ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.3.083.92

Т.Л.Тен , В.В.Яворский , В.М.Юров

ТЕРМОДИНАМИКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Развитие классической термодинамики в середине XIX века стимулировалось потребностями в источниках энергии. Создание тепловых машин и вопросы преобразования энергии определили надолго интерес к энергетическим процессам. Первая работа С.Карно [1] положила начало термодинамике. Развитие феноменологической термодинамики в дальнейшем связано с работами В.Томсона [2] и Клаузиуса [3]. Началу статистической термодинамики положили работы Максвелла [4], Больцмана [5], Планка [6] и Гиббса [7]. Из этих работ видно, что классическая термодинамика – это термодинамика энергетических процессов. Ее основной объект исследования - равновесные состояния. При этом относительные флуктуации любой макроскопической величины малы вследствие очень большого числа частиц в системе.

В середине XX века благодаря работам голландско-бельгийской школы (Пригожин, де Грот, Мазур и их сотрудники) сложилась термодинамика необратимых процессов [8, 9], которая рассматривает не равновесные, но стационарные состояния. Пригожин предложил новый общий принцип - принцип наименьшего производства энтропии, оказавшийся для решения практических задач более удобным, чем принцип Оснагера.

Венгерский физик И.Дьярмати [10] поставил вопрос о соотношении между принципами Онсагера и Пригожина и формах уравнений последующих приближений, поскольку уравнения Онсагера являются линейным приближением. Дьярмати удалось найти общие положения неравновесной термодинамики и проверить их правильность на ряде частных задач.

Термодинамика необратимых процессов – это термодинамика открытых систем. В последние десятилетия термодинамика открытых систем получила большое развитие, благодаря основополагающим работам Пригожина [11] и Хакена [12]. Последнему принадлежит и термин «синергетика» - нового объединяющего междисциплинарного направления, выявившего принципиальную роль коллективных, кооперативных взаимодействий в возникновении и поддержании процессов самоорганизации в различных открытых системах.

Отметим также, что практически параллельно развивалась (работы Стратоновича [13] и др.) и нелинейная статистическая термодинамика необратимых процессов, получившая широкое применение в самых различных областях техники.

Становление теории информации в середине XX века связано с работами В.А.Котельникова [14] и К.Шеннона [15], также 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.

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, выяснения предельных соотношений при получении, хранении и обработке информации. Это послужило основой для известного высказывания фон Неймана: «…термодинамика является той частью теоретической физики, которая в некоторых из своих аспектов наиболее близка теории обработки и измерения информации…» [16]. Таким образом, потребности техники и развитие науки привели к возникновению термодинамики информационных процессов, основы которой были заложены в 1956 г. Бриллюэном в его книге [17]. Однако существенного внимания со стороны исследователей вопросы термодинамики информационных процессов не получили.

Исключение составляют основополагающие работы Р.П.Поплавского, подытоженные в его монографии [18]. 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).

80- 90-е годы XX века стали временем бурного развития (и в настоящее время) синергетики, основу которой составляет термодинамика отрытых систем, в связи с выявлением глубокой связи

между информацией и самоорганизацией материи.

Тем не менее, развитие информационно-измерительных систем (телемеханики и т.д.) настоятельно требует выявления тех или иных термодинамических ограничений как на структуру самих систем, так и на информационные процессы, включая управление или активное измерение.

Изложенный нами 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. Такой подход оправдал себя применительно к процессам совершенно различной природы [19, 20].

Рассмотрим информационно-измерительную систему как систему невзаимодействующих ячеек, погруженную в термостат. Квантовые переходы, обусловленные взаимодействием ячеек с термостатом, будут диссипативными (с вероятностью P) в отличие от взаимодействия с внешним полем (с вероятностью F). Диссипативные процессы приводят к тому, что вторичное поле всегда меньше первичного.

Поскольку подсистема ячеек обменивается с термостатом только энергией, то соответствующий им ансамбль будет каноническим. Тогда выражение для статистической энтропии имеет вид:

$$S = -k\sum_i f_i \ln f_i , \qquad (1)$$

где k - постоянная Больцмана.

Дифференцируя (1) по времени и преобразуя, получим:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k}{2}\sum_{i,j}\left(lhf_i - \ln f_j\right)\left(P_{ij} f_i - P_{ji} f_j\right), \qquad (2)$$

где P_{ij} - вероятность перехода из начального i (с энергией E_i) в возбужденное состояние j (с энергией E_j).

Для диссипативных процессов принцип детального равновесия имеет вид:

$$\frac{g_i P_{ij}}{g_j P_{ji}} = e^{\frac{E_j - E_i}{kT}}, \qquad (3)$$

где g_i , g_j - статистические веса для уровней E_i и E_j

Тогда (2) примет вид:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k}{2} P_{ij}\left(\ln f_i - \ln f_j\right)\left(f_i - \frac{g_i}{g_j} f_j e^{-\frac{E_i - E_j}{kT}}\right), \qquad (4)$$

Каноническая функция распределения:

$$f_{ij} = \frac{1}{Z} e^{-E_{ij}/kT} , \qquad (5)$$

где статистическая сумма:

$$Z = e^{-G/kT} , \qquad (6)$$

G - потенциал (свободная энергия) Гиббса системы термостат + система ячеек.

Положим, что неконфигурационная часть потенциала Гиббса линейно зависит от числа N ячеек:

$$e^{-G/kT} = \sum_N h(N), \qquad (7)$$

$$h(N) = \omega(N)\cdot e^{G/kT} , \qquad (8)$$

где $\omega(N)$ - статистический вес.

После громоздких, но простых вычислений нетрудно показать, что функция $h(N)$ представляет собой распределение Гаусса около равновесного значения $\overline{N}$ с малой дисперсией, т.е.:

$$h(N) = h(\overline{N}) e^{-\Delta\overline{N}^2/N} . \qquad (9)$$

Подставляя (9) в (7), имеем:

$$exp(-G/kT) = h(\overline{N})\sum_{\Delta N} exp(-\Delta\overline{N}^2/\overline{N}) \qquad (10)$$

Для оценки суммы в (10) заменим ее интегралом:

$$\sum_{\Delta N} e^{-\Delta\overline{N}^2/\overline{N}} = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2/\overline{N}} dx = \sqrt{\pi x} .$$

Тогда (10) принимает вид:

$$e^{-G/kT} = h(\overline{N})(\pi\overline{N})^{1/2}. \qquad (11)$$

Воспользовавшись (8) и прологарифмировав (11), находим:

$$G/kT = -\ln\omega(\overline{N}) + \frac{G(\overline{N})}{kT} + \frac{1}{2}\ln(\pi\overline{N}) , \qquad (12)$$

где $G(\overline{N})$ - часть общего потенциала Гиббса, связанная с числом ячеек. Из оценки первого логарифмического члена следует:

$$\ln\omega(\overline{N}) = N\ln\left(1 + \frac{\overline{N}}{N}\right) + \overline{N}\ln\frac{N + \overline{N}}{N} . \qquad (13)$$

Аппроксимируя логарифм в первом слагаемом правой части (13) первым членом его разложения в ряд, а второе слагаемое, выражая через потенциал Гиббса системы ячеек G^f , получим:

$$\ln\omega(\overline{N}) = \overline{N} + \overline{N}G^f / kT. \qquad (14)$$

Подставляя (14) в (12) и пренебрегая членом $\ln(\pi\overline{N})/2$ по сравнению с $\overline{N}$, получаем:

$$G = G(\overline{N}) - \overline{N}G^f - \overline{N}kT. \qquad (15)$$

Как и выше, считая, что термодинамический потенциал $G(\overline{N})$ зависит от числа ячеек G^f линейным образом, т.е.:

$$G = G^0 + \overline{N}G^f , \qquad (16)$$

где G^0 - термодинамический потенциал термостата, находим:

$$G = G^0 - \overline{N}kT. \quad (17)$$

С учетом (17) выражение (6) преобразуется к виду:

$$Z = e^{-G^0/kT} e^{\overline{N}}. \quad (19)$$

Подставляя (18) в (4), находим:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k}{2} \times$$

$$\sum_{i,j} P_{ij} e^{G^0/kT} e^{-\overline{N}} e^{-E_i/kT} \left(\frac{E_j - E_i}{kT} \right) \left(1 - \frac{g_i}{g_j} e^{2\frac{E_i - E_j}{kT}} \right). \quad (20)$$

Пренебрегая малыми членами и заменяя в (19) сумму интегралом, получим:

$$P = \frac{2\Delta S}{k\tau} exp\left\{ - \frac{E_m - G^0/N}{kT} \right\}, \quad (21)$$

где ΔS - изменение энтропии в диссипативном процессе; E_m – среднее значение энергии основного состояния ячейки; τ – время релаксации.

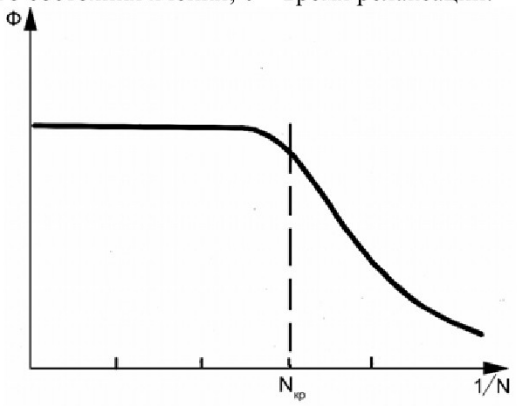

Рис. 1. Зависимость Ф от N

Эффективность работы распределителя определим как функцию отклика системы *N* ячеек:

$$\Phi = \frac{F}{F + P}, \quad (22)$$

где $F = 1/\tau_p$, τ_p - длительность импульса.

С учетом (22) имеем:

$$\Phi = \frac{1}{1 + \frac{2\Delta S}{k} \frac{\tau_p}{\tau} exp\left\{ - \frac{E_m - G^0/N}{kT} \right\}}. \quad (23)$$

Функция Φ зависит от числа ячеек, как это показано на рис.1.

Из рис.1 видно, что число ячеек распределителя ограничено некоторым конечным значением $N_{кр}$, которое, в общем случае, зависит от используемой элементной базы и ее свойств.

З а к л ю ч е н и е

Из приведенной выше модели следуют следующие выводы:

- эффективность работы распределителя импульсов экспоненционально зависит от канальной емкости. Это значительно более сильная зависимость, чем это следует из обычных подходов;

- точность информационно-измерительной системы можно повысить путем увеличения канальной емкости. Это возможно при использовании многомерных информационно-измерительных (например, телеизмерительных) систем;

- для оптимизации предложенной термодинамической модели предложена следующая процедура: первоначально необходимо перейти от условной оптимизации к безусловной, для этого используется метод внешних штрафных функций; далее для оптимизации получившейся функции пользуемся градиентным методом с наискорейшим спуском, так как он за наименьше число шагов приводит к решению задачи. Для поиска величины шага, используемого в градиентном методе, мы используем метод золотого сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карно С.* Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать силу //В кн.: Второе начало термодинамики. Под ред А.К.Тимирязева.М.-Л.: ОНТИ, 1934. С.17-61.

2. *Томсон-Кельвин В.* О динамической теории теплоты. О проявляющейся в природе общей тенденции к рассеянию механической энергии //В кн.: Второе начало термодинамики. Под ред А.К.Тимирязева.М.-Л.: ОНТИ, 1934. С.161-18

3. *Клаузиус Р.* Механическая теория тепла //В кн.: Второе начало термодинамики. Под ред А.К.Тимирязева.М.-Л.: ОНТИ, 1934. С.71-158.

4. *Максвелл Дж.* О регуляторах //В кн.: Теория автоматического регулирования. М.: Изд-во АН СССР, 1949. С.9-29.

5. *Больцман Л.* Лекции по теории газов. М.: Гостехиздат, 1956, 242 с.

6. *Планк М.* Единство физической картины мира. М.: Наука, 1966, 186 с.

7. *Гиббс Дж.* В. Основные принципы статистической механики. М.-Л.: Гостехиздат, 1946, 212 с.

8. *Денбиг К.* Термодинамика стационарных необратимых процессов. М.: ИЛ, 1954, 356 с.

9. *Де Грот С.Р.* Термодинамика необратимых процессов. М.: Гостехиздат, 1956, 412 с.

10. *Дьярмати И.* Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1974, 304 с.

11. *Пригожин И., Николис Ж.* Биологический порядок, структура и неустойчивость //УФН, 1973. И.109. № 3. С.517-544.
12. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. М.: Мир, 1991, 240 с.
13. *Стратонович Р.Л.* Нелинейная неравновесная термодинамика. М.: Наука, 1985, 480 с.
14. *Котельников В.А.* Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 1956, 234 с.
15. *Шеннон К.* Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963, 348 с.
16. *Нейман Дж. фон.* Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир, 1971, 264 с.
17. *Бриллюэн Л.* Наука и теория информации. М.: Физматгиз, 1960, 186 с.
18. *Поплавский Р.П.* Термодинамика информационных процессов. М.: Наука, 1981, 255 с.
19. *Юров В.М., Сидореня Ю.С., Кукетаев Т.А.* Термодинамика радиолиза в твердых телах //Докл. междунар. конф. ФХП-9.-Кемерово, 2004. Т. С.93-95.
20. *Юров В.М.* Термодинамика люминесцирующих систем //Вестник КарГУ. Сер.Физика,2005. № 3(39). С.13-16.

Авторы статьи :

Тен
Татьяна Леонидовна
- канд. техн. наук, доц.
(Карагандинский экономический университет),
тел. 8(3212)44-16-71

Яворский
Владимир Викторович
-докт. техн. наук, проф., зав.каф.АИС (Карагандинский государственный технический университет),
тел. 8(3212)56-52-65

Юров
Виктор Михайлович
- канд.физ.-мат. наук, доц.
(Карагандинский госуниверситет им. Е.А.Букетова),
тел. (87172) 51-30-95
exciton@list.ru

УДК 621.3.083.92

Т.Л.Тен, В.В.Яворский, В.М.Юров

ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Введение

Обобщенное понятие «ресурса» коммуникационной системы впервые было введено Л.И.Розоноэром [1]. В этой работе обмен и распределение ресурса в системе рассматривались как происходящие по законам, аналогичным закону распределения энергии в замкнутой системе механических частиц. Позже понятие «ресурса» коммуникационной системы стали связывать с наличием некоторого множества коммуникаций, соединяющих элементы системы, и с характеристиками этих коммуникаций.

Информационно-измерительные системы (ИИС) также относятся к коммуникационным системам. Мы будем исходить из определения коммуникационной системы как системы, включающей большое число однотипных элементов (частиц), в которой переход из одного состояния в другое осуществляется перемещением элементов (частиц) по определенным каналам связи [2].

Каждому каналу связи можно поставить в соответствие определенную величину, которая служит характеристикой канала. Такими характеристиками могут быть пропускная способность канала связи, быстродействие, точность, надежность и т.д.

Разница между каналами и частицами заключается в том, что частицы «выбирают» каналы связи, а не наоборот. Естественно, что вместе с «выбором» канала связи частица «выбирает» и его характеристику. Поэтому сумму характеристик каналов, поставленных в соответствие каждой частице, обычно рассматривают как некоторый ресурс, потребляемый частицами [2]. Таким образом, характеристика канала становится и характеристикой частицы.

Однако потребляемые ресурсы, и, собственно, ресурсы информационной системы суть вещи разные. Действительно, если по каналам связи ИИС передается 10^3 сообщений, то это еще не означает, что она не сможет осуществить передачу 10^5 сообщений.

За пределами многих моделей, исследование которых шло по пути оптимизации некоторых параметров системы, остались скрытыми «неиспользованные резервы» этой системы.

Мы будем называть прогнозными ресурсами информационной системы ее «истинное» значение определяющего параметра, в отличие от «ресурсов потребления» или фактических ресурсов, которые сложились при функционировании системы на данный период (или момент) времени.

В связи с этим, количественная оценка прогнозных ресурсов информационных систем является важной проблемой прикладного системного анализа. Это особенно важно при проектировании ИИС. Сейчас ведутся интенсивные разработки методов и техники цифровой коммутации, начиная от создания коммутирующих матриц на большое число каналов в одном корпусе интегральной схемы до создания цифровых центров коммутации сообщений и каналов. Одним из реше-