

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Факультет вычислительной математики и кибернетики  
Научный совет РАН «Фундаментальные проблемы элементной базы  
информационно-вычислительных и управляющих систем и материалов для их создания»  
Консорциум «Перспективные материалы и элементная база информационных  
и вычислительных систем»

---

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ в материаловедении электронных компонентов МММЭК–2022

Материалы IV Международной конференции

*24–26 октября 2022 г., Москва*

---

## MATHEMATICAL MODELING in materials science of electronic components ICM3SEC–2022

Proceedings of the International conference

*October 24–26, 2022 Moscow, Russia*



---

МОСКВА – 2022

УДК 519.6.517.958.533.6  
ББК 22.2.2218  
М34



<https://elibrary.ru/judgdl>

Ответственный редактор:

*К. К. Абгарян* – д-р.физ.-мат.наук, главный научный сотрудник,  
руководитель отдела ФИЦ ИУ РАН

**Математическое моделирование в материаловедении электрон-**  
М34 **ных компонентов.** МММЭК–2022. 24–26 октября 2022 г., Москва : Мате-  
риалы IV Международной конференции. – Москва : МАКС Пресс, 2022. –  
180 с. : ил.

ISBN 978-5-317-06871-4

<https://doi.org/10.29003/m3056.MMMSEC-2022>

Сборник включает в себя научные работы, отражающие современные мировые дости-  
жения в области материаловедения электронных компонентов и представляет новые методы  
математического моделирования и программные решения для разработки прикладных про-  
граммных систем.

Для специалистов в области вычислительного материаловедения, прикладной матема-  
тики, математического моделирования, проектирования и автоматизации изделий наноэ-  
лектроники, разработчиков современных прикладных программных систем, аспирантов и  
студентов старших курсов университетов и технических вузов.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, вычислительное материаловедение,  
прикладная математика, дизайн материалов, электронные компоненты, наноэлектроника,  
прикладные программные системы, нейроморфные системы.

УДК 519.6.517.958.533.6  
ББК 22.2.2218

**Mathematical modeling in materials science of electronic component.**  
ICM3SEC–2022. October 24–26, 2022, Moscow : Proceedings of the  
international conference. – Moscow : MAKS Press, 2022. – 180 p.

ISBN 978-5-317-06871-4

<https://doi.org/10.29003/m3056.MMMSEC-2022>

The book includes scientific works reflecting modern achievements in the field of materials sci-  
ence of electronic components and presents new methods of mathematical modeling and software  
solutions for the development of applied software systems.

For specialists in the field of computational materials science, applied mathematics, mathematical  
modeling, design and automation of nanoelectronic products, developers of modern applied software  
systems, graduate and postgraduate students.

*Key words:* mathematical modeling, computational materials science, applied mathematics,  
materials design, nanoelectronics, applied software systems, neuromorphic systems.

*Статьи публикуются в авторской редакции.*

*Использованные изображения получены из открытых источников.*

ISBN 978-5-317-06871-4

© Авторы, 2022

© Оформление. ООО «МАКС Пресс», 2022

*А.Ю. Морозов, К.К. Абгарян, Д.Л. Ревизников.* Иммитационное моделирование аналоговой импульсной нейронной сети на основе мемристоривных элементов с использованием параллельных технологий ..... 150

*О.А. Тельминов, Е.С. Горнев.* Анализ элементной базы и схемотехнических решений для нейроморфных вычислений на мемристорных кроссбарах ..... 156

**6. Ф. Моделирование структур и свойств композиционных материалов с нанокристаллами, нанокластерами, наноаморфными включениями и т.д..... 161**

*И.Ю. Братухин, А.Ф. Крячко, О.В. Шакин, Г.М. Ревунов.* Синтез микроуровневых структур композитных материалов ..... 162

*Г.С. Иванченко, А.В. Тен, М.А. Бутенко, Н.М. Кузьмин.* Моделирование колебательных свойств гидрированных алмазоподобных нанопленок ..... 164

*Е.Д. Тихонова, Е.С. Горнев.* Использование новых композиционных материалов в процессе самосовмещенного двойного паттернирования .. 167

*Д.И. Бажанов, А.Ф. Фаттахов.* Исследование влияния вакансий на процесс сегрегации примеси никеля вблизи границ дефектов структуры LSNT перовскита методом первопринципной молекулярной динамики . 170

**7. Г. Проблемы обеспечения надежности ЭКБ микроэлектроники и систем на ее основе..... 175**

*А.А. Зацаринный, Ю.А. Степченко, Ю.Г. Дьяченко, Ю.В. Рождественский, Л.П. Плеханов.* Отказоустойчивые самосинхронные схемы .. 176

## ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫЕ САМОСИНХРОННЫЕ СХЕМЫ

*Зацаринный Александр Алексеевич,*

*д.т.н., г.н.с.<sup>1</sup>, AZatsarinny@ipiran.ru, +7(499) 137-60-31*

*Степченков Юрий Афанасьевич,*

*к.т.н., руководитель отдела<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., в.н.с.<sup>1</sup>, YRogdest@ipiran.ru, +7(499) 135-20-43*

*Плеханов Леонид Петрович,*

*к.т.н., с.н.с.<sup>1</sup>, lplekhanov@inbox.ru, +7(499) 135-20-43*

<sup>1</sup>ФИЦ ИУ РАН, г. Москва

**Аннотация.** Статья исследует проблему создания отказоустойчивых самосинхронных (СС) схем. Использование избыточного СС-кодирования и двухфазной дисциплины работы обеспечивает более высокую сбоеустойчивость СС-схем в сравнении с синхронными аналогами. Использование дублирования канала обработки данных вместо традиционного для синхронных схем троирования позволяет сократить избыточность СС-схем в отказоустойчивом исполнении и обеспечивает более высокий уровень надежности в сравнении с синхронными аналогами.

**Ключевые слова:** самосинхронные схемы, логический сбой, отказ, во-тирование, парафазный сигнал, индикация.

### Введение

Парирование отказа в синхронных схемах обеспечивается с помощью сбоеустойчивых кодов или одновременной обработки входных данных несколькими параллельными идентичными устройствами с последующим вотированием правильного результата [1].

Самосинхронные (СС) цифровые схемы обладают более высокой естественной устойчивостью к логическим сбоям [2], чем их синхронные аналоги, благодаря изначальной аппаратной избыточности, двухфазному режиму работы и индицированию завершения переключения схемы в каждую текущую фазу.

## Детектирование отказа в СС-схеме

СС-схемы используют избыточное, обычно парафазное, кодирование информации. Отказ в СС-схеме означает «залипание» одной или обеих компонент парафазного сигнала в фиксированном значении. Оно обнаруживается индикаторной подсхемой, поскольку при надлежащей реализации топологии СС-схемы некорректное рабочее состояние схемы не может появиться из-за сбоя или отказа.

Основное преимущество СС-схем является функциональная корректность их работы при любых задержках формирования и распространения внутренних и выходных сигналов. Однако, это свойство затрудняет задачу обнаружения отказа, так как задержки срабатывания элементов и схемы оказываются не регламентированными.

### Варианты отказоустойчивых СС-схем

Самое простое решение – дублирование СС-схемы [3]. Дублированная СС-схема парирует первый отказ в любом из дублированных каналов и гарантирует детектирование не более двух отказов, останавливая обработку данных при выявлении второго отказа. Для обеспечения устойчивости к  $N$  последовательным отказам, каждый из которых воспринимается и детектируется как однократный отказ, ее нужно дополнить  $(N-1)$  резервными каналами.

Синхронная схема, устойчивая к  $N$  отказам, может быть реализована схемой вотирования « $(N+1)$ -из- $(2 \cdot N+1)$ » (вариант С-1) или схемой вотирования «2-из-3» с  $(N-1)$  резервными каналами (вариант С-2). Сравнение аппаратных затрат вариантов отказоустойчивых синхронных и СС-схем, приведенных к аппаратным затратам синхронного варианта С-1, показано на рисунке. Здесь учтено соотношение аппаратных затрат СС и синхронных реализаций типовых цифровых схем как 2,4.

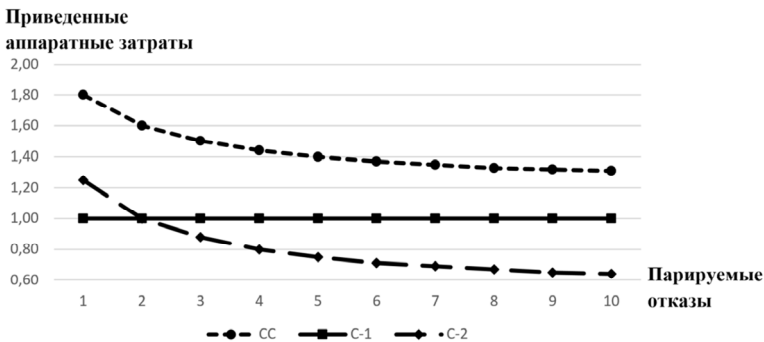


Рисунок. Аппаратные затраты СС и синхронных вариантов (С-1 и С-2)

## Выводы

1. Вотирированные синхронные схемы (N-из-M) маскируют часто повторяющиеся одиночные сбои и множественные одновременные сбои, но не гарантированно.

2. Топологические методы способны сократить число типов сбоев в СС-схемах. В частности, сделать нереализуемыми сбой типа «переключение парафазного сигнала из корректного рабочего состояния в инверсное рабочее состояние».

3. Дублированная СС-схема обладает устойчивостью к множественным логическим сбоям и однократным отказам, но при этом необходим таймер, работающий от внешнего синхросигнала.

4. При увеличении степени защищенности, т.е. числа отказов, парируемых отказоустойчивой схемой, ее СС-реализация становится менее избыточной в сравнении с традиционным синхронным решением.

## Список использованных источников

1. Song W., and Zhang G. Fault-tolerant asynchronous circuits / In book: Asynchronous on-chip networks and fault-tolerant techniques. 2022. 58 p. <https://doi.org/10.1201/9781003284789-5>.

2. 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.

3. Зацаринный А.А., Степченков Ю.А., Дьяченко Ю.Г., Рождественский Ю.В. Сравнение сбоеустойчивых синхронных и самосинхронных схем / МММЭК–2021. Москва: МАКС Пресс, 2021. С. 154-156. <https://doi.org/10.29003/m2498.MMMSEC-2021/154-156>.

## FAULT-TOLERANT SELT-TIMED CIRCUITS

*A.A. Zatsarinny, Yu.A. Stepchenkov, Yu.G. Diachenko,  
Yu.V. Rogdestvenski, L.P. Plekhanov*

**Abstract.** The article considers the problem of developing synchronous and self-timed (ST) circuits that are tolerant to faults. Redundant ST coding and two-phase discipline ensures that ST circuits are more tolerant to the faults than synchronous counterparts. Duplicating ST channels instead of tripling reduces redundancy of the fault-tolerant ST circuits and retains their reliability level compared to synchronous counterparts.

**Keywords:** self-timed circuits, soft error, fault, voting, dual-rail signal, indication.

Научное издание  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**  
в материаловедении электронных компонентов  
**МММЭК–2022**  
24–26 октября 2022 г., Москва  
Материалы IV Международной конференции

Подготовка оригинал-макета  
Издательство «МАКС Пресс»  
Главный редактор: *Е. М. Бугачева*  
Компьютерная верстка: *Н. С. Давыдова*  
Обложка: *А. В. Кононова*

Подписано в печать 22.10.2022 г.  
Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 11,25.  
Тираж 300 (1–100) экз. Изд. № 142.

Издательство ООО «МАКС Пресс»  
Лицензия ИД N00510 от 01.12.99 г.

119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы,  
МГУ им. М. В. Ломоносова, 2-й учебный корпус, 527 к.  
Тел. 8(495) 939–3890/91. Тел./Факс 8(495) 939–3891.

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленных материалов в ООО «Фотоэксперт»  
109316, г. Москва, Волгоградский проспект, д. 42,  
корп. 5, эт. 1, пом. I, ком. 6.3-23Н