем, как исследуемый объект, обладающий комплексом физических свойств (информативных параметров), и устройство, воспринимающее сенсорную информацию об этом объекте. Причем это взаимодействие обуславливает обмен энергией между указанными подсистемами, вследствие чего изменяется значение параметра  $\xi$  подсистемы регистрации. Диссипативные процессы, связанные с энергетическим обменом, являются единственной возможной причиной необратимости сенсорного контроля физических параметров.

Процесс сенсорного контроля основан на том, что имеется однозначное соответствие между средними (по реализации флуктуаций) значениями  $F$ ,  $\psi$ ,  $\xi$ , поэтому по значению  $\xi$  судят о величине  $F$  и соответственно о свойствах  $I$  изучаемого объекта. Предполагается, что между значениями  $F$ ,  $\psi$ ,  $\xi$  существует линейная зависимость, а их тепловые флуктуации играют роль неустраняемого фактора, привносящего погрешности в сенсорный контроль. Следует добавить, что такое представление сенсорной процедуры, когда значение параметра определяется на основании известной зависимости между этим параметром и непосредственно контролируемой величиной, требует отнесения рассматриваемого процесса к косвенному контролю.

Важной термодинамической характеристикой сенсорного контроля является количество информации  $I$ , получаемое при реализации данного процесса. Первостепенное значение для термодинамики информационных процессов в сенсорной системе имеет относительная точность, которая определяется как величина, обратная относительной погрешности  $\sigma$ . Количество информации при сенсорном контроле, являющееся функцией  $\sigma$ , можно представить следующим выражением [4]:

$$I = (1/2) \ln(1/\sigma^2 + 1) = \begin{cases} \ln(1/\sigma) & \text{при } \sigma^2 \ll 1, \\ 1/2\sigma^2 & \text{при } \sigma^2 \gg 1. \end{cases} \quad (2)$$

При достаточно высоком значении  $1/\sigma$  (высокоточный контроль) количество информации

определяется логарифмом относительной точности, а при сравнительно грубом определении физических величин ( $1/\sigma^2 \ll 1$ ) количество информации зависит от квадрата относительной точности сенсорного контроля.

Для термодинамического анализа процесса сенсорного контроля выполняется также оценка негэнтропийного эффекта, сопровождающего реализацию данной процедуры. При минимальном росте энтропии  $\Delta S_T \geq 2/\sigma$  (в случае условно обратимого процесса) и при  $\Delta N = I$  значение энтропийной эффективности составляет [4]

$$\eta \leq \eta_{\max} = (\sigma/2) \ln(1/\sigma) = (I/2) \exp(-I) \ll 1, \quad \sigma \ll 1, \quad (3)$$

где  $\eta_{\max}$  – энтропийная эффективность процесса сенсорного контроля при его реализации, предельно близкой к обратимой. При увеличении погрешности контроля (уменьшении полезного эффекта) энтропийная эффективность растет, однако она никогда не достигает значения 1. Необходимо подчеркнуть, что энтропийная эффективность тем ниже, чем выше полезный негэнтропийный эффект, который равен количеству полученной информации. Поэтому  $\eta$  в данном случае можно интерпретировать как информационный КПД процесса сенсорного контроля.

**Термодинамическая модель процесса интеллектуальной обработки информации в сенсорной системе.** Процесс обработки сенсорной информации в общем случае можно представить как процедуру, состоящую из последовательно и параллельно реализуемых элементарных актов преобразования данных. Причем в каждом элементарном акте преобразования проводится вычисление какой-то одной определенной функции. Формально элементарным актом обработки информации является однозначное отображение  $\Gamma$  множества элементов  $\xi$  в множество элементов  $\Gamma\xi = f$ , когда оба указанных множества являются подмножествами некоторого множества чисел. В анализе процесса обработки сенсорной информации значения  $\xi$  получают в результате контроля не только по алгоритму, представленному выше, но и любым другим способом, например путем непосредственного определения интересующей

го параметра. Такая схема, по сути, включает в себя сенсорный процесс получения  $\xi$  и процедуру последующего установления  $f(\xi)$  путем обработки сенсорных данных. В любом случае определение параметра  $\xi$  и дальнейшее преобразование соответствующей ему физической величины в значение функции  $f(\xi)$  можно считать косвенным контролем  $f(\xi)$ .

Например, при нейросетевой обработке сенсорной информации процессором, реализующим элементарный акт преобразования данных, является искусственный нейрон, использованный в узлах нейронной сети. Функция, которую реализует формальный нейрон, имеет вид

$$y = \Phi(g) = \Phi\left(\sum_{i=1}^n a_i x_i + a_0\right), \quad (4)$$

где  $y$  – выходной сигнал нейрона;  $\Phi(g)$  – функция выходного блока нейрона;  $x_i$  –  $i$ -й входной сигнал;  $a_i$  – вес  $i$ -го входа – постоянный коэффициент;  $a_0$  – начальное состояние (возбуждение) нейрона;  $i = 1, 2, \dots, n$  – номер входа нейрона;  $n$  – число входов [8].

Процесс обработки сенсорных данных с помощью классического нейрона заключается в следующем. Сигналы чувствительных элементов сенсорной подсистемы после предварительной обработки поступают на  $n$  входов нейрона. Каждый  $i$ -й входной сигнал умножается на синаптический коэффициент  $a_i$ . Взвешенные входные сигналы и начальное возбуждение  $a_0$  алгебраически складываются в блоке сумматора, затем результат суммирования (взвешенная сумма)  $g$  подвергается преобразованию  $\Phi(g)$ .

Нейронная сеть представляет собой динамическую систему, состоящую из совокупности связанных между собой (по типу узлов направленного графа) формальных нейронов и способную генерировать выходную информацию в ответ на входное воздействие. Когда ее входу соответствует вектор  $X$  с координатами  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , а выходу – вектор  $Y$  с координатами  $(y_1, y_2, \dots, y_m)$ , нейронная сеть отображается в виде некоторой многомерной функции  $\Gamma: X \rightarrow Y$ . Таким образом, нейронная сеть реализует преобразование входных сигналов  $x_i, i = 1, 2, \dots, n$  (разрозненной сенсорной инфор-

мации о контролируемом объекте) в выходные сигналы  $y_j, j = 1, 2, \dots, m$  (понятия об этом объекте).

Ограничимся в нашем исследовании термодинамической модели интеллектуального компонента сенсорной системы анализом элементарного акта обработки сенсорной информации. В данном случае  $\xi$  может представлять собой скаляр, а процесс преобразования будет сводиться к реализации функции одной переменной. При реализации с помощью интеллектуальной системы функции  $n$  переменных  $\Xi$  является вектором с координатами  $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ . При этом вместо одной используется множество степеней свободы: скалярной величине приводится в однозначное соответствие вектор, каждая из составляющих которого требует существенно меньшей точности представления, чем исходный скаляр. Для скаляров характерно следующее: при высокой точности энергетические затраты растут экспоненциально с увеличением количества информации о данной скалярной величине. При росте количества информации не за счет точности, а вследствие увеличения числа составляющих, энергетические затраты пропорциональны увеличению количества информации, т. е. числу составляющих.

При термодинамическом анализе обработки сенсорных данных как информационного процесса целесообразно характеризовать сложность процедуры рассеянной энергией. Причем в отличие от сенсорного контроля, сложность которого зависит от точности, в случае обработки информации сложность анализируемого процесса зависит как от точности, так и от вида обработки. В выбранной схеме термодинамического анализа (рис. 3) приняты следующие условные обозначения: ИП – интеллектуальная подсистема;  $\xi$  – исходная (контролируемая) величина (число);  $x = \sqrt{A}\xi$  – результат контроля в виде электрического сигнала (на входе схемы обработки);  $f$  – значение функции (число);  $y = \sqrt{A}f$  – электрический сигнал представления функции (на выходе схемы обработки). Для амплитудного кодирования исходной ( $\xi$ ) и искомой ( $f$ ) переменных принят один и тот же коэффициент  $\sqrt{A}$ , так как одни и те же величины

сигналов  $(x, y)$  должны соответствовать одинаковым числам  $(\xi, f)$ .

Энергетический коэффициент  $A$  полностью определяется относительной точностью представления чисел (в данном случае приведенной относительной погрешностью  $\sigma_0$ ). Поскольку принят единый кодирующий множитель  $A$  для обеих переменных  $(\xi, f)$ , то проводится изменение масштаба исходной переменной (перенормировка ее) таким образом, чтобы область ее определения увеличилась пропорционально изменению точности. То есть численный масштаб исходной переменной  $\xi$  увеличивается пропорционально повышению точности ее представления по сравнению с точностью представления функции  $f$ . При таких условиях в термодинамическом моделировании рассматриваемого процесса стоит задача определения связи между значениями точности представления функций  $\xi$  и  $f$ .

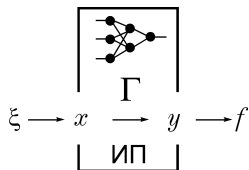


Рис. 3. Представление процесса интеллектуальной обработки сенсорной информации в термодинамической модели

Следует отметить, что скалярной характеристики недостаточно для оценки качества обработки информации, в данном случае продуктивно векторное представление функций с интегрируемым квадратом в виде точек (векторов) в гильбертовом пространстве  $L_2$ . Средняя энергия сигнала  $\langle y^2 \rangle$  в пространстве  $L_2$  пропорциональна  $\langle f^2 \rangle : \langle y^2 \rangle = \|f\|^2$ , где  $\|f\|$  – норма функции в  $L_2$ .

Поскольку требования к точности  $1/\sigma_{0f}$  реализации  $f(\xi)$ , как правило, заданы, то по заданным параметрам определяются требования к точности представления исходной переменной  $\xi$  (точности результата сенсорного контроля):

$$\sigma_{0\xi}^2 = \sigma_{0f}^2 \|df/d\xi\|^2. \quad (5)$$

При некоторых допущениях из анализа данного выражения следует:  $1/\sigma_{0\xi} \geq 1/\sigma_{0f}$ . Это соответствует представлению о том, что количество исходной информации ( $I \sim \ln(1/\sigma)$ ) должно

быть не меньше конечной информации. Данное неравенство тем сильнее, чем больше осциллирует  $f(\xi)$  – именно отсюда следует вывод о необходимости увеличения масштаба исходной переменной.

Таким образом, простейший способ реализации процесса обработки сенсорной информации по предложенной схеме состоит в контроле  $\xi$  с точностью, задаваемой условием (5), и в последующем преобразовании контролируемой величины  $\xi$  в  $f(\xi)$ . Интеллектуальную составляющую сенсорной системы при этом можно рассматривать как нелинейный функциональный преобразователь, с помощью которого реализуется процесс обработки информации последовательно с сенсорным контролем. Для такой модели, характеризующей косвенный метод сенсорного контроля, выражение для энергетической сложности можно представить в следующем виде [4]:

$$Z_{\xi,f} = A \|f\|^2 (1 + \|df/d\xi\|^2). \quad (6)$$

Если используется скалярный преобразователь, то точность скалярной величины, однозначно соответствующей векторной, заданной  $n$  переменными, растет экспоненциально с увеличением  $n$ . Например, для двоичного  $n$ -разрядного числа точность соответствующей ему скалярной величины равна  $2^n$ , а энергия сигнала имеет порядок  $2^{2n}T$ .

Особенность данной модели заключается в том, что, даже если  $f(\xi)$  приближается к  $\xi$  ( $f \rightarrow \xi$ ,  $df/d\xi \rightarrow 1$ ), эта модель требует удвоенных по сравнению с сенсорным контролем энергетических затрат. Поэтому термодинамическая модель модифицируется таким образом, чтобы в ней при  $f \rightarrow \xi$  реализовался предельный переход к преобразованию контролируемой физической величины, т. е. осуществлялось приближение всего процесса «сенсорный контроль – обработка данных» к энергетическому представлению операции сенсорного контроля.

В модифицированной модели близость функций на входе и выходе характеризуется расстоянием  $\rho^2(f, \xi) = \|\varphi(\xi)\|^2$ , где  $\varphi(\xi) = f(\xi) - c\xi$ ;  $c$  – коэффициент. В системе обработки информации реализуются энергетические (амплитудные) скачки  $\varphi_i = f_i - c\xi_i$  (здесь  $\|\varphi\| \ll \|f\|$ ), и в устройстве обработки информации исполь-

зуется энергия каждого  $i$ -го входного сигнала  $sx_i$ . Следует указать, что для обработки информации необходимо знание величины реализуемых энергетических скачков  $\phi_i$ , соответствующих каждому  $\xi_i$  на входе. В такой модели при  $\|\phi(\xi)\| = \rho(f, \xi) \rightarrow 0$  энергетическая сложность процесса обработки информации составляет

$$Z_{\xi f} = A\|f\|^2[1 + (\|\phi\|^2\|d\phi/d\xi\|^2)/\|f\|^2]. \quad (7)$$

В данном случае при  $\|df/d\xi\| \rightarrow 1$ ,  $\phi \rightarrow 0$  энергетическая сложность  $Z_{\xi f}$  вдвое меньше, чем по модели (6). Отметим также: вследствие того, что  $\|\phi\| \ll \|f\|$ , и при  $\|df/d\xi\| \sim 1$  энергетические затраты на сенсорный контроль и обработку информации по модели (7) могут быть существенно меньше по сравнению с термодинамической моделью (6).

## ВЫВОДЫ

Представлена термодинамическая модель, отображающая связь информационных и энергетических характеристик процесса функционирования интеллектуальной сенсорной системы. Рассмотрена проблема диссипации энергии в информационных процессах сенсорного контроля физических величин и интеллектуальной обработки сенсорных данных. Приведены причины того, что энергетическая эффективность информационных процессов в сенсорном контроле меньше единицы, что говорит об их принципиальной необратимости. Показаны ограничения точности сенсорного контроля и количества полученной информации, обусловленные тепловыми флуктуациями.

Проанализирована последовательность преобразования параметров в процессе сенсорного контроля для случая использования сенсора с самогенерацией и сенсора без самогенерации. Показано, что при высокоточном контроле количество информации определяется логарифмом относительной точности, а при сравнительно грубом контроле физических величин данный параметр зависит от квадрата относительной точности. Представлена зависимость величины энтропийной эффективности процедуры сенсорного контроля от его относительной погрешности.

Интеллектуальный модуль сенсорной системы рассмотрен как нелинейный функцио-

нальный преобразователь, с помощью которого реализуется процесс обработки информации

последовательно с сенсорным контролем. Для такой модели, характеризующей косвенный метод сенсорного контроля, проанализированы особенности энергетической сложности процедуры обработки данных. Представлена также термодинамическая модель, в которой входной сигнал реализуется в виде отдельных энергетических скачков. Показаны возможности снижения в данной модели энергетической сложности процесса обработки сенсорной информации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко, В. М. Туннельные МДМ-наносенсоры: стратегии и технологии моделирования / В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 9. – С. 46–52.
2. Колешко, В. М. Моделирование квантовых сенсорных наноструктур: интегративные подходы к созданию моделей / В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай // Технические средства защиты информации: тез. докл. VII Белорус.-Рос. науч.-техн. конференции, Минск, 23–24 июня 2009 г. – Минск, 2009. – С. 47–48.
3. Колешко, В. М. Моделирование транспортных свойств туннельных сенсорных наноструктур / В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай // Наноструктурные материалы – 2008: Беларусь – Россия – Украина (НАНО-2008): материалы I междунар. науч. конф., Минск, 22–25 апреля 2008 г. – Минск, 2008. – С. 602–603.
4. Поплавский, Р. П. Термодинамика информационных процессов / Р. П. Поплавский. – М.: Наука, 1981. – 256 с.
5. Колешко, В. М. Синтез сенсорных и интеллектуальных технологий в научном познании / В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай // Вышэйшая школа. – 2011. – № 2. – С. 53–57.
6. Колешко, В. М. Мультисенсорная интегральная микросистема для интеллектуального контроля многокомпонентных газов / В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай // Электроника-инфо. – 2010. – № 2. – С. 63–67.
7. Интеллектуальная сенсорная система светоцветового контроля почвы: реализация функций самодостаточности / Колешко В. М. [и др.] // Вестник БНТУ. – 2011. – № 2. – С. 55–62.
8. Комарцова, Л. Г. Нейрокомпьютеры / Л. Г. Комарцова, А. В. Максимов. – М.: Изд-во МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2002. – 320 с.

Поступила 14.10.2011