



только при отсутствии внутримолекулярного взаимодействия между нитрогруппой и возможным заместителем. Для ТНФ таким заместителем является гидроксильная группа.

Список литературы

1. Элькин М. Д., Джалмухамбетова Е. А., Гречухина О. Н., Гордеев И. И., Гайсина А. Р. Моделирование колебательных состояний гидроксизамещенных фенола // Прикаспийский журнал : управление и высокие технологии. 2011. № 2(14). С. 55–61.
2. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H.B. et al. Gaussian 03. Revision B.03 / Gaussian Inc. Pittsburg, 2003. 302 p.
3. Xian-Hong L., Xian-Zhon Z. Vibrational spectroscopy investigation using ab initio and density functional theory analysis on the structure of 2,4,6- trinitrophenol // Computational and Theoretical Chemistry. 2011. Vol. 963, № 1. P. 34–39.
4. Gui-xiang Wang, Xue-Dong Gong, Yan Lin, He-Ming Xian. Theoretical study on the vibrational spectra and thermodynamic properties for the nitro derivatives of phenols // Spectrochim. Acta. 2009. Vol. 74, № 2. P. 569–574.
5. Краснощеков С.В., Степанов Н.Ф. Масштабирующие множители как эффективные параметры для коррекции неэмпирического силового поля // Журн. физ. химии. 2007. Т. 81, № 4. С. 680–689.
6. Kleza V., Bekesiene S. Theoretical investigation of electronic structure and vibrational spectra of conformers of trinitrotoluene and trinitrophenol // Acta physica Polonia A. 2011. Vol. 119, № 2. P. 198–193.
7. Элькин М. Д., Бабков Л.М. Учет ангармонического смещения полос в модельных расчетах колебательных спектров димеров с водородной связью // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. 2011. Сер. Физика. Т. 11, вып. 1. С. 20–25.
8. Свердлов Л.М., Ковнер М.А., Крайнов Е.П. Колебательные спектры многоатомных молекул. М. : Наука, 1970. 560 с.

УДК: 536

ОТ ПРИНЦИПА ЛАНДАУЭРА К КОМПЬЮТЕРУ ЛАНДАУЭРА

Ю. Н. Зайко

Поволжский институт управления им. П. А. Столыпина – филиал РАНХ и ГС при Президенте РФ, Саратов
E-mail: zyrnick@rambler.ru



В статье обсуждаются вопросы применимости принципа Ландауэра к классическим компьютерам. Показано, что это связано, в основном, с предположением об изотермичности работы переключательных ячеек (регистров процессора). Как следует из предыдущих работ автора, это условие для классических компьютеров не выполняется. Сравнение с данными по CISC-процессорам подтверждает, что процессоры работают в условиях, далеких от изотермичности. Высказано предположение, что, обеспечив изотермические условия работы за счет интенсивного отвода тепла с площади кристалла и очищая регистры памяти перед каждым вычислительным циклом, можно создать принципиально новый классический компьютер (компьютер Ландауэра?), способный справляться с задачами неполиномиальной сложности за полиномиальное время.

Ключевые слова: компьютер, регистры, память, процессор, принцип Ландауэра, NP-полные задачи.

From the Principle of Landauer to the Computer of Landauer

Yu. N. Zayko

In this article questions of the Landauer's principle application to classical computers are discussed. It is shown that this is connected mainly with the assumption of isothermal condition of switch cells' (processor's registers) working. It leads from previous author's works

that this is not true for classical computers. Comparison with data for CISC-processors confirms that processors are working at conditions far from isothermal ones. It is supposed that if one provides isothermal conditions due to intensive heat evacuation from crystal area and cleaning memory registers before every calculation cycle principally new classical computer (Landauer's computer) could be created. This computer could solve non-polynomial problems in polynomial time.

Key words: computer, registers, memory, processor, Landauer's principle, NP-complete problem.

Введение

В 1961 г. Р. Ландауэр сформулировал свой знаменитый принцип [1], согласно которому все операции с битами информации, за исключением операции стирания информации, могут, в принципе, протекать со сколь угодно малыми затратами энергии, если скорость их сколь угодно мала. Операция стирания бита требует минимальных затрат энергии $kT \ln 2$ Дж/бит (k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура термостата, в котором находится вычисляющая или измерительная система). Это утверждение сформулировано в предположениях:



1) стирание информации, записанной в бинарных ячейках памяти рассматриваемой системы, требует установки всех ячеек в состояние «1»;

2) вычисления выполняются при постоянной температуре ячеек.

Оба эти условия кажутся независимыми. При их нарушении принцип Ландауэра (ПЛ) не выполняется, хотя бы частично. Прежде чем приступить к его обсуждению, отметим, что за прошедшие годы ПЛ неоднократно становился предметом рассмотрения в многочисленных работах, посвященных как его теоретическому обоснованию (см., например, [2]), так и экспериментальному подтверждению [3]. (Этот результат следует рассматривать скорее как экспериментальное подтверждение возможности создания компьютера Ландауэра.)

Настоящая статья посвящена обоснованию тезиса о неприменимости ПЛ к современным классическим (т.е. не квантовым) компьютерам и обсуждению свойств компьютера, для которого справедлив ПЛ, в частности возможности его использования для решения проблемы $P = NP$ [4].

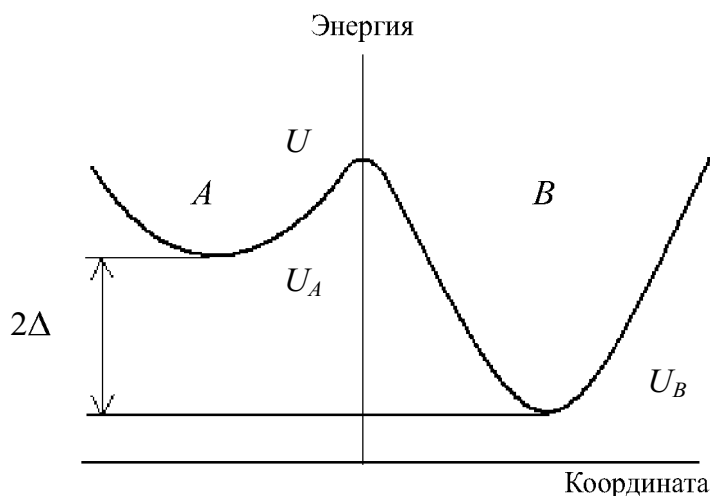
1. «Установка в "1"»

Обсуждению этого шага вычислений посвящено много работ. Например, в работе [2] рассмотрена упрощенная четырехшаговая модель для описания измерительного цикла, которая восходит к работе [5]. Та же модель может быть применена и для описания вычислительного процесса. В ней явно фигурирует «установка в "1"» на одном из шагов вычислительного цикла, что и приводит к выделению энтропии на шаге, соответствующем стиранию информации в ячейке. Авторы [2] рассматривают свой результат как обоснование ПЛ. Однако, как показано в работе [6], видоизменение

модели, связанное с удалением этапа «установка в "1"», приводит к тому, что выделение энтропии будет происходить не при стирании, а при записи информации в память. На эту особенность указывал и Ч. Беннетт [7]. Если применять рассуждения Ландауэра для описания работы классических компьютеров, то устранение этапа «установка в "1"» вполне обоснованно, так как при записи информации в ячейки памяти их прежнее содержимое не удаляется, а запись ведется поверх старой информации. Кроме того, «установка в "1"», выполняемая для всех ячеек памяти одновременно, трактуется очищение памяти как коллективный процесс, что не свойственно классическим компьютерам, где каждая ячейка памяти может заполняться информацией и очищаться индивидуально. Надо оговориться, что «установка в "1"» может применяться и в классических компьютерах для надежного уничтожения информации (именно так работает утилита WipeInfo из пакета Norton Utilities). Таким образом, видоизменение первого условия несильно меняет формулировку ПЛ и мало сказывается на его выполнимости.

2. Постоянство температуры переключающих ячеек

Это условие более существенно, и, как будет показано ниже, его выполнение (или невыполнение) влияет на выполнимость ПЛ радикально. Требование изотермичности вычислений позволило Ландауэру провести анализ динамики бистабильной ячейки без учета динамики энтропии системы. Напомним постановку задачи [1]. Р. Ландауэр [1] рассматривал модель переключающей ячейки в виде симметричной бистабильной потенциальной ямы по информационной степени свободы (рисунок).



Модель переключающей ячейки Р. Ландауэра



Статистический ансамбль ячеек характеризуется числом членов ансамбля n_A и n_B в ямах A и

B соответственно. Поведение n_A и n_B описывается уравнениями баланса [1]:

$$\begin{aligned} \frac{dn_A}{dt} &= -\nu n_A \cdot \exp\left(-\frac{U-U_A}{kT}\right) + \nu n_B \cdot \exp\left(-\frac{U-U_B}{kT}\right), \\ \frac{dn_B}{dt} &= \nu n_A \cdot \exp\left(-\frac{U-U_A}{kT}\right) - \nu n_B \cdot \exp\left(-\frac{U-U_B}{kT}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь t – время, T – температура термостата, ν – частота перехода между членами ансамбля, U , U_A и U_B – энергии максимума межъямного барьера и минимумов каждой из ям. Разность $\Delta = \frac{1}{2}(U_A - U_B)$ представляет собой половину энергии, рассеиваемой в процессе переключения и доставляемой некоторой внешней силой, управляющей переключением. В симметричном равновесном состоянии, которое не несет информации $U_A = U_B$ и $n_A = n_B$. (Это состояние выбирается в качестве основного, что согласо-

уется с устранением этапа «установка в “1”».) При переключении, сопровождающем запись информации, $U_A \neq U_B$ и $n_A \neq n_B$. В результате переключения система выходит из симметричного состояния и релаксирует к новому равновесному распределению

$$n_A = n_B \cdot \exp\left(\frac{U_B - U_A}{kT}\right) \quad (2)$$

по закону $\sim \exp(-\lambda t)$ за время τ , где $\tau^{-1} = \lambda$, λ – характеристическое число уравнения (1):

$$\lambda = \nu \cdot \exp\left(-\frac{U-U_A}{kT}\right) + \nu \cdot \exp\left(-\frac{U-U_B}{kT}\right). \quad (3)$$

Путем несложных преобразований можно показать [1], что

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} \cdot ch\left(\frac{\Delta}{kT}\right); \frac{1}{\tau_0} = 2\nu \cdot \exp\left(-\frac{U-U_0}{kT}\right); U_0 = \frac{1}{2} \cdot (U_A + U_B), \quad (4)$$

где τ_0 имеет смысл времени жизни информации, τ – время переключения, а $ch(\Delta/kT)$ определяет число переключений, т.е. длину программы, выраженную в тактах процессора. При условии $\Delta \gg kT$, выполнение которого обычно предполагается, число это велико, что и является залогом полезности вычислительных устройств описываемого типа.

Как показано в [8], рассуждения Р. Ландауэра нельзя применить к классическим компьютерам по двум причинам.

1. Экспоненциальная зависимость частоты процессора от величины диссипируемой энергии позволяет в принципе предположить возможность, варьируя ее, получить экспоненциальный рост производительности компьютеров и использовать их для решения задач с неполиномиальной сложностью. Эта возможность обсуждается ниже, но для компьютеров совершенно другого типа, отличных от классических.

2. В модели Ландауэра отсутствует параметр, имеющий смысл числа частиц (электронов) на переключающую ячейку, который, как показано

ниже, и, что самое главное, как подтверждает практика [9], определяет величину частоты переключения (тактовой частоты)¹.

Чтобы усовершенствовать модель Ландауэра, уравнения (1) дополним уравнением для энтропии S и решим получившуюся систему совместно. Это уравнение имеет вид

$$\frac{dS}{dt} = \frac{2\Delta}{T \cdot \tau(T)}, \quad (5)$$

где $\tau(T)$ – время переключения, зависящее от температуры, а $2\Delta/T$ – энтропия, производимая за один такт вычисления. Решение, полученное в [8], приводит к зависимости $T(t)$, которая определяется уравнением

$$\begin{aligned} \exp\left(\frac{E}{kT}\right) &= \exp\left(\frac{E}{kT_0}\right) - \alpha \cdot t, \\ E = U - U_A, \quad \alpha &= \frac{2\nu E \Delta}{ckT_0^2}, \quad T_0 = T(0). \end{aligned} \quad (6)$$

¹ Роль такого параметра могло бы играть полное число $n_A + n_B$ членов ансамбля, не зависящее от времени, в соответствии с (1), которое в модели Ландауэра, однако, не связано с частотой переключения.



Для частоты переключения $f = \alpha$ (тактовой частоты процессора) получаем выражение:

$$f = \nu \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{E}{kT} \cdot \frac{2\Delta}{kT}, \quad N = \frac{c}{k}, T \equiv T_0, \quad (7)$$

где N имеет смысл числа частиц (электронов) на переключающую ячейку (транзистор), c – конечная теплоёмкость ячейки, что подтверждается данными по CISC-процессорам [8, 9].

Другим следствием из полученного решения является то, что выделение энтропии ΔS в пределах одной ячейки за один такт вычисления равно:

$$\Delta S_{\text{кл}} = \frac{c\Delta T}{T_0} \approx c \frac{kT_0}{E} \exp\left(-\frac{E}{kT_0}\right), \quad (8)$$

где $\Delta T = T - T_0$ – изменение температуры ячейки за один такт. При условии $kT_0 \ll E$ величина $\Delta S_{\text{кл}}$ сколь угодно мала, тогда как в согласии с принципом Ландауэра она должна быть равна $\Delta S_{\text{Л}} = Nk \ln 2$.

Такая разница результатов обусловлена тем, что принцип Ландауэра сформулирован и «доказан» в предположениях, весьма далеких от условий, в которых работают реальные вычислительные устройства.

3. Компьютер Ландауэра

Как показано выше, справедливость ПЛ в основном связана с изотермичностью переключающих ячеек. Это требует интенсивного отвода тепла от кристалла микропроцессора. По мнению специалистов, это направление увеличения тактовой частоты процессоров бесперспективно [9]. Например, уже процессор Pentium 4E с тактовой частотой 3.8 ГГц потреблял мощность порядка 160 Вт при силе тока более 100 А на площади кристалла 1.2 см². Поэтому компания Intel отказалась от своих планов поднять в ближайшие годы тактовую частоту микропроцессоров до 20 ГГц (что согласуется с расчетами по формуле (7)), а их производительность было решено увеличивать за счет распараллеливания вычислений, используя многоядерные процессоры.

Из всего изложенного ясно, что для классических компьютеров ПЛ не выполняется. Тем не менее, если бы удалось решить проблему отвода тепла от кристаллов малой площади, обеспечив работу микропроцессора в изотермических условиях, это сулило бы весьма заманчивые пер-

спективы. Такой компьютер позволил бы решать задачи неполиномиальной сложности, не дожидаясь создания практически работающего квантового компьютера. Тогда решение проблемы $P = NP$ [4] пришло бы не со стороны изобретения новых эффективных классических алгоритмов, а со стороны открытия новых технологий, позволяющих создать компьютер совершенно нового типа. В качестве подходящего алгоритма можно использовать любой классический переборный алгоритм, решающий задачу из NP класса за неполиномиальное число шагов, оцениваемое, например, как $\sim e^M$, M – размерность задачи. В программу следовало бы включить команды, очищающие регистры процессора перед каждой записью новой информации. Это увеличило бы число шагов алгоритма степенным образом и не отразилось бы значительно на оценке их общего числа. Тогда, для выполнения получившегося алгоритма на компьютере Ландауэра за приемлемое, т.е. не экспоненциально большое время, величина диссипации энергии при переключении ячейки в соответствии с (4) должна удовлетворять условию $\Delta/kT > M$.

Заключение

Отметим ряд особенностей, отличающих компьютер Ландауэра от классических компьютеров с точки зрения физики их работы. Для последних выполняется соотношение $Nf = \text{const}$, что, как следует из (7), обусловлено постоянством ряда физических параметров: E , Δ , и др. Это, в свою очередь, накладывает ряд ограничений возможностей классических компьютеров, одним из которых является их малая эффективность при решении задач неполиномиальной сложности. Повышать производительность, увеличивая тактовую частоту f за счет уменьшения числа примесей в основаниях транзисторов N , уже невозможно, как это было сказано выше, да и выигрыш был бы невелик.

Компьютер Ландауэра использует для повышения тактовой частоты другие возможности, связанные с энергетическими параметрами электронных состояний в примесях, обеспечивая ее экспоненциальный рост. В конечном счете, рост вычислительных возможностей компьютера Ландауэра по сравнению с классическими компьютерами связан с тем, что он оперирует по сравнению с последними значительно большими объемами информации за счет наличия

² На каком этапе происходит выделение энтропии, зависит от определения основного состояния, не несущего информацию.



окружения, куда сбрасывается энтропия, образовавшаяся при вычислениях: $\Delta S_{\text{Л}} \gg \Delta S_{\text{Кл}}$. Другим положительным фактором является очищение его регистров перед началом нового вычислительного цикла. Это позволяет обрабатывать за один такт информацию порядка одного бита, в то время как классические компьютеры за один такт обрабатывают значительно меньший объем информации³. В то же время он отличается и от квантового компьютера, поскольку число электронов на переключающую ячейку $N \gg 1$.

Если внимательно разобраться, то окажется, что условия 1 и 2, в которых ПЛ справедлив, не независимы одно от другого. Компьютер Ландауэра, выполняющий при работе оба из них, действительно обладал бы производительностью, позволяющей ему справиться с задачами, принадлежащими к NP классу. При этом вопрос отвода тепла, выделяющегося при вычислениях, все равно требовал бы каких-то новых технологических решений⁴.

³ Последнее вытекает из определения бита как количества информации, содержащегося в ответе на вопрос, допускающий только два ответа – «да» или «нет», при условии, что оба ответа равновероятны [10]. Именно последнее и обеспечивает очищение регистров процессора.

⁴ В работах Р. Ландауэра и других авторов [1, 7] этот вопрос не решен. Говорится, что это тепло выделяется «где-то еще», очевидно за пределами вычислительной системы. Кроме того, совершенно не ясно как это тепло (и связанная с ним энтропия) туда попадает.

Список литературы

1. Landauer R. Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process // IBM J. Res. Develop. 1961. Vol. 5. P. 183–191. (Ландауэр Р. Необратимость и выделение тепла в процессе вычислений // Квантовый компьютер и квантовые вычисления. Ижевск : РХД, 1999. С. 9–32.)
2. Leff H. S., Rex A. F. Entropy of Measurement and Erasure : Szilard's Membrane Model Revisited // Amer. J. Phys. 1994. Vol. 63. P. 994–1000.
3. Berut A., Arakelyan A., Petrocyan A., Ciliberto S., Dillenscheider R., Lutz E. Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics // Nature. 2012. Vol. 483. P. 187–189.
4. Cook S. The complexity of theorem-proving procedures // Conference Record of Third Annual ACM Symposium on Theory of Computing. ACM, New York, N.Y., 1971. P. 151–158.
5. Szilard L. Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen // Z. Phys. 1929. Bd. 53. S. 840–856.
6. Зайко Ю. Н. Об обоснованности принципа Ландауэра // Распространение и обработка информации. LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co KG. Saarbrücken, Germany, 2012. 98 с.
7. Bennett C. H. The Thermodynamics of Computation – a Review // Intern. J. Theor Phys. 1982. Vol. 21. P. 905–940.
8. Зайко Ю. Н. Оценка вычислительной способности классических компьютеров // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, № 18. С. 66.
9. Бройдо В. Л., Ильина О. П. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. 4-е изд. СПб. : Питер, 2011. 560 с.
10. А. Реньи. Дневник. Записки студента по теории информации // Трилогии о математике / пер. с венг. ; под ред. Б. В. Гнеденко. М. : Мир, 1980. 376 с.