

Энергоэффективная линия связи для систем на кристалле с динамическим управлением частотой синхронизации

Ю.Ф. Адамов, Е.С. Балака, Н.М. Горшкова, А.Г. Сibaгатуллин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, adamov@ippm.ru

Аннотация — В статье рассмотрена проблема снижения энергопотребления в современных системах на кристалле. Предложены новые схемы приемопередающих блоков, в которых переключаются только режимы их работы.

Ключевые слова — энергоэффективность, линии передачи сигналов, системы на кристалле.

I. ВВЕДЕНИЕ

Существенное снижение энергопотребления в современных системах на кристалле достигается установлением минимально необходимой частоты синхросигнала. Однако передача каждого бита информации требует постоянной энергии, определяемой емкостью проводника и логическим перепадом. На высоких частотах передача сигнала импульсом тока дает снижение энергии на передачу единицы информации. На низких частотах выгоднее передавать информацию импульсами напряжения. Традиционное решение проблемы эффективной передачи информации состоит в переключении потенциальных и токовых приемопередающих блоков, что увеличивает площадь кристалла.

Предлагаются новые схемы приемопередающих блоков, в которых переключаются только режимы их работы. Площадь приемопередающих блоков возрастет не более чем на 20%.

II. ПОМЕХИ В ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Как известно, для уменьшения перекрестных помех необходимо уменьшение амплитуды переключения уровня сигнала [1]. При уменьшении амплитуды переключения, уменьшается энергия, которая требуется каждый раз при изменении состояний триггеров и вентилях. Помехи от таких блоков требуют первоочередного подавления.

В структуре микросхемы помеха в линии связи определяется влиянием близлежащих проводников в нижнем и верхнем слоях металлизации, а также в проводниках, расположенных рядом в том же слое металлизации (рис. 1а) [2, 3]. Исходя из параметров технологического процесса, влиянием верхнего и нижнего проводников можно пренебречь, т.к.

$C_B \ll C_{ПАР}$, $C_H \ll C_{ПАР}$. Таким образом, основной вклад вносят помехи от проводников в том же слое металлизации.

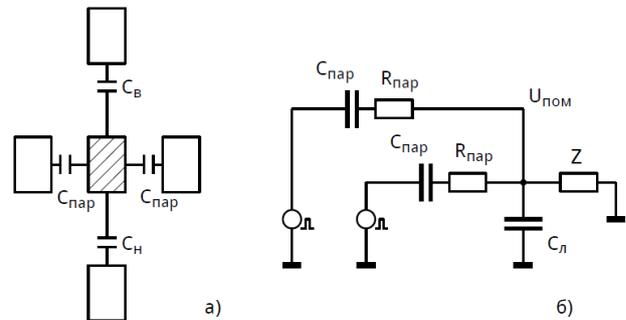


Рис. 1. Влияние, оказываемое со стороны близлежащих проводников, и эквивалентная схема для оценки величины помех

Для такого типа помех на рис. 1б представлена эквивалентная схема для расчёта величины помехи. Следовательно, для помехи в линии связи имеет место соотношение:

$$U_{ПОМ} = \frac{2C_{ПАР}\Delta U_{ЛП}Z}{t_{фр}}$$

где $C_{ПАР}$ – паразитная емкость между проводниками; Z — сопротивление источника сигнала, $\Delta U_{ЛП}$ — логический перепад сигнала, $t_{фр}$ — длительность фронта сигнала. Таким образом, для сигнала с $\Delta U_{ЛП} = 1.8$ В и длительностью фронта $t_{фр} = 50$ псек в линии длиной $l = 2$ мм, $Z = 100$ Ом оценочная величина перекрёстной помехи достигает значения $U_{ПОМ} = 0,72$ В. Формула применима для линий связи с высоким сопротивлением, когда постоянная времени больше или равна длительности фронта сигнала.

III. СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Линию связи в металлическом проводнике на кристалле можно представить в виде распределённой цепи пассивных элементов. На рис. 2 приведён фрагмент линии — ячейка для проводника длиной 200 мкм в типовом технологическом процессе

0,18 мкм. Погонное сопротивление металлического проводника в таком технологическом процессе приближённо можно считать равным 180 Ом/мм. Погонная индуктивность приближённо равна 1 нГ/мм.

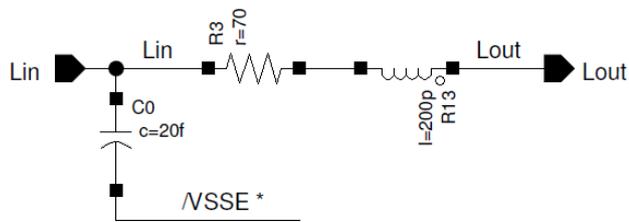


Рис. 2. Ячейка линии задержки для проводника длиной 200 мкм, шириной 0,4 мкм для типового цифрового технологического процесса с нормами 0,18 мкм

Для передачи сигналов по длинным линиям связи известны несколько способов [4]. Один из них — использование буфера с большой нагрузочной способностью. Недостатком такого метода является значительное токопотребление в моменты переключения сигналов и недопустимо большой ток линии. Другой способ — использование дополнительных буферов через равные промежутки длины (рис. 3). В данном случае в длинных линиях (при длине более 1 мм) значительно возрастают количество элементов, токопотребление и существенно усложняется топологическое проектирование. К примеру, для линии длиной 2 мм при последовательном включении буферов через каждые 200 мкм количество буферов увеличивается до 10. Известно множество различных подходов для реализации линий связи на кристалле. Наиболее распространённым из них является добавление промежуточных буферов. Все они основаны на оптимальном построении деревьев сигналов и точном расчёте индуктивности и ёмкости цепей.

Основными критериями при выборе способа передачи сигнала являются: энергопотребление, приведённое к длительности одного периода синхросигнала, значение тока, протекающего в линии, общее токопотребление приёмника и передатчика (либо всех элементов линии, если они распределены по всей линии), преимущественное использование токового режима передачи сигнала с малым логическим перепадом сигнала в линии для большей помехозащищённости и минимизация задержек.

В работе предложен новый способ снижения перекрёстных помех в линиях связи путём переключения режимов работы на различных частотах. На рис. 3 снизу приведено новое решение для передачи сигнала по длинной линии.

В режиме высокочастотной передачи сигнала импульсом тока ключ со стороны передатчика разомкнут, выходной резистор определяет величину управляющего тока, конденсатор, включённый параллельно выходному резистору, выполняет функцию эквалайзера и компенсирует ослабление

сигнала в линии. Со стороны приемника ключ обратной связи инвертирующего усилителя замкнут, амплитуда входного сигнала во много раз меньше амплитуды переключения сигналов логических элементов. Ключи меняют состояние в режиме низкочастотной передачи, а сигнал в линии связи возрастает до уровня источника питания.

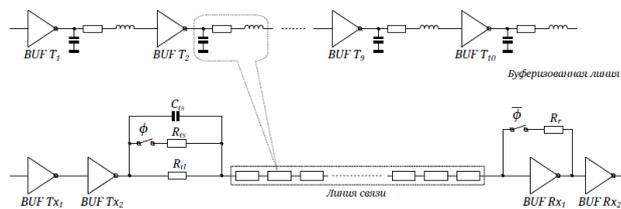


Рис. 3. Типовая линия с повторяющимися буферами, расположенными на равном расстоянии, и предложенное новое решение для линии связи с переключением режимов передачи сигнала

Инвертирующий усилитель с обратной связью $BUFRx_1$ является детектором сигнала, преобразующим ток в линии в потенциальный сигнал на выходе. Буфер $BUFRx_2$ формирует выходной сигнал с необходимыми длительностями фронтов и полным логическим перепадом для дальнейшей цифровой обработки. На высоких частотах сигнала энергетическая эффективность токового режима передачи обусловлена уменьшением в десять раз логического перепада сигнала. Дополнительная помехоустойчивость достигается за счёт передачи по линии не напряжения, а тока, и его детектировании на стороне приёмника.

На низких частотах используется потенциальный режим с ограничением тока. В этом режиме ключ ϕ замкнут, а ключ $\bar{\phi}$ разомкнут. Ограничение тока в линии достигается добавлением дополнительного резистора на стороне передатчика. Для низких частот потенциальный режим является энергетически более эффективным, т.к. отсутствует постоянная составляющая потребляемого тока. Однако использование такого режима для высоких частот невозможно из-за нарушения работоспособности. На высоких частотах в потенциальном режиме происходит значительное искажение сигнала.

IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ ЛИНИЙ СВЯЗИ

На рис. 4 приведена электрическая схема для моделирования различных реализаций линий передачи сигнала длиной 2 мм в режиме минимального энергопотребления. Последовательно сверху вниз представлены:

– линия с периодически повторяющимися через равные промежутки (200 мкм) буферами, включающими два идентичных КМОП инвертора;

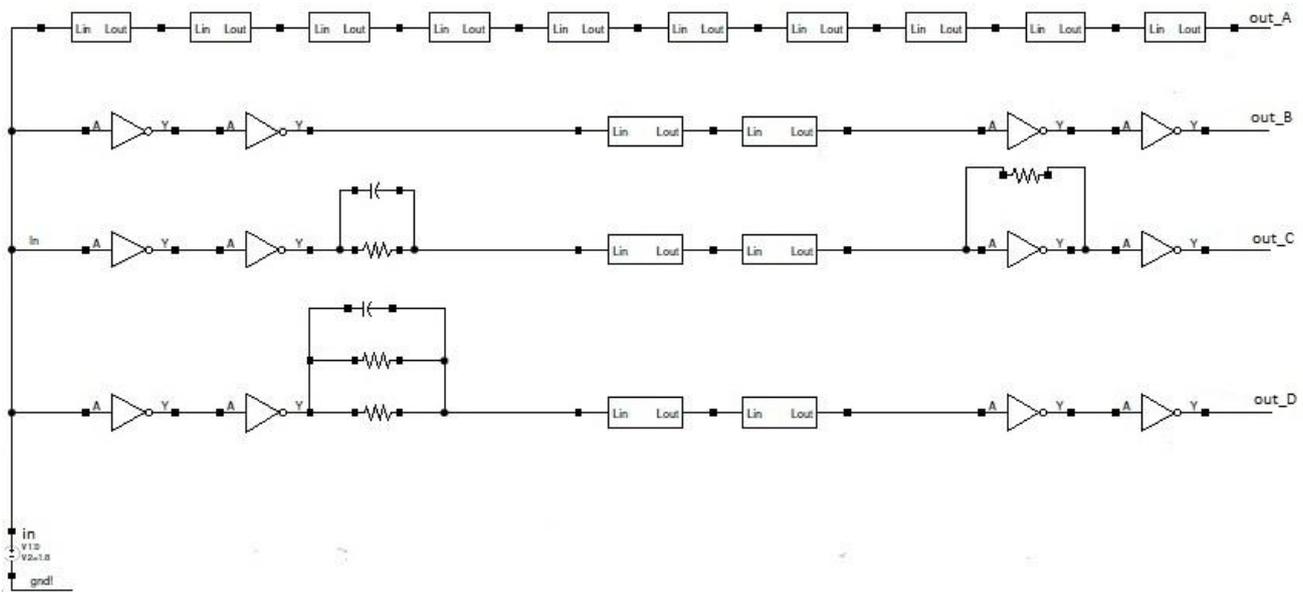


Рис. 4. Электрическая схема для моделирования различных линий передачи сигнала длиной 2мм в режиме минимального энергопотребления

- линия с выходным буфером с большой нагрузочной способностью;
- предложенная линия в токовом режиме.
- предложенная линия в потенциальном режиме.

Токový и потенциальный режимы представлены на схеме в виде двух различных линий.

На рис. 5, 6 представлены результаты моделирования для входных сигналов с частотами 500 МГц и 1 ГГц, соответственно.

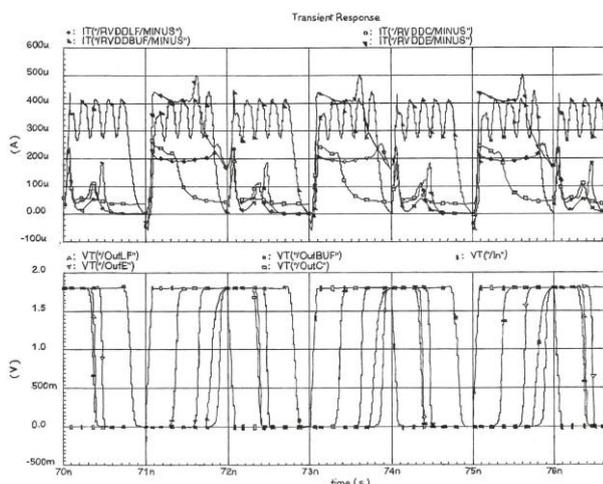


Рис. 5. Результаты моделирования различных линий передачи сигнала длиной 2 мм в режиме минимального энергопотребления при частоте входного сигнала 500 МГц. Сверху токопотребление приёмника и передатчика линии, снизу – формы выходных сигналов

Из графиков видно, что для буферизованной линии на частотах более 1 ГГц происходит значительное искажение сигнала (в частности, изменяется его скважность). Для потенциального режима на частотах (более 700 МГц для линии длиной 2 мм и данного технологического процесса) линия связи становится неработоспособной (рис. 6).

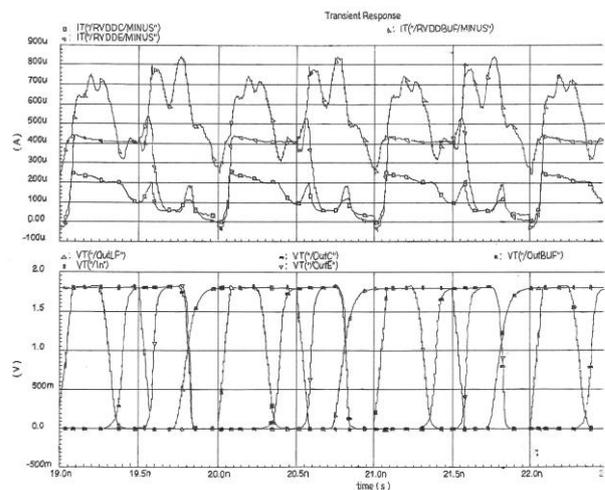


Рис. 6. Результаты моделирования различных линий передачи сигнала длиной 2 мм в режиме минимального энергопотребления при частоте входного сигнала 1 ГГц. Сверху токопотребление приёмника и передатчика линии, снизу — формы выходных сигналов

Результаты моделирования для линии длиной 2 мм при различных частотах входного сигнала представлены в таблицах 1, 2, 3 для частот 20 МГц, 500 МГц и 1 ГГц, соответственно.

Таблица 1

Результаты моделирования линии длиной 2 мм в режиме минимальной мощности для входного сигнала частотой 20 МГц

Тип буферов для линии	Задержка фронта, псек	Задержка среза, псек	Максимальный ток в линии, мкА	Энергия переключения за период, фДж	Максимальный ток потребления, мкА
Линия с буферами через 200 мкм	759,0	773,9	99,8	993,0	444,9
Линия с мощным буфером	600,7	506,2	348,8	777,6	502,3
Линия в потенциальном режиме	963,6	739,6	356,4	711,0	257,8
Линия в токовом режиме	1717,0	3454,0	166,8	2164,0	241,0

Таблица 2

Результаты моделирования линии длиной 2 мм в режиме минимальной мощности для входного сигнала частотой 500 МГц

Тип буферов для линии	Задержка фронта, псек	Задержка среза, псек	Максимальный ток в линии, мкА	Энергия переключения за период, фДж	Максимальный ток потребления, мкА
Линия с буферами через 200 мкм	759,0	773,9	99,8	993,0	444,9
Линия с мощным буфером	595,8	435,8	343,9	683,5	502,3
Линия в потенциальном режиме	937,7	301,0	329,2	415,1	298,0
Линия в токовом режиме	458,0	259,8	172,8	307,8	267,8

Таблица 3

Результаты моделирования линии длиной 2 мм в режиме минимальной мощности для входного сигнала частотой 1 ГГц

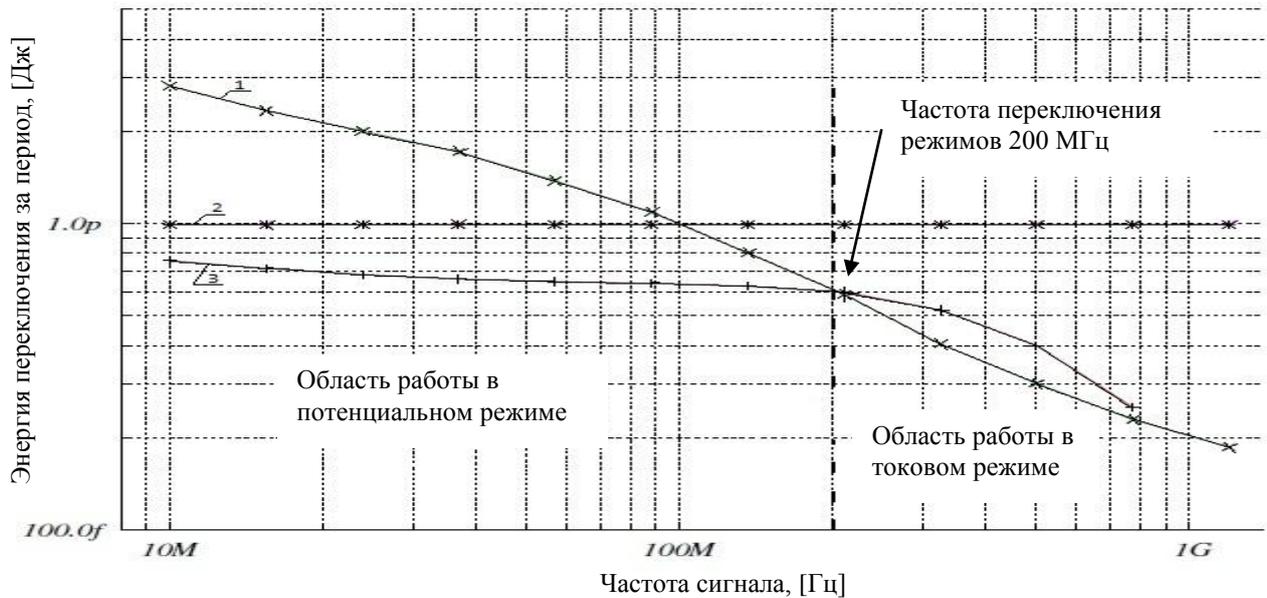
Тип буферов для линии	Задержка фронта, псек	Задержка среза, псек	Максимальный ток в линии, мкА	Энергия переключения за период, фДж	Максимальный ток потребления, мкА
Линия с буферами через 200 мкм	759,0	773,9	99,8	993,0	444,9
Линия с мощным буфером	554,6	280,1	343,9	683,5	502,3
Линия в потенциальном режиме	неработоспособен				
Линия в токовом режиме	342,3	284,2	172,8	307,8	267,8

Из таблиц видно, что энергия переключения на один период входного сигнала на высоких частотах в токовом режиме для данной длины проводника более чем втрое меньше по величине для таковой в случае буферизованной линии. Задержка фронтов (срезов) с ростом частоты для токового режима уменьшается, при том, что ток в линии остаётся прежним. Для линии

с мощным буфером и линии в потенциальном режиме максимальный ток близок к предельно допустимому. При использованной ширине проводников, равной 0,4 мкм, при допустимой максимальной плотности тока 1 мА/мкм допустимая величина тока составляет 400 мкА.

Следовательно, для достижения наибольшей эффективности необходимо совместить два различных режима функционирования, каждый из которых эффективен в своей области. Для низкочастотных сигналов таковым является режим с потенциальной передачей сигнала, а для высокочастотных — с токовой.

Границу переключения необходимо выбрать вблизи пересечения зависимостей энергии переключения за период входного сигнала для каждого из режимов от частоты входного сигнала. На рис. 7, 8 и 9 представлены такие зависимости для трёх различных длин линий связи на кристалле — 2 мм, 1 мм и 4 мм, соответственно.

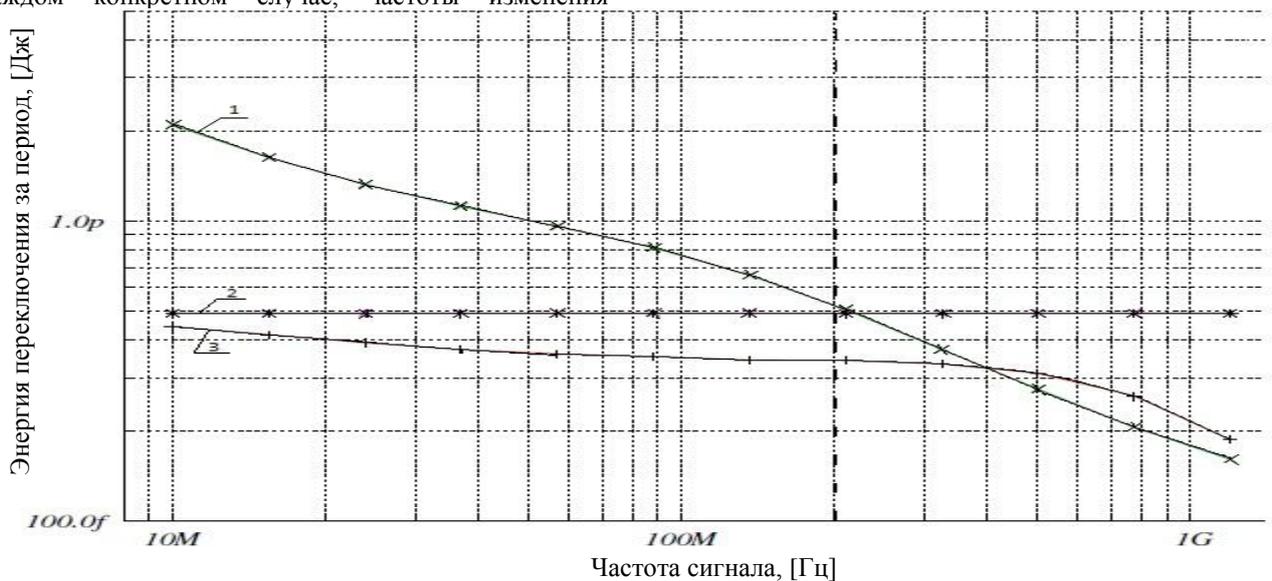


1 – Токовый режим. Линия 2 мм. 2 –Буферизированная линия 2 мм. 3 – Потенциальный режим. Линия 2мм.

Рис. 7. Энергия переключения для линии длиной 2 мм

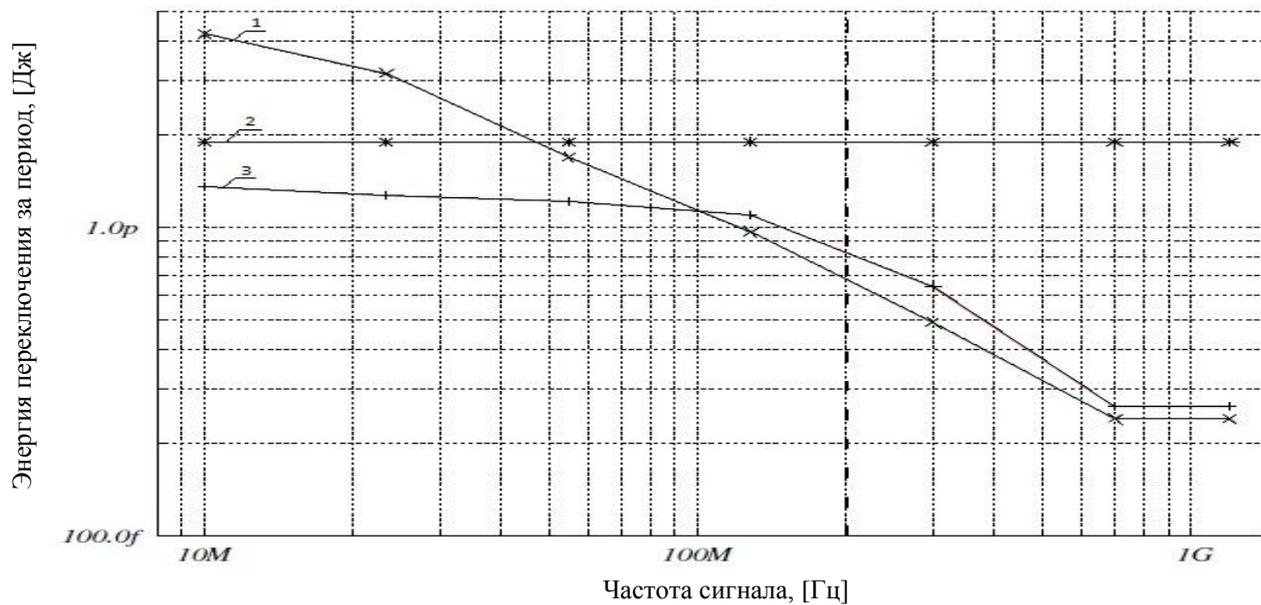
Универсальной точкой переключения режимов для различных длин линий связи выбрана частота сигнала 200 МГц. Возможно также использование для различных длин линий различной, более актуальной в каждом конкретном случае, частоты изменения

режима. Однако это усложняет алгоритм переключения режимов и создаёт необходимость более точной оценки такой частоты переключения для каждой из длинных цепей.



1 – Токовый режим. Линия 1 мм. 2 –Буферизированная линия 1 мм. 3 – Потенциальный режим. Линия 1мм.

Рис. 8. Энергия переключения для линии длиной 1 мм



1 – Токвый режим. Линия 1 мм. 2 –Буферизированная линия 1 мм. 3 – Потенциальный режим. Линия 1мм.

Рис. 9. Энергия переключения для линии длиной 4 мм

При увеличении длины линии энергоэффективность повышается при использовании токового режима, что подтверждается результатами моделирования при различных технологических изменениях и в различных диапазонах температур.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Heydari Payam, Pedram Massoud Analysis and reduction of capacitive coupling noise in high-speed VLSI circuits // Proc. Intel Conf. on Computer Design (ICCD). 2001. P. 104–109.
- [2] Y. Massoud, S. Majors, J. Kawa et al. Managing on-chip inductive effects // Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on. 2002. Dec. Vol. 10. No. 6. P. 789-798.
- [3] Zhang Tianpei, Sapatnekar Sachin S. Simultaneous Shield and Buffer Insertion for Crosstalk Noise Reduction // in Global Routing, Proc. ICCD'04. IEEE Computer Society Press. 2004. P. 93-98.
- [4] Saini S., Kumar A.M., Veeramachaneni S., Srinivas M.B. An Alternative approach to Buffer Insertion for Delay and Power Reduction in VLSI Interconnects // VLSI Design. 23rd International Conference. 2010. P. 411-416.