

Новые методы построения микроэлектронных цифровых систем с низким энергопотреблением

Т.Ю. Крупкина, В.В. Лосев, Ю.А. Чаплыгин

Московский институт электронной техники, dsd@miee.ru

Аннотация — В статье дается обзор и анализ состояния разработок новых методов построения цифровых систем с предельно низким энергопотреблением на основе принципа термодинамической обратимости. Сформулированы принципы построения универсальных вентилях и приведена их классификация по принципу действия, степени энергоэффективности, способам выполнения условий энергоэффективности, режиму работы и способам сохранения информации. Описаны методы построения логических вентилях и источников питания. Методом компьютерного моделирования исследованы энергетические характеристики логических вентилях. Установлены закономерности энергопотребления, позволяющие выбрать компромисс между энергопотреблением и быстродействием.

Ключевые слова — адиабатическая логика, энергетическая эффективность, логический вентиль, реверсивная логика, потребляемая мощность, источник питания.

I. ВВЕДЕНИЕ

Физические предпосылки создания адиабатических (термодинамически обратимых) вычислительных устройств, в которых затраченная на вычисления энергия возвращается в систему и используется для последующих вычислений, заложены в работах [1]-[14].

Предложен ряд гипотетических моделей полностью адиабатических вычислительных устройств [15]-[18], которые, однако, не могут быть реализованы на современном технологическом уровне.

В электронной логике реализация принципа термодинамической обратимости достигается применением управляемого источника питания. При повышении питающего напряжения вентиль выполняет логические операции, потребляя энергию. При снижении напряжения энергия, накопленная в реактивных элементах, возвращается в источник питания. Максимальный эффект достигается в асимптотически бездиссипативных вентилях, в которых рассеяние энергии происходит только за счет конечной скорости изменения питающих напряжений и в пределе может быть сколь угодно малой.

В работе [19] показано, что универсальный термодинамически обратимый вентиль должен включать следующие элементы:

1. Обобщенную пружину, способную сжиматься в одном или другом направлениях под действием обобщенной силы, поступающей из источника питания.

2. Ключ, определяющий направление установки логического состояния вентиля после приложения силы к пружине в зависимости от информации на его входах в соответствии с заданной таблицей истинности.

3. Канал связи, передающий информацию о состоянии предыдущих (управляющих) вентилях последующему (управляемому) вентилю.

Термодинамическая обратимость вентиля обеспечивается его переключением в условиях термодинамического равновесия [2], [5], [8], [11], [14]. Обязательным требованием выполнения этого условия является достаточно медленное воздействие обобщенной силы на обобщенную пружину. Другими условиями термодинамической равновесности процесса являются следующие:

1. Наличие трех равновесных состояний обобщенной пружины: свободное (R), 0 и 1 [19].

2. Установка входной информации в свободном состоянии пружины [2], [11], [14].

3. Сохранение входной информации в течение всего цикла [2], [5], [8].

4. Отсутствие люфтов деталей вентиля [19].

II. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ

В электронной логике достаточно медленное воздействие обобщенной силы на обобщенную пружину обеспечивается медленным (по сравнению с собственной постоянной времени вентиля) изменением напряжения питания, а условия 1-4 соответствуют выполнению следующих требований:

а) транзисторы должны отпираться только при нулевом напряжении между токоведущими электродами.

б) гальваническая связь емкости с питающим напряжением никогда не должна быть разорвана.

Очевидным требованием является также отсутствие энергопотребления в статическом состоянии.

Сформулированные условия термодинамической обратимости никогда не могут быть выполнены полностью, поэтому создание полностью адиабатической логики невозможно. По степени адиабатичности можно выделить 4 группы логики, в которой исключено статическое энергопотребление.

Первую группу составляет логика, в которой термализация энергии происходит только за счет конечной скорости изменения питающих напряжений и

скорости изменения питающих напряжений и асимптотически может быть сколь угодно малой. Мы припишем такой асимптотически бездиссипативной логике высшую степень адиабатичности 3.

Использование управляемого медленно изменяемого питающего напряжения может существенно снизить энергетические затраты даже в том случае, когда выполнены не все необходимые условия полной термодинамической обратимости. Такую логику мы будем называть квазиадиабатической.

Ко второй группе (степень адиабатичности 2) относится логика, в которой одно из логических состояний (0 или 1) обобщенной пружины (нагрузочной емкости) совпадает со свободным состоянием R, и входная информация не сохраняется до конца цикла (нарушаются условия 1-3 и, как следствие, требования а, б). При этом за цикл выполнения вентилем логической операции термализуется энергия $\sim CV_i^2$, где V_i — абсолютные значения напряжений отпирания транзисторов.

В логических вентилях третьей группы (степень адиабатичности 1) заряд емкости источником питания осуществляется через выпрямляющий элемент, имеющий пороговое напряжение отпирания V_{iD} . При этом также нарушаются условия 1-3 и требования а, б, а минимальная термализованная за цикл энергия пропорциональна $CV_{dd}V_{iD}$, где V_{dd} — амплитуда питающего напряжения.

Наконец, четвертую группу составляют традиционная КМДП (или ей подобная) логика с постоянным напряжением питания. За цикл в вентиле термализуется энергия $\sim CV_{dd}^2$ (степень адиабатичности 0).

III. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В соответствии с условием 1 в логических вентилях высшей 3-й степени адиабатичности обобщенная пружина должна иметь 3 равновесных состояния. Это условие может быть выполнено двумя способами. Первый из них состоит в параллельной обработке прямых и инверсных логических сигналов и соответствует использованию обобщенной пружины с закрепленным центром (рис. 1а), когда вне зависимости от логического состояния деформируется одна или другая половина обобщенной пружины. В электронной логике это соответствует заряду одной из двух нагрузочных емкостей вентиля парафазным выходным сигналом. Второй способ заключается в применении расщепленных импульсов питания и соответствует использованию обобщенной пружины со свободным центром (рис. 1б). При этом в зависимости от логического сигнала обобщенная пружина деформируется в одном или другом направлении. В электронной логике это соответствует различной полярности заряда нагрузочной емкости.

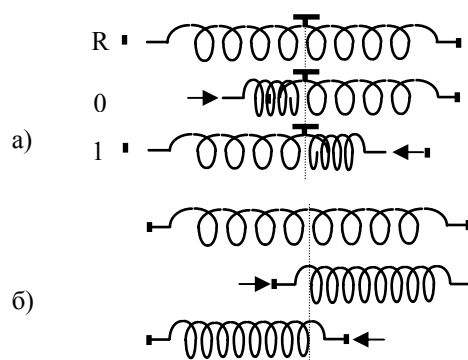


Рис. 1. Способы реализации 3-х состояний обобщенной пружины. а — параллельное использование прямых и инверсных сигналов (пружина с закрепленным центром); б — использование расщепленных импульсов питания (пружина со свободным центром)

Первый способ реализован в логике $2n2p-2n$ ([20], [21]), рис. 2.

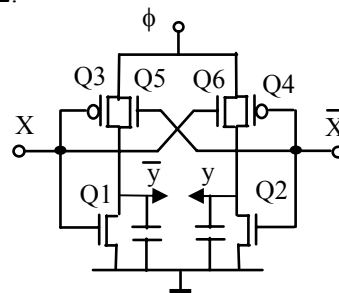


Рис. 2. Адиабатическая логика $2n2p-2n$ [20,21]

Условие 3 полной адиабатичности требует сохранения входной информации на этапе извлечения энергии. Это требование обеспечивается использованием коллапсирующих импульсов питания (рис. 3). При этом импульс питания каждого i -го вентиля оказывается “вложенным” в импульс питания предыдущего $(i-1)$ -го вентиля. В результате входная информация сохраняется в течение всего периода его активации.

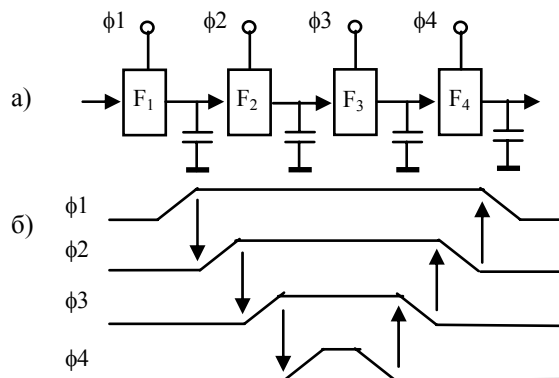


Рис. 3. Цепь логических вентилях $2n2p-2n$ (а) и коллапсирующие импульсы питания (б)

Второй способ выполнения условия 1 (наличие трех состояний обобщенной пружины) состоит в ис-

пользования расщепленных импульсов питания [19]. При этом логические состояния соответствуют напряжениям положительной или отрицательной полярности. Логические операции могут выполняться обычными КМДП вентилями 1n1p. Если входная информация установлена до начала импульсов питания (условие 2 полной адиабатичности), то хотя бы один из транзисторов, соединяющих выходную емкость с источником питания +φ или -φ, оказывается полностью открытым. Такая логика имеет 2 главных недостатка: 1) невозможность работы логических блоков в конвейерном режиме; 2) сложность организации системы питания. Термализованная энергия обратно пропорциональна длительности фронтов импульсов питания. Результаты моделирования [19] показывают, что скорость обработки информации существенно повышается за счет частичного перекрытия фронтов импульсов питания без существенного увеличения энергетических затрат.

Выполнение условия 3 полной адиабатичности в конвейерном режиме может быть обеспечено путем разделения цепей заряда и разряда выходной емкости. Это осуществляется созданием дополнительной цепи логических элементов, выполняющих обратные вычисления [20]-[22], необходимым условием является логическая реверсивность вентиля. Проведенный нами анализ показал, что логически реверсивные и функционально полные вентили должны иметь не менее 3 входов (и равное число выходов). Свойствами логической реверсивности и функциональной полноты обладают, например, вентиль Фредкина-Тоффоли [16], выполняющий функции $Y_1 = X_1X_3 + X_2\bar{X}_3$, $Y_2 = X_1\bar{X}_3 + X_2X_3$, $Y_3 = X_3$ или его инверсия: $Y_1 = \bar{X}_1X_3 + \bar{X}_2\bar{X}_3$, $Y_2 = \bar{X}_1\bar{X}_3 + \bar{X}_2X_3$, $Y_3 = \bar{X}_3$.

Необходимость обработки как прямых, так и инверсных сигналов приводит к значительному увеличению числа транзисторов, сигнальных шин и, следовательно, энергии, затраченной на заряд емкостей. Поскольку эта энергия не может быть возвращена в источник питания полностью, целесообразность реализации асимптотически адиабатической логики конвейерного типа на современном технологическом уровне представляется сомнительной.

В квазиадиабатической логике статического типа не выполняются условия 1-3 полной адиабатичности, и, как следствие, требование А отпираания транзисторов только при нулевом напряжении между токоведущими электродами. Поэтому степень адиабатичности вентиля не может быть выше 2.

В квазиадиабатическом режиме могут работать обычные статические КМДП вентили с 1-фазным импульсным (или синусоидальным) питанием (логика 1n1p). Главным недостатком логики 1n1p является невозможность работы в конвейерном режиме.

Важным преимуществом всех типов квазиадиабатической логики является отсутствие сквозного тока при условиях $V_m > 0$, $V_p < 0$. В обычной КМДП логике сквозной ток исключается только при значительно более жестком условии $V_m - V_p > V_{dd}$, которое обычно не выполняется ввиду существенного снижения быстродействия.

В квазиадиабатической логике динамического типа выходные электроды в некоторые периоды времени не связаны гальванически с шинами питания. При этом один из логических уровней напряжения сохраняется на емкости выходного электрода, что связано с потенциальной ненадежностью работы логики, хотя ее схемная и структурная реализация может быть существенно упрощена.

Традиционный (неадиабатический) динамический КМДП вентиль типа “домино” помимо шины питающего напряжения V_{dd} использует 4-фазные тактовые импульсы φ1-φ4. Энергетические потери связаны не только с перезарядом выходных емкостей вентилей С, но и с протеканием сквозных токов при одновременном отпираании n- и p-канальных транзисторов, а также с перезарядом тактовых шин. При перезаряде нагрузочной емкости за один такт в среднем термализуется энергия

$$W_0 = C\Delta V^2 / 2, \quad (1)$$

где $\Delta V = V_{dd}$ — логический перепад напряжения.

В квазиадиабатических динамических вентилях импульсы питания одновременно являются тактовыми импульсами, а сквозные токи отсутствуют.

Таким образом, по предельным возможностям снижения энергопотребления можно выделить два класса адиабатической логики: асимптотически адиабатическая и квазиадиабатическая. В асимптотически адиабатической логике энергия, термализованная за цикл смены логических состояний, в идеале (при отсутствии токов утечки) может быть сделана сколь угодно малой за счет снижения скорости изменения импульсов питания. В квазиадиабатической логике часть энергии, затраченной источником питания на переключение вентиля, неизбежно термализуется. По способам сохранения информации квазиадиабатические вентили делятся на статические, в которых сохранение логического состояния обеспечивается гальванической связью нагрузочной емкости с источником питания, и динамические, в которых заряд в нагрузочной емкости сохраняется при ее отключении от источника питания.

IV. Источники ПИТАНИЯ

Реализация адиабатических устройств производства информации требует создания адиабатических источников управляемого напряжения (драйверов шин пи-

тания), обеспечивающих формирование импульсов питания требуемой формы. Группа логических вентилях, подключенных к общему источнику питания, представляет для источника питания резистивно-емкостную нагрузку, где емкость C представляет суммарную емкость вентилях, подключенных к общей шине питания, а сопротивление R — эквивалентное сопротивление всех транзисторов логических вентилях. Если время нарастания (спада) питающего напряжения T много больше собственной постоянной времени вентилях $\tau_0 = RC$, термализованная за цикл энергия составляет [22],[23]

$$W = \xi CV_{dd}^2 \tau_0 / T, \quad (2)$$

где ξ — фактор формы. По принципу действия адиабатические драйверы можно разделить на резонансные устройства и устройства со ступенчатым перезарядом емкостной нагрузки.

В драйверах резонансного типа импульсы питания требуемой формы представляют собой собственные колебания некоторого резонатора, а компенсация потерь осуществляется подкачкой энергии от источника постоянного напряжения. Простейшим резонатором является колебательный LC-контур, на основе которого могут быть построены адиабатические генераторы гармонических (или квазигармонических) импульсов питания ([30]). Индуктивность L выполняется в виде навесного элемента. Незатухающие колебания с амплитудой $V_{dd} \approx 2V$ (V — напряжение питания) поддерживаются замыканием на короткое время T ключа на полевом транзисторе в момент, когда напряжение на шине питания близко к нулю. При этом потери в резистивных элементах компенсируются дополнительной энергией, поступающей в индуктивность. Основную сложность представляет управление ключом, который должен включаться на время, минимально достаточное для компенсации потерь.

По нашему мнению значительно более простым решением является выполнение драйвера в виде, известного генератора гармонических колебаний типа “трехточка”. В таком генераторе нужна длительность отпираания транзистора поддерживается автоматически.

V. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Анализ энергетических потерь при достаточно медленном изменении питающих напряжений удобно проводить методом VQ -диаграмм [8], на которых изображается зависимость заряда Q , накопленного в выходной емкости вентиля C , от питающего напряжения ϕ . Энергия, рассеянная за цикл переключения, на VQ -диаграмме равна площади соответствующей замкнутой кривой. За цикл смены логических состояний в каждой половине вентиля рассеивается энергия

$$W_{0-1-0} = CV_t^2, \quad (3)$$

где $V_t = V_m = -V_p > 0$ — абсолютные величины пороговых напряжений п- и р-канальных транзисторов.

При конечной скорости изменения питающего напряжения рассеянная энергия возрастает с ее увеличением вследствие джоулевых потерь в сопротивлениях каналов открытых транзисторов. Согласно принятым представлениям [20]-[25] зависимость этих потерь от тактовой частоты $f = 1/T = \omega/2\pi$ можно установить с помощью простейшей эквивалентной RC-схемы вентиля, где \bar{R} — среднее сопротивление канала р-канальных транзисторов. Если тактовые импульсы $\varphi(t)$ имеют форму трапеции с длительностями фронта и спада $T_r = T_f = T/4$ и амплитудой, то при $\tau = \bar{R}C \ll T$ и $V_t \ll V_{dd}$ в течение фронта (или спада) импульса в резисторе протекает ток $I = 4CV_{dd}/T$, и за период T в одном из плеч симметричного вентиля рассеивается энергия

$$W_{RT} = I^2 \bar{R}T / 2 = 8V_{dd}^2 C^2 \bar{R} / T = 8V_{dd}^2 C f \tau = 4V_{dd}^2 C(\omega\tau) / \pi. \quad (4)$$

Циклическое изменение логического состояния (циклы 1-0-1 или 0-1-0) сопровождается энергетическими потерями, связанными с перезарядом емкости C при отпираании транзисторов, которые определяются соотношением (3). В среднем за период эти потери составляют $p_{ch} CV_t^2$, где p_{ch} — вероятность изменения логического состояния вентиля. Кроме того, в реальных вентилях существуют токи утечки, которые сопровождаются рассеянием мощности P_0 в той половине вентиля, в которой выходное напряжение соответствует логической 1. Таким образом, за одну логическую операцию (за период T) в среднем должна быть рассеяна энергия

$$W_0 = \frac{4\xi}{\pi} V_{dd}^2 C(\omega\tau) + p_{ch} CV_t^2 + \frac{P_0}{f}. \quad (5)$$

Энергетические характеристики квазиадиабатических вентилях исследовались методом компьютерного моделирования.

VI. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рисунке 4 представлены зависимости $W(T, C_L)$ для нагрузочных емкостей $C_L = 20, 100$ и 200 фФ (кривые 1-3). Близкие результаты получены для импульсов питания гармонической формы.

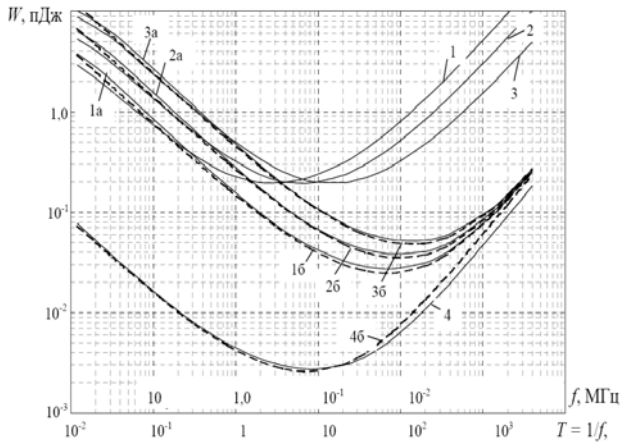


Рис. 4. Зависимость энергии, рассеянной в вентилях 2n-2n2p

Данные эксперимента показывают, что полученные характеристики $W(T, C_L)$ имеют две особенности, не согласующиеся с соотношением (5):

1) На низких частотах наблюдается anomalно высокое энергопотребление. Токи утечки, измеренные в статическом состоянии, дают примерно на 2 порядка меньшие потери и не могут объяснить этого эффекта.

2) В диапазоне высоких частот функция $W(f)$ спадает слабее, чем по закону $1/f$.

Кривые 4 на рисунке 4 показывают, что исключение внутренних емкостей вентиля C_{int} (емкостей затвор-исток C_{gs} , затвор-сток C_{gd} и сток-подложка C_{bd} п- и р-канальных транзисторов) исключает anomalные потери на низких частотах. Детальное изучение временных диаграмм показало, что этот эффект связан с протеканием короткого импульса сквозного тока через р-канальный транзистор Q3 и п-канальный транзистор Q1 при переключении вентиля в логическое состояние $\bar{V}_i = 1$. Сквозной ток I возникает при смене логического состояния $V_{i-1} = 0, \bar{V}_{i-1} = 1 \rightarrow V_{i-1} = 1, \bar{V}_{i-1} = 0$ в цепи Q3-Q1 на этапе повышения питающего напряжения φ_i .

Его длительность, а следовательно, и потери энергии, связанные с этим эффектом, обратно пропорциональны скорости изменения напряжения питания, т.е. тактовой частоте f . При $C_{gd} = 0$ сквозной ток отсутствует, и эффект anomalных потерь не наблюдается.

Нейтрализовать этот вредный эффект в обоих типах рассматриваемых вентилях можно путем фиксации минимального значения выходных напряжений на нулевом уровне с помощью транзисторов с минимальной шириной канала, работающих в диодном включении. Это подтверждают кривые 1a, 2a и 3a на рисунке 4.

Вторая отмеченная особенность — более слабый, чем по закону $1/f$, спад функции $W(f)$ в диапазоне высоких частот — имеет следующее объяснение.

Перезаряд емкостей вентиля C происходит через нелинейные элементы — р-канальные транзисторы. При напряжении затвор-исток V_{gs} , меньшем порогового напряжения $V_{tp} = -V_t < 0$ (транзистор открыт), крутая область ВАХ транзистора имеет вид

$$I_d = \beta V_{ds} (V_t - V_{gs} - V_{ds}).$$

В адиабатических вентилях транзисторы работают при малых напряжениях сток-исток V_{ds} , поэтому сопротивление канала открытого транзистора определяется соотношением

$$R = 1 / \beta |V_{gs} - V_t|, \quad (6)$$

где $\beta = \mu \epsilon_d \epsilon_0 W / Ld$, μ — подвижность носителей заряда в канале, ϵ_d и d — диэлектрическая проницаемость и толщина подзатворного диэлектрика, L и W — длина и ширина канала. Большая часть энергии в канале транзистора рассеивается во время, когда $V_{gs} \rightarrow V_t$, и сопротивление канала велико. Практически напряжение V_{gs} не успевает достигнуть порогового значения, но приближается к нему тем более, чем меньше частота тактовых импульсов f . При этом согласно (6) среднее сопротивление канала \bar{R} и постоянная времени $\tau = \bar{R}C$ в соотношении (5) возрастают, а произведение $\omega\tau$ снижается с уменьшением частоты медленнее, чем по линейному закону. Если аппроксимировать зависимость $\omega\tau$ от частоты степенной функцией

$$\omega\tau = (\omega R_{ef} C)^\alpha = (2\pi f R_{ef} C)^\alpha, \quad (7)$$

то вместо (5) получим:

$$W_0 = \frac{4\xi}{\pi} V_{dd}^2 (C_L + C_{int}) [2\pi f R_{ef} (C_L + C_{int})]^\alpha + P_{ch} (C_L + C_{int}) V_t^2 + \frac{P_0}{f}, \quad (8)$$

где C_{int} — эффективное значение суммарной внутренней емкости вентиля.

В соотношении (8) эффективное сопротивление R_{ef} (в отличие от \bar{R}) не зависит от частоты. Значение $\alpha < 1$ определяется видом функции $R(V_{gs})$ — соотношения (4). Отсюда следует, что в области высоких частот зависимость $W(f, C_\Sigma)$ должна иметь вид:

$$W(f, C_\Sigma) \sim f^\alpha (C_L + C_{int})^{1+\alpha}. \quad (7)$$

Наклон линейного (в логарифмическом масштабе) участка зависимостей $W(1/f)$ в области высоких частот (рис. 4) определяет значение параметра α .

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ состояния разработок термодинамически обратимых устройств производства информации показывает, что это направление является весьма перспективным и в настоящее время интенсивно развивается. Наибольший практический интерес представляет реализация электронной адиабатической логики на основе традиционного элементного базиса микроэлектроники. В этом направлении достигнуты существенные результаты, подтвержденные машинными экспериментами, а также созданием демонстрационных образцов [22], [25]. Уже сейчас использование принципа термодинамической обратимости позволяет снизить энергетические потери, по крайней мере, на порядок. Разумеется, это достигается ценой снижения быстродействия; однако быстродействие не всегда является главным требованием. Скорость работы квазиадиабатических устройств можно регулировать частотой импульсов питания, добиваясь оптимальных компромиссов. Значительное повышение быстродействия может обеспечить применение новых электронных приборов на основе гетероструктур и квантовых эффектов. В данной статье адиабатические драйверы рассматривались как источники питания для адиабатических логических схем. По-видимому, они имеют более широкую сферу применения. В частности, значительная экономия энергии может быть получена путем их использования в качестве драйверов шин тактовых импульсов обычных цифровых СБИС синхронного типа, шин выборки СБИС ЗУ, шин питания приборов с зарядовой связью (ПЗС) и других устройств, содержащих шины с большой эквивалентной емкостью.

Литература

- [1] Shannon C.E. A mathematical theory of communication // Bell Syst. Techn. J. 1948. V.27. July. P. 379-423.
- [2] Bennett C.H. The thermodynamics of computation - a review // Int. J. of Theor. Phys. 1982. V.21. № 12. P. 905-945.
- [3] Bennett C.H. Logical reversibility of computation // IBM J. of Res. & Dev. 1973. V.17. № 11. P. 525-532.
- [4] Bennett C.H. Time/space trade-offs for reversible computation // SIAM J. Comput. 1989. V.18. № 4. P.766-776.
- [5] Bennett C.H. Notes on the history of reversible computation // IBM J. of Res. & Dev. 1988. V.32. № 1. P. 16-23.
- [6] Feinman R.P. Tiny computers obeying quantum mechanical laws. New directions in physics // The Los Alamos 40th anniversary ed N Metropolis. D.M.Kerr and G.Rota (Boston: Academic). 1987. P. 7-25.
- [7] Landauer R. Information is physical // Physics Today. 1991. V.44. P. 23-29.
- [8] Landauer R. Dissipation and noise immunity in computation and communication // Nature. 1988. V.335. 27 Oct. P. 779-784.
- [9] Keyes, Landauer R. Minimal energy dissipation in logic // IBM J. of Res. & Dev. 1970. V.14. № 2. P. 152-157.
- [10] Schneider T.D. Sequence logos, machine/channel capacity, Maxwell's demon, and molecular computers: a review of the theory of molecular machines // Nanotechnology. 1994. № 5. P. 1-18.
- [11] Zurek W.H. Algorithmic randomness, physical entropy, measurement and demon of choice // Theor. Division T-6. MS B288 Los Alamos Nat. Lab. Los Alamos. NM 87545. March 12. 1998.
- [12] Gershenfeld N. Signal entropy and the thermodynamics of computation // IBM Syst. J. 1998. V.35. № 3&4. P. 557-586.
- [13] Maxwell J.C. Theory of heat // London. Longmans. 1904.
- [14] Skordos P., Zurek W.H. Maxwell's demon, rectifiers, and Second Law // Am. J. Phys. 1992. V. 60. P. 876.
- [15] Fredkin E., Toffoli T. Design principles for achieving high-performance submicro-cron digital technologies // Proposal to DARPA. MIT lab. for Comp. Science. 1978.
- [16] Fredkin E., Toffoli T. Conservative logic // Int. J. of Theor. Phys. 1982. V.21, № 3/4. P. 219-253.
- [17] Merkle R.C., Drexler K.E. Helical logic // Nanotechnology. 1996. V.7. P. 325-339.
- [18] Drexler K.E. Molecular engineering: an approach to the development of general capabilities for molecular manipulation // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1981. V.78. P. 5275-5278.
- [19] Валиев К.А., Старосельский В.И. Модель и свойства термодинамически обратимого логического вентиля // Микроэлектроника РАН. 2000. Т.29, № 2. С. 3-18.
- [20] Athas W.C., Svensson J., Koller J.G., Tzartzanis N., Choi E.Y. Low-power digital systems based on adiabatic-switching principles // IEEE Trans. on VLSI Syst. Dec. 1994 V.2. N 4. P. 398-408.
- [21] Ferrary A. Adiabatic Switching. Adiabatic Logic // Wed Mar 20 12:14:22 PST 1966 (интернет).
- [22] Younis S.G., Knight T.F. Asymptotically zero energy split-level charge recovery logic // Proc. of 1994 Int. Workshop on Low Power Design. P. 177-182. April 1994.
- [23] Старосельский В.И. Реверсивная логика // Микроэлектроника РАН. 1999. Т.28. № 3. С. 213-222.
- [24] Denker J.S. A Review of Adiabatic computing // Proc. of 1994 Symp. on Low Power Electronics. San Diego. Oct. 1994.
- [25] Maksimovic D., Oklobdzija V.G. Clocked CMOS adiabatic logic with single-AC power-supply. Experimental result // 21st European SSC Conf. ESSCIRC'95. Lille. France. Sept. 1995.