

УДК 621.391.01

М.О. Гущина, Е.В. Шишкевич

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности, Севастополь***ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В СОВРЕМЕННЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

*На основании анализа существующих подходов к применению принципа неопределенности в оценке результатов измерений авторы статьи делают выводы о необходимости учета ограничений предельных возможностей наблюдаемости при проведении эксперимента наличием объективных физических закономерностей. Также делается вывод об оптимизации количества измерений и их точности. При проектировании механизма наблюдений необходимо учитывать энергетический баланс в исследуемой системе, так как накопление энтропии может носить при разных обстоятельствах как положительный, так и отрицательный характер.*

**Ключевые слова:** измерение, наблюдение, энтропия, неопределенность, система, энергия.

**Введение**

В настоящее время вопросами обмена и, в основном, сохранения энергетических запасов как с точки зрения практической, так и с точки зрения теоретической занимаются многие специалисты. Однако, зачастую исследователи забывают, что проблема энергообмена давняя, и исследовалась она многими учеными физиками, математиками, специалистами в области информационных технологий. Когда речь заходит об энергии, то чаще всего в связи с этим понятием появляется и понятие информации. Понятие неопределенности (энтропии) и негэнтропии (отрицательной энтропии, позднее «информации»), лежащее в основе современной теории информации и ее практических приложений, родилось на фоне обширной дискуссии, начавшейся в начале 19 века по поводу взаимоотношения классической и квантовой физики. Связь между энтропией и информацией впервые показал в 1929 году физик Л. Силард (Scilard), исследуя известный с 1871 года парадокс о «демоны Максвелла». Его статья не была понята и принята научными кругами того времени. К сожалению споры по поводу правомерности предоставления информации тех же «полномочий», которыми обладает энергия не утихают до сих пор.

**Цель работы.** Авторы статьи ставят своей основной целью исследование физических механизмов, существующих в природе и технике, посредством которых для систем наблюдения происходит перераспределение энергии на полезную (негэнтропию) и вредную (энтропию).

**Основная часть**

При выводе своей известной формулы о пропускной способности канала связи

$$C_{sh} = kV_m \ln \left( 1 + \frac{P}{P_n} \right). \quad (1)$$

К. Шеннон предположил, что кабель связи не имеет омического сопротивления. Это означает отсутствие связи между электрическими токами, проходящими по кабелю и самим физическим кабелем. Предполагается, что источник шума находится вне кабеля и действует независимо. Здесь нет прямого механизма, приводящего, в конце концов, к увеличению энтропии [1]. При отсутствии связи между сигналом-носителем информации и кабелем необходимо было предположить какой-либо другой механизм рассеяния энергии. По мнению [1, 6] увеличение энтропии может происходить из-за искажения частоты, формы и интенсивности сигналов, т.е. канал связи может иметь случайную структуру.

Как показали дальнейшие исследования, при наличии очень сильной связи между сигналами-носителями информации и физической системой (в данном случае кабелем) теплоемкость замкнутой системы настолько велика, что изменением температуры при действии устройства связи можно пренебречь, что фактически и сделал К. Шеннон, не указав способа реализации канала связи с пропускной способностью, описанной выведенным им выражением.

В работе Л. Бриллюэна [1] показано, что при достаточно малых значениях соотношения сигнал/шум можно получить аналогичные по форме выражения для пропускной способности канала связи, используя два подхода, основанные на учёте:

- характеристик случайной структуры дискретных сообщений в идеальном канале связи;
- положений термодинамической теории структуры, устойчивости и флуктуации.

Уже само название основополагающей работы К. Шеннона («Математическая теория связи») свидетельствовало о предпочтительности для решения задач связи первого подхода, что не способствовало широкому внедрению негэнтропийного принципа в научных исследованиях.

Иными словами классическая теория информации в постановке К. Шеннона охватывает в основном вопросы кодирования и начинается там, где «кончается оптимальная обработка сигналов» [6].

Анализ публикаций, а также учебных программ курсов по теории информации [6] показал, в настоящее время преобладает интерес к теории кодирования, исследованию статистических кодов и других элементов переменной структуры устройств связи.

Второму подходу больше импонируют основные положения информационной теории измерительных устройств [3], составной частью которой являются информационно-энергетические соотношения, развивающие идеи Л. Бриллюэна.

К сожалению такие фундаментальные положения информационной теории точности средств измерений как негэнтропийный (принцип) подход к оценке неопределенности результата измерений, энтропийная и термодинамическая оценка погрешности до сих пор не нашла отражения в современных нормативных документах по метрологии. Исключение составляют, пожалуй, только характеристики эталонов единиц поглощенной дозы излучения, которые имеют энергетический эквивалент.

Непонимание физического механизма перераспределения энергии на полезную (негэнтропию или информацию) и вредную (энтропию), начавшееся с «плохо понятой» работы Л. Силарда (Scillard) приводит в конечном итоге к преобладанию в научных исследованиях «формально-математического и зачастую спекулятивного подхода» [7], что существенно ограничивает результативность и эффективность современных научных исследований.

В немалой степени этому способствовали некоторые неудачные и малоубедительные примеры практического применения негэнтропийного принципа, допущенные как авторами, так и переводчиками (редакторами).

Так переводчик книги Л. Бриллюэна «Наука и теория информации» известный советский специалист по статистической теории связи А.А. Харкевич отметил как «методическую неудачу», неоднократно повторяемую автором в книге аргументацию о том, что «на практике можно пренебречь вследствие малости множителя  $10^{-16}$  эрг ( $10^{-23}$  Дж) при переходе от двоичных единиц информации к термодинамическим».

При описании рассматриваемого Л. Бриллюэном примера применения негэнтропийного подхода (телефонная сеть масштаба сравнимого с американской системой связи конца 50-х годов прошлого века с числом абонентов  $N = 10^8$ ) не были указаны такие определяющие термодинамическую энтропию параметры как размеры элементов системы, мощность сигналов-носителей информации, время передачи и данные по тепловыделению.

На основании численного расчёта, приведенного в книге, автор предполагает, что «в некоторый данный момент количество информации, содержа-

щееся в рассматриваемой системе и выраженное в двоичных единицах равно:

$$I = N \log_2 N \approx 4 \cdot 10^9 \text{ дв.ед.} \quad (2)$$

При переходе к термодинамическим единицам энтропия остаётся очень малой величиной  $4 \cdot 10^{-7}$  эрг ( $10^{-14}$  Дж). Действительно, у читателя не очень четко складывается представление о том, что «информация может быть получена лишь в результате затрат энергии», хотя это и есть основной вывод работы Л. Бриллюэна.

Более убедительно, для специалистов, занимающихся экспериментальными исследованиями, по мнению авторов, выглядят примеры, иллюстрирующие основные положения информационно-энергетической теории измерительных устройств, изложенные в работах П.В. Новицкого [3], развившего на рубеже 60-х и 70-х годов идеи Л. Бриллюэна. Вычислительный им энергетический порог чувствительности, при котором может быть получена измерительная информация в нормальных температурных условиях. С учетом того, что шум в общем случае распределен по закону Гаусса, шумовая энергия определяется известным [3] выражением

$$W_{\text{ш}} = \pi \cdot e \cdot k \cdot T = 3,5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж.} \quad (3)$$

Поскольку Л. Бриллюэн принимал дискретный закон вида  $k \ln 2$ , то у него энергетический эквивалент двоичной единицы информации для этих же температурных условий получился  $0,28 \cdot 10^{-20}$  Дж, то есть имеются не принципиальные методические расхождения при одинаковом подходе к принципу неопределенности в научных исследованиях [3].

Проведя ряд теоретических и экспериментальных исследований П.В. Новицкий предложил использовать для вычисления энергетического порога чувствительности  $W_{\text{пор}}$  следующее выражение:

$$\gamma^2 \cdot P \cdot t = W_{\text{пор}}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – минимально допустимая погрешность, обусловленная термодинамическими флуктуациями (остальные погрешности в идеальном случае устранены);  $P$  – мощность сигнала (носителя информации);  $t$  – время измерения (получение информации).

По данным экспериментальных исследований [3], реальные средства измерений в конце 60-х годов имели энергетический порог чувствительности  $10^{-16}$ – $10^{-12}$  Дж в нормальных (лабораторных) температурных условиях. Причем наибольшей чувствительностью (порог  $10^{-16}$  Дж) обладают аналоговые средства.

С развитием цифровых средств измерений, энергетический критерий несколько видоизменился ( $\gamma = \pm 50\%$ ), и получил название «энергия (работа) переключения импульса». По данным приведенным в работе [4], лучшие микросхемы конца 80-х годов имели порог чувствительности  $10^{-12}$  –  $10^{-14}$  Дж. Причем в этой же работе отмечается, что в период 1978 – 1988 гг. этот энергетический критерий чувствительности уменьшился на два порядка.

Этому периоду бурного развития «интегральной микроэлектроники предшествовало, как известно, создание в 1977 году процессора на одном кристалле [5]. Это дало возможность создать дешевый персональный компьютер (ПК), появилось большое количество конкурирующих между собой производителей, возник новый рынок – рынок компьютеров.

Практика показала, что вплоть до 90-ых годов продолжался бурный рост компьютерной электроники и расширение рынка персональных компьютеров.

На предупреждения сторонников информационно-энергетических ограничений обращалось мало внимания. Работы таких специалистов как Л. Бриллюэн, П.В. Новицкий, И.Р. Пригожин считались слишком теоретическими и мало дающими что-либо практикам, которые долгое время обходились простейшими устройствами пассивного отвода тепла.

В погоне за информационной производительностью ПК на однокристалльных процессорах к концу 90-х фирмы производители вынуждены были обратить внимание на существенное выделение тепловой энергии на поверхности монокристалла, превышающее возможности устройств пассивного отвода тепла. Специализированные для ПК устройства пассивного отвода тепла – сокет (Socket) не могли рассеивать более допустимых по нормам 3 Вт с поверхности существовавших монокристаллов. Как следует из анализа многочисленных публикаций и интернет-сообщений, с появлением Pentium II закончилась «эра сокета» (Socket), и начались лихорадочные поиски различных, приемлемых для сложившейся структуры использования ПК, путей активного отвода тепла при сохранении тенденции совершенствования информационных характеристик. ПК стали оснащаться системами обеспечения и контроля теплового режима.

Этой проблеме, получившей название *Hardware monitoring* (НМ) с начала XX века, по настоящее время, посвящено достаточное количество публикаций различного уровня проработанности и глубины исследований, что несколько выходит за рамки настоящей работы. Но при этом появилась возможность проверить теоретические предпосылки и идеи, высказанные относительно механизма, посредством которого происходит перераспределение энергии на полезную (негэнтропию или информацию) и вредную (энтропию), для систем наблюдения. С точки зрения исследования физических механизмов, посредством которых происходит перераспределение энергии на полезную и тепловые потери, современные ПК на монокристалле являются классической диссипативной системой. Причем как информационная производительность кристалла, так и его тепловыделяющая способность достаточно полно контролируется средствами НМ.

Практически любая современная публикация по проблеме НМ является хорошей иллюстрацией к выводам, предсказанным сторонниками информа-

ционно-энергетического подхода к оценке неопределенности. Но в наилучшей степени пагубность пренебрежения информационно – энергетическими ограничениями характеризует признание директора корпорации Intel по технологиям, Патрика Гелсингера, сделанное им в 2001 году: «Если мы будем продолжать современные методы дизайна (т.е. проектирования) процессоров, то к 2010 году процессоры будут вырабатывать тепла на квадратный миллиметр больше, чем это делает ядерный реактор».

Для проверки этого высказывания воспользуемся рекомендациями лауреата Нобелевской премии, известного специалиста по диссипативным (теряющим энергию) системам И.Р. Пригожина, который в своей работе «Философия неустойчивости» однозначно определяет, что траектория движения, совершаемого любой системой, зависит от времени, размера и знака энергии, прилагаемой к этой системе со стороны среды и вырабатываемой внутри системы.

Размеры тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) ядерных водо-водяных реакторов (ВВР) различных конструкций примерно одинаковы.

Примем площадь  $S_{ТВЭЛ} = 10^4 \text{ см}^2$  (или  $1 \text{ м}^2$ ), мощность выделения тепловой энергии соответствует  $10^6 \text{ Вт}$ , т.е. на  $1 \text{ см}^2$  выделяется  $\approx 100 \text{ Вт}$ . При площади кристалла современных процессоров  $\approx 3 \text{ см}^2$ , тепловыделение доходит до  $110 - 130 \text{ Вт}$ .

Парадоксально, но факт. Приглашенный в Колумбийский университет профессор Сорбонны Л. Бриллюэн в начале XX века читал лекции специалистам IBM – одной из ведущей фирм производителей ПК [1].

В завершении можно повторить мнение И.Р. Пригожина: «В настоящее время говорить об энтропии, как о разрушающей некую систему силе, невозможно, как и определить однозначно устойчивое состояние. Исследователь может только на основании анализа предполагать «виражи», которые должна совершать та или иная система и разрабатывать ответные мероприятия, направленные на получение желательного для него поведения» [2].

## Выводы

1. При проектировании систем наблюдения необходимо учитывать наличие объективных физических ограничений, которые не позволяют повысить точность, не повышая общую энтропию системы, та в свою очередь (так как большинство систем являются диссипативными) [2], может оказать серьезное воздействие на изменение траектории движения системы.

2. Увеличение числа или точности измерений не всегда приводит к положительному желаемому результату, так как энергетические затраты в этом случае могут повысить эффективную часть энергии.

3. При проектировании механизма наблюдений необходимо учитывать энергетический баланс в исследуемой системе.

Кроме того, опыт преподавания дисциплин, связанных с оценкой неопределенности авторы считают целесообразным шире использовать информационно-энергетические и энтропийные методы оценки качества различных процессов и систем. В научных спорах о связи информации, энтропии и энергии использовать не только теоретические предположения, которые больше связаны с формально-математическими и зачастую спекулятивными подходами, а учитывать практический опыт, и прогнозы развития средств наблюдения, сделанные полвека назад учеными экспериментаторами.

### Список литературы

1. Бриллюэн Л. Наука и теория информации / Л. Бриллюэн. – М.: Физматгиз, 1960. – 392 с.
2. Пригожин И.Р. Философия неустойчивости / И.Р. Пригожин // Вопросы философии. – 1991. – № 6. – С. 46-57.

3. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств / П.В. Новицкий. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.
4. Евтютов А.П. Инженерные расчеты в гидроакустике / А.П. Евтютов, В.Б. Митько. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.
5. Арисава Макото. Что такое компьютер / Макото Арисава; пер. с яп. М.А. Терешина. – К.: Вица школа, 1990. – 183 с.
6. Цымбал В.П. Теория информации и кодирование / В.П. Цымбал. – К.: Вица школа, 1992. – 263 с.
7. Бриллюэн Л. Новый взгляд на теорию относительности / Л. Бриллюэн; пер с англ. под ред. А.З. Петрова. – М.: Мир, 1972. – 144 с.

Поступила в редколлегию 18.09.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### ПРИНЦИП НЕВИЗНАЧЕНОСТІ У СУЧАСНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

М.О. Гущина, Є.В. Шишкевич

На підґрунті аналізу існуючих підходів до застосування принципу невизначеності в оцінці результатів вимірювань автори статті роблять висновок про необхідність врахування обмежень граничних можливостей спостережуваності при здійсненні експерименту наявністю об'єктивних фізичних закономірностей. Також робиться висновок про оптимізацію кількості вимірювань та їхньої точності. При проектуванні механізму спостережень необхідно враховувати енергетичний баланс в системі, що досліджується, оскільки накопичення ентропії може носити при різних обставинах як позитивний, так й негативний характер.

**Ключові слова:** вимірювання, спостереження, ентропія, невизначеність, система, енергія.

### PRINCIPLE OF UNCERTAINTY IN MODERN SCIENTIFIC INVESTIGATIONS

M.O. Gushchyna, E.V. Shishkevich

Based on the analysis of existing approaches to application of uncertainty principle in measurement results estimation the authors make a conclusion about the necessity of observability ultimate limitations accounting during experiment conducting based upon objective physical pattern. The conclusion is made about the optimization of a measurements quantity and their accuracy. It is necessary to take into account the energy balance in an investigated system during the monitoring mechanism design process. The reason is that entropy accumulation can have a positive and negative effect under different circumstances.

**Keywords:** measurement, monitoring, entropy, uncertainty, system, energy.