

УДК 621.382:004.052.2

## СРАВНЕНИЕ СБОЕУСТОЙЧИВЫХ СИНХРОННЫХ И САМОСИНХРОННЫХ СХЕМ

*Зацаринный Александр Алексеевич, д.т.н., заместитель директора ФИЦ ИУ РАН<sup>1</sup>*

*AZatsarinny@ipiran.ru, +7 (499) 137-60-31*

*Степченков Юрий Афанасьевич, к.т.н., заведующий отделом<sup>1</sup>,*

*YStepchenkov@ipiran.ru +7(495) 671-15-20*

*Дьяченко Юрий Георгиевич, к.т.н., с.н.с.<sup>1</sup>, diaura@mai.ru, +7 (499) 135-20-43*

*Рождественский Юрий Владимирович, к.т.н., вед.н.с.<sup>1</sup>, YRogdest@ipiran.ru,*

*+7 (499) 135-20-43*

*<sup>1</sup>ФИЦ ИУ РАН, г.Москва*

Аннотация: Статья рассматривает проблему разработки синхронных и самосинхронных (СС) цифровых схем, устойчивых к логическим сбоям. В синхронных схемах для обеспечения устойчивости к однократному сбою традиционно используется принцип голосования 2-из-3, приводящий к увеличению аппаратных затрат в три раза. В СС-схемах, благодаря парафазному кодированию сигналов и двухфазной дисциплине функционирования, даже дублирование обеспечивает уровень защиты от логического сбоя в 2,1 – 3,5 раз выше, чем троированный синхронный аналог. Разработка новых средств высокоточного моделирования механизмов возникновения сбоев в микроэлектронных компонентах позволит получить более точные оценки сбоеустойчивости электронных схем.

Ключевые слова: синхронная схема, самосинхронная схема, логический сбой, сбоеустойчивость, троирование, дублирование, надежность.

### Введение

Маскирование логических сбоев, возникающих из-за воздействия ядерных частиц, электромагнитных импульсов, шумовых наводок и других причин, является важной задачей при решении проблемы надежности электронной аппаратуры. Под сбоем понимается изменение логического состояния выхода элемента, вызванное одиночным событием, не приводящим к выходу из строя его активных компонентов [1].

Обнаружение и маскирование сбоя в синхронных схемах обеспечивается с помощью сбоеустойчивых кодов [2] или одновременной обработки входных данных

несколькими параллельными идентичными устройствами с последующим выбором (голосованием) правильного результата [3]. Сбоеустойчивый код рассчитан на парирование ограниченного подмножества сбоев из всех возможных. С увеличением плотности размещения транзисторов на площади микросхемы целесообразность его применения уменьшается из-за появления множественных сбоев при воздействии одиночной причины, на которые данный реализованный код не был рассчитан.

Принцип голосования обеспечивает надежное маскирование любого количества сбоев, возникших в минорном подмножестве каналов. Обычно применяется принцип "2-из-3" [3], который гарантирует надежную работу схемы в условиях, когда в каждый момент времени наблюдается не более одного логического сбоя. При большей интенсивности сбоев существует вероятность одновременного сбоя в двух и более каналах из трех, ведущего к критической ошибке.

Безусловным преимуществом троированной схемы является принятие решения "на лету" и продолжение корректной работы при однократном логическом сбое в любом канале. Она также обеспечивает защиту от множественного сбоя в одном канале.

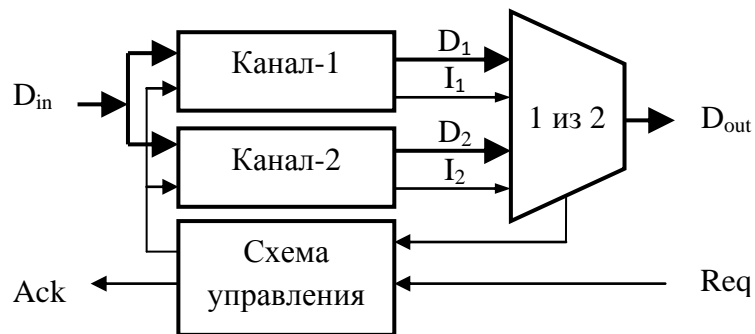
Самосинхронные (СС) цифровые схемы [4], благодаря двухфазному режиму работы и контролю завершения переключения схемы в текущую фазу, характеризуются не только независимостью поведения от задержек элементов, но и более высокой естественной устойчивостью к логическим сбоям [5-6], чем их синхронные аналоги. В работе [7] были предложены методы повышения уровня сбоеустойчивости СС-схем, которые, однако, не обеспечивают полной защиты от сбоев.

Данная статья посвящена исследованию возможностей и способов построения стопроцентных сбоеустойчивых СС-схем и их сравнению с синхронными аналогами.

### **Обеспечение сбоеустойчивости СС-схем**

Основным преимуществом действительно СС-схем является функциональная корректность их работы при любых задержках формирования и распространения внутренних и выходных сигналов за счет контроля завершения переключения всех элементов схемы в очередную фазу работы. Уменьшение напряжения питания и/или повышение окружающей температуры замедляет работу СС-схемы, но не нарушает корректности выполняемого ею алгоритма обработки данных. Свойство независимости от задержек элементов позволяет не ориентироваться на наихудший случай и обеспечивает временную приостановку работы СС-схемы до окончания сбоя в случае его обнаружения. Но классическая СС-схема обнаруживает не все типы сбоев.

Самый простой способ обеспечения маскирования СС-схемой всех сбоев – ее дублирование [8], изображенное на рисунке. Два идентичных канала обрабатывают один набор входных данных  $D_{in}$ . Их информационные выходы  $D_1$  и  $D_2$  сравниваются в схеме голосования "1-из-2" с целью выбора корректного результата  $D_{out}$ . При бесбойной работе на выход  $D_{out}$  передается выход  $D_1$  канала-1. Индикаторные выходы каналов  $I_1$  и  $I_2$  служат признаками готовности выходов каналов. Вход  $Req$  разрешает переключение данной СС-схемы в следующую фазу функционирования, а выход  $Ack$  подтверждает успешное завершение переключения данной СС-схемы в текущую фазу.



**Рисунок.** Сбоеустойчивая СС-схема

Соответствующее топологическое проектирование СС-схемы обеспечивает защиту от сбоев типа "некорректное рабочее состояние" [6]. Тогда поразрядное сравнение выходов  $D_1$  и  $D_2$  гарантирует обнаружение сбоя как состояния, не соответствующего текущей фазе работы СС-схемы.

Дублированная СС-схема имеет два источника, которые в паре могут служить признаком корректности результата: два набора информационных выходов и два индикаторных выхода. Если они попарно совпадают, значит, обе половины схемы находятся в одном состоянии. В противном случае либо переключение какого-то канала еще не завершилось, либо где-то случился логический сбой.

Сравним вероятности появления логического сбоя в синхронной и СС-схеме, считая, что вероятность сбоя прямо пропорциональна площади топологической реализации схемы, а значит, и числу транзисторов в ней.

### Сравнение обычных схем

Интенсивность сбоев  $\lambda$  в обычной схеме, не использующей принципа голосования, можно оценить по формуле [3]:

$$\lambda = N \cdot \lambda_0 \cdot \alpha,$$

где  $N$  – число транзисторов в схеме;  $\lambda_0$  – плотность потока случайных воздействий (число воздействий в единицу времени), инициирующих сбой в одном транзисторе;  $\alpha$  – вероятность сбоя при повреждении одного транзистора. Тогда отношение интенсивностей  $K_I$  сбоев синхронной схемы и ее СС-аналога будет иметь вид:

$$K_I = \frac{\lambda_S}{\lambda_{ST}} = \frac{N_S \cdot \lambda_0 \cdot \alpha_S}{N_{ST} \cdot \lambda_0 \cdot \alpha_{ST}} = \frac{N_S \cdot \alpha_S}{N_{ST} \cdot \alpha_{ST}} = \frac{\alpha_S}{A_R \cdot \alpha_{ST}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_S$  - интенсивность сбоев синхронной схемы;  $\lambda_{ST}$  - интенсивность сбоев СС-схемы;  $N_S$  - число транзисторов синхронной схемы;  $N_{ST}$  - число транзисторов СС-схемы;  $\alpha_S$  - вероятность сбоя при повреждении одного транзистора синхронной схемы;  $\alpha_{ST}$  - вероятность сбоя при повреждении одного транзистора СС-схемы;  $A_R = N_{ST} / N_S$  – коэффициент избыточности аппаратуры СС-схемы по отношению к синхронной схеме.

Примем во внимание соотношение числа транзисторов синхронного и СС-аналога в комбинационных схемах в наихудшем случае  $A_{R_C} = 2,7$  (из практики реализации комбинационных СС-схем разного типа), вероятности проявления сбоя  $\alpha_{S1} = 0,5$  и  $\alpha_{ST1} = 0,156$  [9]. Столь малая вероятность сбоя в СС-схеме обусловлена полнотой предложенного в [6] парафазного кодирования информационных сигналов, когда состояние, противоположное спейсеру, не считается запрещенным, но индицируется как спейсер. Тогда для комбинационных синхронной и СС-схем:

$$K_{I_C} = \frac{\alpha_{S1}}{A_{R_C} \cdot \alpha_{ST1}} = \frac{0,5}{2,7 \cdot 0,156} = 1,19. \quad (2)$$

Для триггерных схем соотношение числа транзисторов синхронного и СС-аналога равно  $A_{R_S} = 1,5$  в наихудшем случае, как показывает сравнение их схемотехнических реализаций, вероятности проявления сбоя  $\alpha_{S2} = 0,5$  и  $\alpha_{ST2} = 0,17$  [10]. Тогда:

$$K_{I_S} = \frac{\alpha_{S2}}{A_{R_S} \cdot \alpha_{ST2}} = \frac{0,5}{1,5 \cdot 0,17} = 1,96. \quad (3)$$

Формулы (1) - (3) наглядно демонстрируют лучшую сбоеустойчивость СС-схем по сравнению с синхронными аналогами даже несмотря на их аппаратную избыточность.

### Сравнение сбоеустойчивых схем

Оценим время бессбойной работы для сбоеустойчивых вариантов троированной синхронной и дублированной СС-схем. В синхронной схеме результат считается правильным, если он совпадает хотя бы у двух из трех блоков. Вероятность бессбойной работы  $R_{M-of-N}(t)$  для  $N$  одинаковых блоков до тех пор, пока как минимум  $M$  из них работают без сбоя, описывается уравнением [3]:

$$R_{M-of-N}(t) = \sum_{i=0}^{N-M} \left\{ \frac{N!}{i!(N-i)!} \cdot [1 - R(t)]^i \cdot R(t)^{N-i} \right\},$$

где  $R(t)$  - вероятность бессбойной работы одного блока.

Тогда в случае синхронной схемы с мажоритированием ( $N = 3, M = 2$ ) время бессбойной работы  $T_{FF\_T}$  составит [3]:

$$T_{FF\_T} = \int_0^{\infty} R_{2-of-3}(t) dt = \int_0^{\infty} [3 \cdot R(t)^2 - 2 \cdot R(t)^3] dt = \frac{5}{6 \cdot \lambda_S}.$$

В дублированной СС-схеме  $N = 2, M = 1$ . Тогда время ее бессбойной работы:

$$T_{FF\_D} = \int_0^{\infty} R_{1-of-2}(t) dt = \int_0^{\infty} [2 \cdot R(t) - R(t)^2] dt = \frac{3}{2 \cdot \lambda_{ST}}.$$

С учетом формул (1) - (3), отношение времени бессбойной работы дублированной СС-схемы и мажоритарного варианта ее синхронного аналога составит:

$$K_{TC} = \frac{T_{FF\_D}}{T_{FF\_T}} = \frac{3 \cdot 6 \cdot \lambda_S}{5 \cdot 2 \cdot \lambda_{ST}}$$

или  $K_{TC} = 2,14$  для комбинационных схем и  $K_{TC} = 3,53$  для триггерных схем.

Таким образом, за счет присущего им маскирования одиночных логических сбояв СС-схемы в случае дублирования аппаратуры обеспечивают время бессбойной работы от 2,1 до 3,5 раз больше, чем их синхронные аналоги, реализующие принцип троирования с мажоритированием результата. При этом в 1,5 раза уменьшается их избыточность по отношению к синхронному аналогу. Поэтому они являются перспективной альтернативой синхронным схемам для проектирования высоконадежных микроэлектронных устройств.

Приведенные оценки вероятностей проявления сбоя  $\alpha_S$  и  $\alpha_{ST}$  получены эвристическим путем в предположении, что все ветви в "дереве" событий, порождаемом причиной логического сбоя, имеют равную вероятность наблюдения. Повысить точность оценок можно только на основе программных средств моделирования механизмов возникновения сбояв в микроэлектронных компонентах.

### Выводы

1. Синхронные схемы с голосованием типа "N-из-M" не обеспечивают защиту от часто повторяющихся одиночных и множественных сбояв.

2. В первом приближении дублированная СС-схема обладает в 2,1 – 3,5 раза лучшей устойчивостью к сбоям, чем троированный синхронный аналог.

3. Разработка новых программных средств моделирования механизмов возникновения сбоев в микроэлектронных компонентах позволит получить более точные оценки сбоеустойчивости электронных схем и разработать более эффективные сбоеустойчивые решения.

### **Поддержка**

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0063-2019-0010.

### **Список использованных источников**

1. Викторова, В.С. Анализ надежности отказоустойчивых управляющих вычислительных систем / В.С. Викторова, Н.В. Лубков, А.С. Степанянц. Москва, Институт проблем управления РАН, 2016, 117 с. URL:[https://www.ipu.ru/sites/default/files/card\\_file/VLS.pdf](https://www.ipu.ru/sites/default/files/card_file/VLS.pdf) (дата обращения 08.06.2021).
2. Alagoz B.B. Boolean Logic with Fault Tolerant Coding // OncuBilim Algorithm and Systems Labs. – 2009. – Vol.09, Art.No:03.
3. Dubrova E. Fault-tolerant design. KTH Royal Institute of Technology, Krista, Sweden, 2013, Springer, 185 p. DOI 10.1007/978-1-4614-2113-9.
4. Zakharov, V., Stepchenkov, Y., Diachenko, Y., and Rogdestvenski, Y., Self-Timed Circuitry Retrospective, International Conference Engineering Technologies and Computer Science EnT 2020, Moscow, Russia, 24-27 June 2020, pp. 58 – 64.
5. Stepchenkov, Y.A., Kamenskih, A.N., Diachenko, Y.G., Rogdestvenski, Y.V., and Diachenko, D.Y., Fault-Tolerance of Self-Timed Circuits, 10th International Conference on Dependable Systems, Services, and Technologies (DESSERT), 2019. <https://doi.org/10.1109/DESSERT.2019.8770047> (дата обращения 08.06.2021).
6. Stepchenkov, Y.A., Kamenskih, A.N., Diachenko, Y.G., Rogdestvenski, Y.V., and Diachenko, D.Y., Improvement of the natural self-timed circuit tolerance to short-term soft errors, Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 2020, vol. 5, no. 2, pp. 44-56.
7. А. А. Зацаринный, Ю. А. Степченков, Ю. Г. Дьяченко, Ю. В. Рождественский. Самосинхронные схемы как база создания высоконадежных высокопроизводительных компьютеров следующего поколения / Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов. МММЭК–2020. 19–20 октября 2020, Москва. Материалы II Международной конференции. – Москва: МАКС Пресс, 2020. –

С 114-116. DOI: <https://doi.org/10.29003/m1535.MMMSEC-2020/114-116> (дата обращения 08.06.2021).

8. Monnet, Y., Renaudin, M., Leveugle, R., Hardening techniques against transient faults for asynchronous circuits, 11th IEEE International Conference: On-Line Testing Symposium, 2005. URL: <https://doi.org/10.1109/IOLTS.2005.30> (дата обращения 08.06.2021).

9. Степченков Ю.А., Дьяченко Ю.Г., Рождественский Ю.В., Морозов Н.В., Степченков Д.Ю., Дьяченко Д.Ю. Устойчивость самосинхронного конвейера к логическим сбоям в комбинационной части // Системы и средства информатики, 2020, Вып. 30, № 3, С. 49-55. DOI: 10.14357/08696527200305. URL: <http://selftiming.ru/new/2020/12/07/ustojchivost-samosinhronnogo-konvejera-k-logicheskim-sboyam-v-kombinacziionnoj-chasti> (дата обращения 08.06.2021).

10. Соколов И.А., Степченков Ю.А., Дьяченко Ю.Г., Рождественский Ю. В. Повышение сбоеустойчивости самосинхронных схем / Информатика и ее применения. 2020. Т. 14. № 4. С. 63-68. DOI: 10.14357/19922264200409. URL: <http://selftiming.ru/new/2021/02/01/povyshenie-sboeustojchivosti-samosinhronnyh-shem> (дата обращения 08.06.2021).

## **FAILURE-TOLERANT SYNCHRONOUS AND SELF-TIMED CIRCUITS COMPARISON**

A.A. Zatsarinny, Yu.A. Stepchenkov, Yu.G. Diachenko, Yu.V. Rogdestvenski

Abstract: The article considers the problem of developing synchronous and self-timed (ST) digital circuits that are tolerant to soft errors. Synchronous circuits traditionally use the 2-of-3 voting principle to ensure single failure, resulting in three times the hardware costs. In ST circuits, due to dual-rail signal coding and two-phase control, even duplication provides a soft error tolerance level 2.1 to 3.5 times higher than the triple modular redundant synchronous counterpart. The development of new high-precision software simulating microelectronic failure mechanisms will provide more accurate estimates for the electronic circuits' failure tolerance.

Keywords: synchronous circuit, self-timed circuit, soft error, failure tolerance, triple modular redundancy, duplication, reliability.