

Исследование возможностей практического применения адиабатической логики для снижения потребляемой мощности СБИС

В.В. Лосев

Национальный исследовательский университет МИЭТ, dsd@miee.ru

Аннотация — Исследованы энергетические характеристики резонансного энергоэффективного драйвера. Проведен анализ возможностей экспериментального подтверждения теоретических зависимостей энергопотребления адиабатической логики. Приведено экспериментальное подтверждение закономерностей энергопотребления. Показано, что теоретические зависимости имеют характер закономерности, определены коэффициенты закономерностей.

Ключевые слова — быстродействие, потребляемая мощность, логический вентиль, энергия переключения, реверсивная логика.

1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности электронных устройств является одной из приоритетных задач современной микроэлектроники. На текущий момент потребляемая мощность является сдерживающим фактором развития, как высокопроизводительных микроэлектронных устройств, так и мобильных с автономным питанием. Даже несмотря на интенсивное применение традиционных методов снижения потребляемой мощности проблема энергопотребления является доминирующей, так по прогнозам международной ассоциации производителей полупроводников (ITRS) [1] энергия, приходящаяся на одну логическую операцию, будет составлять менее 1 аДж уже к 2020-м годам. По мнению авторов [2], закон Мура, которому подчиняется развитие микроэлектроники, может быть нарушен раньше 2020 года, а после 2030 годов наступит эра квантовых процессоров, для развития которых должны будут сформулированы новые закономерности. Таким образом, применение традиционных конструктивно-технологических методов снижения потребляемой мощности исчерпает себя примерно к 2030-м годам.

Альтернативным способом повышения энергоэффективности является применение новых принципов энергопитания, основанных на законах термодинамической обратимости [3-8]. Такие устройства называются термодинамически обратимыми, реверсивными или адиабатическими. Реализация принципа термодинамической обратимости достигается применением управляемого источника питания. В этом случае при повы-

шении питающего напряжения вентиль выполняет логические операции, потребляя энергию. При снижении напряжения энергия, накопленная в реактивных элементах, возвращается в источник питания.

II. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Максимальной простотой обладают вентили 1п-1р. Главный их недостаток состоит в невозможности работы в конвейерном режиме. Среди известных вентилях для конвейерного режима работы оптимальными представляются вентили статического типа 2п-2п2р на основе КМЛП-транзисторов.

Теоретический предел уменьшения энергетических потерь соответствует бесконечно малой скорости изменения питающего напряжения. В вентилях 1п-1р (рис. 1) и 2п-2п2р (рис. 2) минимальные теоретически достижимые потери энергии за цикл смены логических состояний $\sim CV_i^2$, где C — эквивалентная емкость вентиля, а V_i — абсолютная величина порогового напряжения транзисторов.

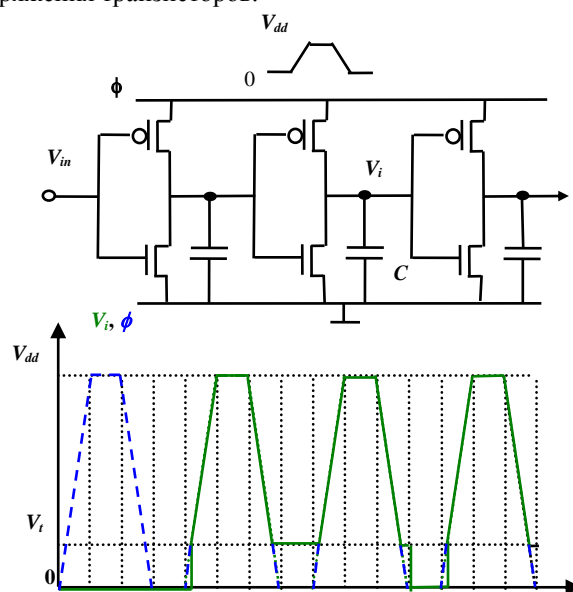


Рис. 1. Адиабатический вентиль 1п-1р

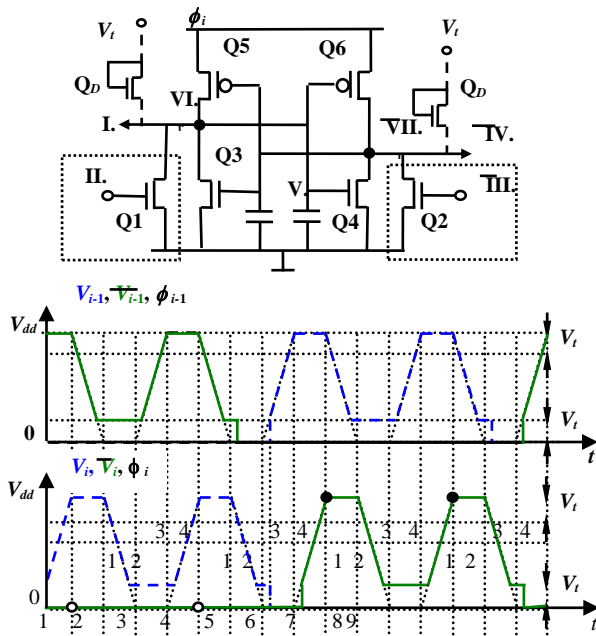


Рис. 2. Адиабатический вентиль 2n-2n2p

Известно, что при конечной скорости изменения питающего напряжения рассеянная энергия возрастает с ее увеличением вследствие джоулевых потерь в сопротивлениях каналов открытых транзисторов.

Согласно принятым представлениям, если тактовые импульсы $\phi(t)$ имеют форму трапеции с длительностями фронта и спада $T_r = T_f = T/4$ и амплитудой V_{dd} , то при $\tau = RC \ll T$ и $V_t \ll V_{dd}$ в течение фронта (или спада) импульса в резисторе протекает ток $I = 4CV_{dd}/T$, и за период T рассеивается энергия

$$W_0 = \frac{4\xi}{\pi} V_{dd}^2 C(\omega\tau) + p_{ch} CV_t^2 + \frac{P_0}{f}, \quad (1)$$

где p_{ch} — вероятность изменения логического состояния вентиля, P_0 — мощность рассеиваемая токами утечки, $\xi \approx 1$ — фактор формы тактовых импульсов. Для рассмотренного случая импульсов трапецеидальной формы $\xi = \xi_{min} = 1$; для импульсов синусоидальной формы $\xi = \pi^2/8 = 1,23$.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось программой Spectre версии 11.1 компании Cadence. Данные компьютерного эксперимента показали, что полученные характеристики $W(T, C)$ имеют особенность, не согласующуюся с соотношением (1), а именно: в диапазоне высоких частот функция $W(f)$ спадает слабее, чем по закону $1/f$.

Автором впервые были предложены степенные аппроксимации зависимости этих потерь от тактовой

частоты работы цифрового адиабатического вентиля [7-9]:

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

где, C_{int} — эффективное значение суммарной внутренней емкости вентиля, C_L — нагрузочная емкость вентиля, R_{ef} — эффективное сопротивление, значение $\alpha < 1$ определяется видом функции $R(V_{gs})$.

График зависимости (2) приведен на рис. 3.

Энергетические характеристики адиабатических вентилях исследовались методом компьютерного моделирования. Анализировались процессы в длинной цепи инверторов при дополнительных нагрузочных емкостях C_L , имитирующих емкости линий связи. При моделировании использовались модели коммерческой библиотеки, выполненной по технологическим нормам 0,6 мкм. Результаты моделирования приведены на рис. 4. Как видно, они хорошо соответствуют данным компьютерного эксперимента.

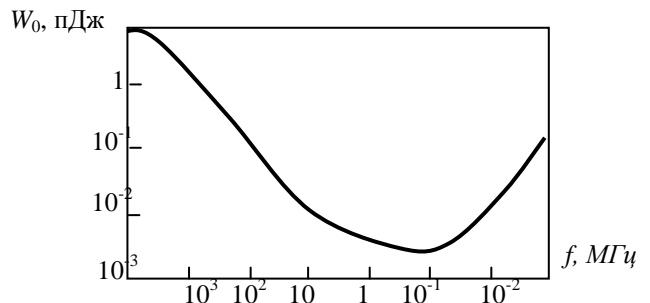


Рис. 3. Зависимость энергопотребления от тактовой частоты

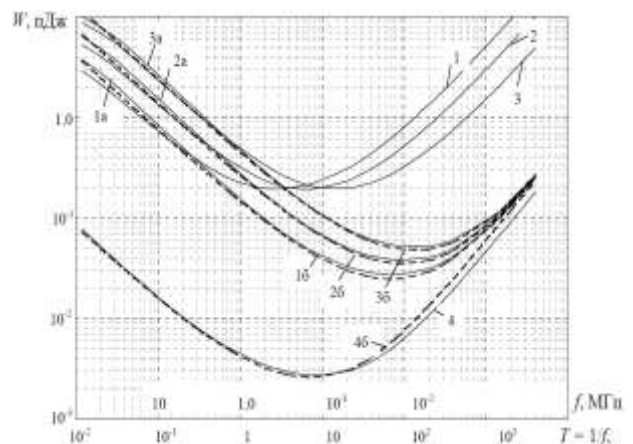


Рис. 4. Зависимость энергии, рассеянной в вентилях 2n-2n2p

Правомерность степенной аппроксимации (2) подтверждается линейным характером зависимостей $\log W(\log f)$ на рис. 4 в диапазоне высоких частот.

В соотношении (2) эффективное сопротивление R_{ef} не зависит от частоты. Значение $\alpha < 1$ определяется видом функции $R(V_{gs})$. Отсюда следует, что в области высоких частот зависимость $W(f, C_{\Sigma})$, где $C_{\Sigma} = C_L + C_{int}$ должна иметь вид:

$$W(f, C_{\Sigma}) \sim f^{\alpha} (C_L + C_{int})^{1+\alpha}. \quad (3)$$

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

На рис. 5 представлены зависимости $W(C_L)$, измеренные для вентилях 2п-2п2р ($\alpha = 0,75$) при конечных значениях внутренних емкостей вентилях C_{int} и при $C_{int} = 0$ на частоте 2 МГц. Из рисунка видно, что при $C_{int} = 0$ зависимость $W(C_L)$ в логарифмическом масштабе линейна. Наклон прямой 2 (1,75) в точности соответствует значению $\alpha + 1$. Это соответствует функции (2) и позволяет говорить о соотношениях (2) и (3) как о закономерностях. Разность абсцисс линий 1 и 2 при заданном значении W дает внутреннюю емкость вентиля C_{int} .

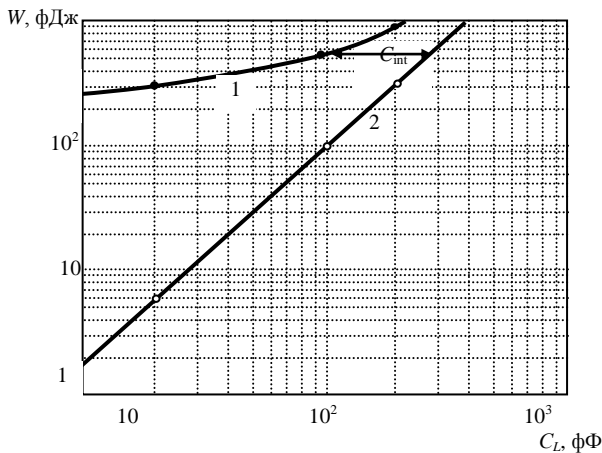


Рис. 5. Зависимости $W(C_L)$ для $C_{int} \neq 0$ (1) и $C_{int} = 0$ (2) (вентили 2п-2п2р, $f = 2$ МГц)

Научный и практический интерес представляет экспериментальное подтверждение закономерностей энергоэффективности.

Наиболее предпочтительным является подтверждение закономерностей энергопотребления методами физического эксперимента, однако процесс измерения мощности в диапазоне до нескольких десятков нановатт сопровождается рядом технических трудностей. Практическая возможность наблюдать картину, представленную на рис. 3,4, зависит от возможностей контрольно-измерительного оборудования и ограничена сложностью постановки эксперимента. Сложность

натурного эксперимента можно упростить, если измерять мощность (энергию), потребляемую не одним вентиляем, а большой группой эквивалентных вентилях количеством N . Чем выше значение N , тем проще и точнее можно получить зависимость потребляемой энергии от частоты.

Так, в работах [10] и [11] для $N=2400$ и $N=445$, соответственно, получены экспериментальные зависимости энергопотребления, представленные на рис. 6.

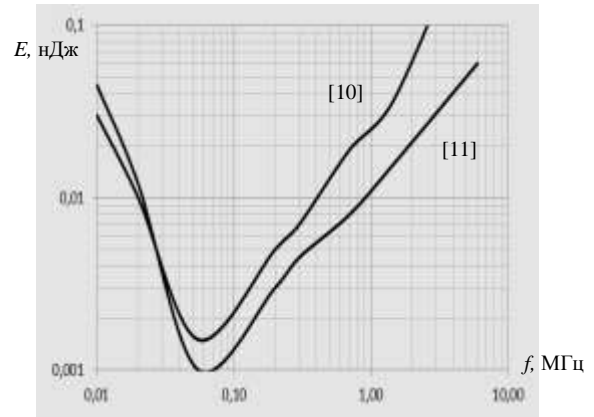


Рис. 6. Экспериментальные зависимости энергопотребления от тактовой частоты

Проведенный нами анализ экспериментальных результатов показал, что зависимости (рис. 6), представленные в этих работах, тождественны нашим теоретическим результатам, полученным при помощи соотношения (2).

В результате анализа экспериментальных зависимостей, приведенных в [10,11], нами были определены численные значения коэффициентов α , R_{ef} , C_{int} и P_0 , входящих в теоретическое соотношение (2). Значения коэффициентов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения параметров α , R_{ef} , C_{int} и P_0 для компьютерной модели и вентилях из [10] и [11]

№ эксперимента	α	R_{ef} , кОм	C_{int} , фФ	P_0 , пВт
Компьютерная модель (рис. 1)	0,75	3,90	170	11,4
[10] рис. 5	0,82	5,23	2450	45,6
[11] рис. 5	0,8	6,11	3062	51,03

Таким образом, получено экспериментальное подтверждение полумпирического соотношения (2), что позволяет говорить о нем, как о закономерности, а его коэффициенты могут являться параметрами характеристики адиабатических схем по уровню энергопотребления (пример характеристики - таблица 1).

Установленные при помощи соотношения (2) закономерности энергопотребления позволяют выбрать

компромисс между энергопотреблением и быстродействием, оптимизировать энергетические характеристики квазиadiaбатических базовых логических вентилях, а также прогнозировать их улучшение при повышении качества технологии.

Вместе с тем, для дальнейшего развития необходимо исследование возможностей по совершенствованию характеристик адиабатической элементной базы и источников питания.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ состояния разработок термодинамически обратимых устройств обработки информации показывает, что это направление является весьма перспективным и в настоящее время интенсивно развивается. Возможность бездиссипативного производства информации доказана теоретически. 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 [10,11]. 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 квазиadiaбатических устройств можно регулировать частотой импульсов питания, добиваясь оптимальных компромиссов [12-26]. Значительное повышение быстродействия может обеспечить применение новых электронных приборов на основе гетероструктур и квантовых эффектов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). <http://www.itrs.net>. 2013.
- [2] Орликовский А.А. Проблемы развития кремниевой микро- и наноэлектроники. www.kosrad.ru/conf/mephi/problem.ppt. 2013.
- [3] Bennett C.H. The thermodynamics of computation - a review // *Int. J. of Theor. Phys.* 1982. V. 21. № 12. P. 905-945.
- [4] Bennett C.H. Notes on the history of reversible computation // *IBM J. of Res. & Dev.* 1988. V. 32. № 1. P. 16-23.
- [5] Landauer R. Information is physical // *Physics Today*. 1991. V. 44. P. 23-29.
- [6] Валиев К.А., Старосельский В.И. Модель и свойства термодинамически обратимого логического вентиля // *Микроэлектроника РАН*. 2000. Т. 29. № 2. С. 3-18.
- [7] Лосев В.В., Старосельский В.И. Закономерности энергопотребления в квазиadiaбатических логических вентилях // *Микроэлектроника РАН*. 2003. Т. 32. № 6. С. 68.
- [8] Лосев В.В., Старосельский В.И. Моделирование энергопотребления в асимптотически адиабатических вентилях статического типа // *Микроэлектроника РАН*. 2003. Т. 32. № 8. С. 43.
- [9] Лосев В.В., Старосельский В.И. Исследование закономерностей энергопотребления в асимптотически адиабатических вентилях статического типа // *Микроэлектроника*. 2004. Т. 33. № 3. С. 233-239.
- [10] Joonho Lim, Dong-Gyu Kim, and Soo-Ik Chae. nMOS reversible energy recovery logic for ultra-low-energy applications // *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*. JUNE 2000. V. 35. № 6.
- [11] Hamid Mahmoodi-Meimand, Ali Afzali-Kusha, Mehrdad Nourani. Efficiency of Adiabatic Logic for Low-Power, Low-Noise VLSI // *Proc. 43rd IEEE Midwest Symp. on Circuits and Systems*, Lansing MI. Aug 8-11, 2009.
- [12] Athas W.C., Svensson J., Koller J.G., Tzartanis N., Choi E.Y. Low-power digital systems based on adiabatic-switching principles // *IEEE Trans. on VLSI Syst.* Dec. 1994. V. 2. № 4. P. 398-408.
- [13] Ferrary A. Adiabatic Switching. Adiabatic Logic // *Wed Mar 20 12:14:22 PST 1966* (интернет).
- [14] Younis S.G., Knight T.F. Asymptotically zero energy split-level charge recovery logic // *Proc. of 1994 Int. Workshop on Low Power Design*. April 1994. P. 177-182.
- [15] Старосельский В.И. Реверсивная логика // *Микроэлектроника РАН*. 1999. Т. 28. № 3. С. 213-222.
- [16] Denker J.S. A Review of Adiabatic computing // *Proc. of 1994 Symp. on Low Power Electronics*. San Diego. Oct. 1994.
- [17] 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.
- [18] Seitz C.L., Frey A.H., Mattisson S., Rabin S.D., Speck D.A., van de Snepscheut J.L.A. Hot-clock nMOS // *1985 Chapel Hill Conf. on VLSI*. Rockville, MD. Computer Science Press. 1985. P. 1-17.
- [19] Himman R.T., Schlecht M.F. Recovered energy logic — a highly efficient alternative to today's logic circuits // *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf. Record*. 1993. P. 17-26.
- [20] Himman R.T., Schlecht M.F. Recovered energy logic: a single clock AC logic // *IWLDPD'94 Workshop Proceedings*. 1994. P. 153-158.
- [21] Dickinson G., Denker J.S. Adiabatic dynamic logic // *Proc. IEEE 1994 CICC*. 1994. P. 282-285.
- [22] Dickinson G., Denker J.S. Adiabatic dynamic logic // *IEEE J. of Solid St. Circ.* 1995. V. 30. № 3. P. 311-315.
- [23] Moon Y., Jeong D.-K. An efficient charge recovery logic circuit // *IEEE J. SSC*. Apr. 1996. V. 31. № 4. P. 514-522.
- [24] Tzartanis N., Athas W.C. Energy recovery for the design of high-speed, low-power static RAMs. {nestoras,athas}@isi.edu URL: <http://www.isi.edu>.
- [25] Athas W.C., Koller J.G., Svensson L."J". An energy-efficient CMOS line driver using adiabatic switching // *Inform. Sci. Inst. CA, Tech. Rep. ACMOS-TR-2*. July 1993.
- [26] Athas W.C., Koller J.G., Svensson L."J". An energy-efficient CMOS line driver using adiabatic switching // *USC/ISI Tech. Rep. ACMOS-TR-2a*. Nov3, 1993.