

УДК 004.05

## Моделирование влияния резервирования на энергопотребление самосинхронных схем

**А. Н. Каменских**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Россия, 614990, Пермь, ул. Комсомольский пр., 29  
kamenskikh.anton@gmail.com; +7-902-64-125-45

Вектор развития микро-, а скорее уже наноэлектроники направлен в сторону постоянного уменьшения базового напряжения питания, однако современные методы проектирования позволяют не только снижать базовое напряжение, но и варьировать рабочее напряжение питания. Вычислительные системы с адаптивным питанием позволяют существенно увеличить энергоэффективность вычислительной техники. Важной задачей для построения таких систем является получение данных о динамике характеристик вследствие масштабирования входных параметров как экспериментальных, так и с помощью средств моделирования. Так как вычислительные системы с адаптивным питанием приобретают такое важное свойство как устойчивость к сбоям источника питания, то необходимо также оценить возможность их повсеместного внедрения в аппаратуру для критических областей применения. Такая аппаратура, как правило, проектируется с пассивной отказоустойчивостью. В статье приводятся данные моделирования отказоустойчивых самосинхронных полных сумматоров в системе схемотехнического моделирования.

**Ключевые слова:** самосинхронная схемотехника (ССС); надежность; отказоустойчивость; избыточные базисы; устойчивость; энергоэффективность; энергонезависимость.

### Введение

Благодаря свойству функционирования независимо от задержек, а значит и от условий среды, а также заметно меньшему энергопотреблению, по сравнению с синхронными аналогами, самосинхронная схемотехника стала активно развиваться для применения в мобильной вычислительной технике (ВТ) и в ВТ для критических систем применения. Эти свойства были использованы при построении вычислительных систем с адаптивным питанием [1].

В таких системах быстроедействие и энергопотребление выступают в роли динамических параметров. Если нет необходимости в высоком быстроедействии, происходит снижение напряжения питания и операции выполняются медленно. Однако такой подход ведет к увеличению вероятности сбоя [2, 3], поэтому возникает потребность в совершенствовании методов повышения надежности, с учетом специфики самосинхронных схем. По-

вышение надежности цифрового устройства неизбежно связано с увеличением числа транзисторов, т. е., как правило, ведет и к росту энергопотребления, и к снижению частоты работы. В статье приводятся и анализируются результаты моделирования отказоустойчивых самосинхронных схем, спроектированных с применением различных методов резервирования.

### 1. Моделирование схем и показатели оценки

В самосинхронной схемотехнике быстроедействие зависит от условий, в которых работает устройство, в основном от напряжения питания и температуры. В связи с этим был предложен показатель для оценки энергопотребления – мощность, приведенная к единице частоты [4], так как операции производятся в один такт конвейера, то по сути этот показатель отражает затраты электроэнергии на операцию:

$$P_F = \frac{I_{CC} \cdot U_{CC}}{F} \quad (1)$$

Замеры будут производиться на моделях самосинхронного сумматора в четырех возможных реализациях –

- самосинхронная,
- отказоустойчивая самосинхронная с резервированием каждого транзистора,
- отказоустойчивая самосинхронная с резервированием сетей подключения общей шины и шины питания,
- самосинхронное мажоритирование.

Моделирование выполнено в программном продукте NI MultiSim с использованием транзисторов моделей 2N7000 и BST122. Так как блоки спейсера и индикации не меняются, то потребление тока будем измерять для всей схемы в целом, при циклическом режиме работы. Оценка дается для двух схем, в первой (мажоритарная функция) резервирование транзисторного уровня не требует декомпозиции. Исходная реализация функции сложения по модулю два (S) представлена на рис. 1 [5].

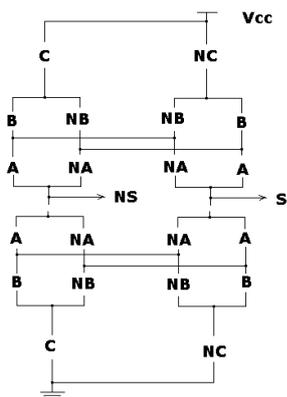


Рис. 1. Самосинхронный двоичный сумматор

Резервирование транзисторного уровня осуществляется по функции  $f_{1,2} = x_i x_i \vee x_i x_i$ , т.е. каждый транзистор заменяется цепочкой транзисторов (рис. 2).

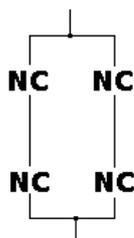


Рис. 2. Резервирование транзистора по функции  $f_{1,2} = x_i x_i \vee x_i x_i$

## 2. Оценка энергопотребления и быстродействия

Из-за ограничений описаний моделей переключения в ходе моделирования останавливаются при снижении напряжения питания ниже 3.5В (при исходных 5В). Кроме того, схема нормально функционирует при любом числе последовательно соединенных транзисторов. В табл. 1–2 приведены результаты моделирования отдельно для каждого элемента. На рис. 3 данные из табл. 2 представлены в виде диаграммы, которая позволит оценить влияние резервирования и изменения напряжения на энергопотребление.

Таблица.1. Параметры потребления электроэнергии для мажоритарного элемента

№	Напряжение, В	Ток, мА	Задержка, нс	Приведенная мощность, мВт/МГц
1	5	93	291	135.32
2	4.5	63	393	111.42
3	4	39	582	90.79
4	3.5	20	1002	70.14
5	5	83	337	139.86
6	4.5	57	455	116.71
7	4	35	674	94.36
8	3.5	18	1166	73.46
9	5	85	335	142.38
10	4.5	57	457	117.22
11	4	35	670	93.80
12	3.5	18	10	73.21

Таблица 2. Параметры потребления электроэнергии для элемента сложения по модулю два

№	Напряжение, В	Ток, мА	Задержка, нс	Приведенная мощность, мВт/МГц
1	5	109	360	196.20
2	4.5	76	484	165.53
3	4	47	710	133.48
4	3.5	29	1067	108.30
5	5	88	474	208.56
6	4.5	63	619	175.49
7	4	39	889	138.68
8	3.5	22	1485	114.35
9	5	90	471	211.95
10	4.5	66	615	182.66
11	4	40	887	141.92
12	3.5	22	1480	113.96
13	5	175	412	360.50
14	4.5	120	546	294.84
15	4	69	801	217.87
16	3.5	31	1230	133.46

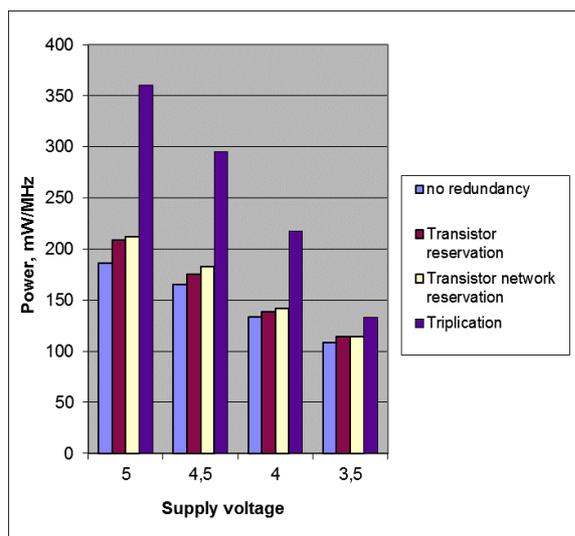


Рис. 3. Зависимость энергопотребления на единицу частоты от напряжения питания и выбранного метода резервирования

Разница в энергопотреблении между резервированием единичного транзистора и всей цепочки подключения минимальна и укладывается в погрешность измерений. В то же время, схема с мажоритарным резервированием стабильно потребляет больше энергии на один МГц [6].

### Выводы

В этой статье проанализирована первая составляющая – влияние различных методов обеспечения пассивной отказоустойчивости на энергопотребление устройства.

Умные вычислительные системы, в том числе и управляющие своим энергопотреблением, являются одним из ведущих направлений развития электроники, так современные процессоры Intel уже используют этот механизм, однако все еще в сочетании с синхронной архитектурой [7]. Самосинхронная схемотехника дает неоспоримые преимущества в виде широкого диапазона работоспособности, тесты самосинхронных устройств подтвердили их работу на ультранизком напряжении питания, а также возможность работы при сверхнизких температурах. Таким образом, самосинхронная схемотехника становится

базовым решением для вычислительных систем с адаптивным питанием. При этом для отказоустойчивых систем развитие происходит в том же направлении, ведь резкое падение напряжения можно рассматривать и как неисправность в работе устройства, а значит, появление устойчивости к этим неисправностям повысит надежность. При этом необходимо учитывать взаимное влияние энергосбережения и надежности.

### Список литературы

1. *Yakovlev A.* Energy-modulated computing // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2011. IEEE, 2011. С. 1–6.
2. *Mukhopadhyay S., Mahmoodi-Meimand H., Roy K.* Modeling and estimation of failure probability due to parameter variations in nano-scale SRAMs for yield enhancement // VLSI Circuits, 2004. Digest of Technical Papers. 2004 Symposium on. IEEE, 2004. С.64–67.
3. *Mehta N.* An ultra-low-energy, variation-tolerant FPGA architecture using component-specific mapping: дис. California Institute of Technology, 2013.
4. *Степченков Ю.А., Петрухин В.С., Дьяченко Ю.Г.* Опыт разработки самосинхронного ядра микроконтроллера на базовом матричном кристалле // Нано-и микросистемная техника. 2006. №. 5. С. 29–36.
5. *Tyurin S.F., Kamenskih A.N.* RESEARCH INTO THE RESERVATION OF LOGIC FUNCTIONS AT TRANSISTOR-LEVEL // In the World of Scientific Discoveries / V Mire Nauchnykh Otkrytiy. 2014. Т. 58. № 10.
6. *Kamenskih A.N., Tyurin S.F.* Advanced approach to development of energy-aware and naturally reliable computing systems // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EICo-nRusNW), 2015. IEEE NW Russia. IEEE, 2015. С. 75–77.
7. *Сергей Пахомов.* Особенности настройки систем с процессором Intel Core i7. URL: <http://compress.ru/Article.aspx?id=19828> (дата обращения: 01.08.2015).

# The simulation of influence of redundancy on energy-consumption

**A. N. Kamenskih**

Perm national research polytechnic university, Russia, 614990, Perm, Komsomolskaya av. 29  
kamenskikh.anton@gmail.com; +7-902-64-125-45

The development of microelectronics is focused on reduction of energy-consumption. However, modern designing techniques allows not only reduce value of supply voltage but also make it dynamic to control performance and energy-consumption. Energy-modulated approach greatly reduce energy-efficiency of a computing system. Important task in the development of energy-modulated approach is to receive test&simulation results for different circuits. Computing systems with energy-modulation becomes tolerant to faults in power supply. Thus, we should analyze how it can be implemented in computing systems for critical fields of application. Fault-tolerant techniques of synthesis is often used in such computing systems. One of the base technique in energy-modulated computing is use of a self-timed circuit. In this paper the simulation results for fault-tolerant self-timed full adder is presented.

**Key words:** *self-timed; delay insensitive; reliability; fault-tolerance; redundancy; resilience; energy-efficiency; energy-reliability.*