

# ПОВЫШЕНИЕ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ САМОСИНХРОННОГО ТРОИЧНОГО УМНОЖИТЕЛЯ

Ю.А. Степченков, Ю.В. Рождественский, Ю.Г. Дьяченко,  
Н.В. Морозов, Д.Ю. Степченков, А.В. Рождественскене



**Институт проблем информатики  
Федерального исследовательского центра  
«Информатика и управление» РАН**

# СОДЕРЖАНИЕ

---

- ▣ **Источники логических сбоев**
- ▣ **Троичный самосинхронный (СС) умножитель**
- ▣ **Сбоеустойчивая индикация троичного СС умножителя**
- ▣ **Повышение сбоеустойчивости троичного СС умножителя**
- ▣ **Заключение**

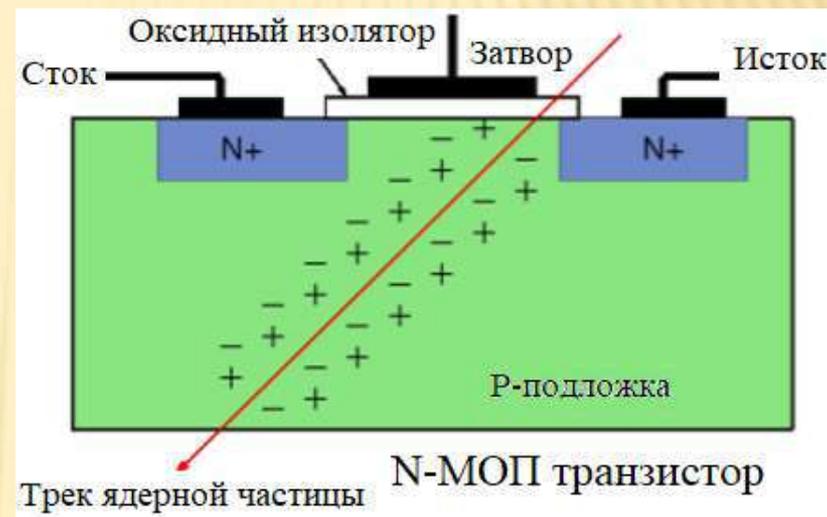
# ИСТОЧНИКИ ЛОГИЧЕСКИХ СБОЕВ: ИОНИЗАЦИЯ

- ❖ Космические лучи
- ❖ Радиация
- ❖ Ядерные частицы

Образование пар  
носителей заряда

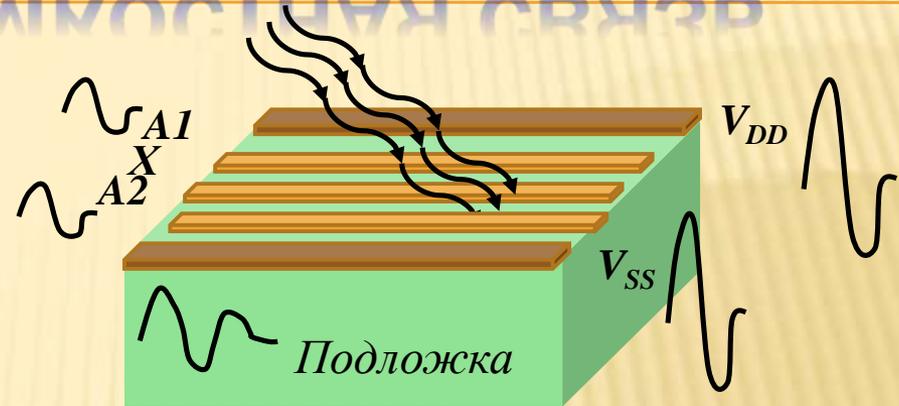
Ток ионизации

Короткий импульс



# ИСТОЧНИКИ ЛОГИЧЕСКИХ СБОЕВ: ПАРАЗИТНАЯ ЕМКОСТНАЯ СВЯЗЬ

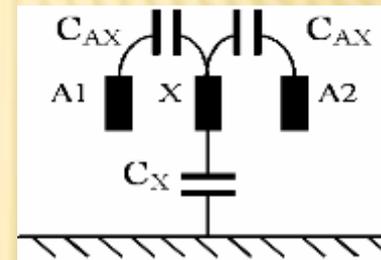
- ❖ Электромагнитный импульс
- ❖ Шум по подложке
- ❖ Наводки от соседних трасс



Изменение потенциала  
обкладок конденсатора

Зарядка / разрядка

Короткий импульс



# САМОСИНХРОННЫЕ СХЕМЫ

- ❖ Избыточное (парафазное) кодирование
- ❖ Двухфазная дисциплина работы
- ❖ Индикация окончания всех переключений



- ❖ Независимость от задержек элементов
- ❖ Обнаружение и локализация константных неисправностей
- ❖ Высокий уровень иммунности к кратковременным логическим сбоям

# ПАРАФАЗНОЕ КОДИРОВАНИЕ

$X \rightarrow \{X, XB\}$

Синхронный X	Парафазный		Значение
	X	XB	
0	0	1	Бит 0
1	1	0	Бит 1
-	0	0	Спейсер_0
-	1	1	Спейсер_1

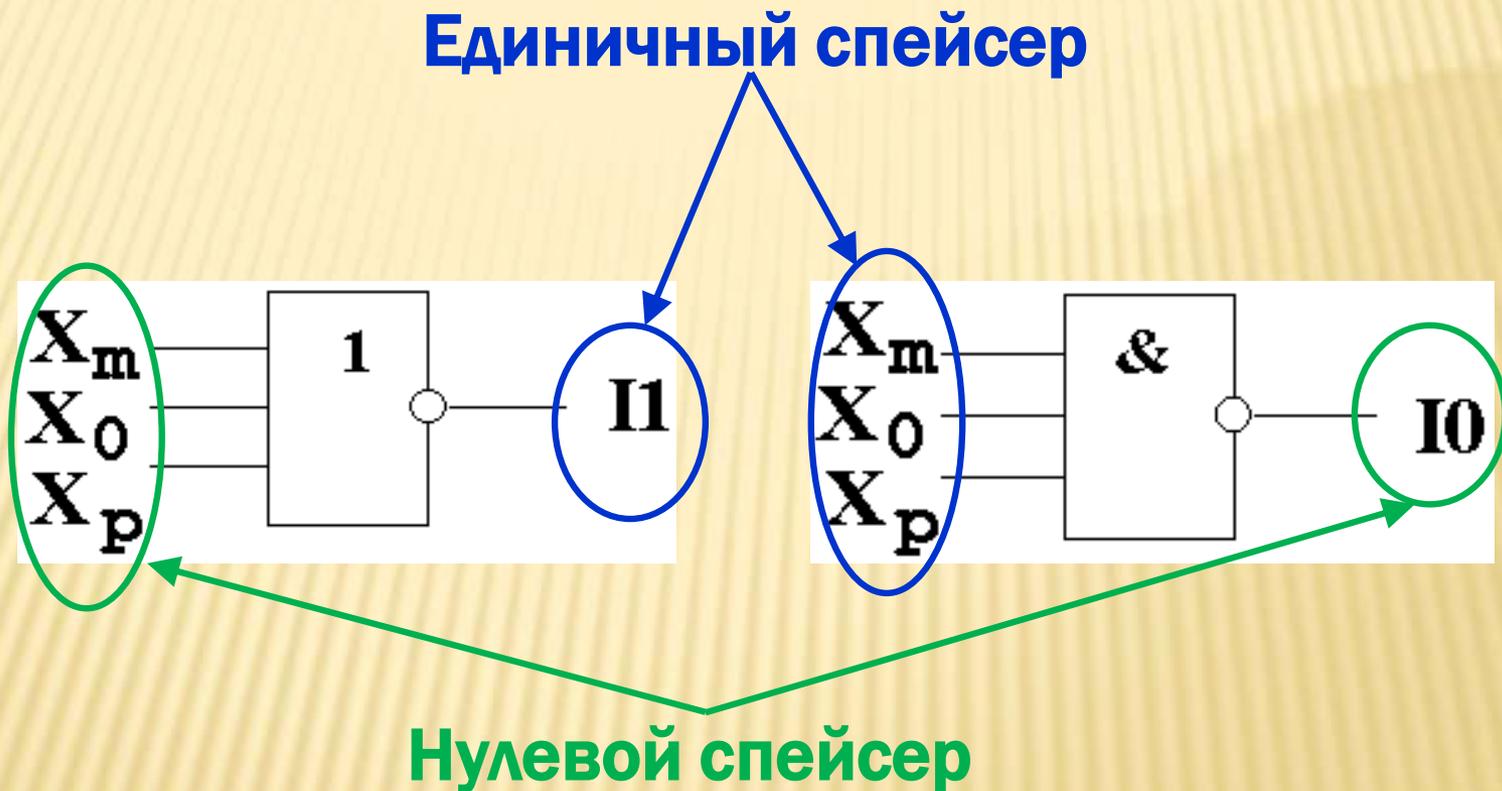
# САМОСИНХРОННОЕ ТРОИЧНОЕ КОДИРОВАНИЕ

$$X \rightarrow \{X_m, X_0, X_p\}$$

Для нулевого спейсера:

Синхронный $X$	Троичный			Значение
	$X_m$	$X_0$	$X_p$	
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>-</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>
<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>+1</b>
<b>-</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>Спейсер</b>
<b>-</b>	<b>Прочие комбинации</b>			<b>Запрещены</b>

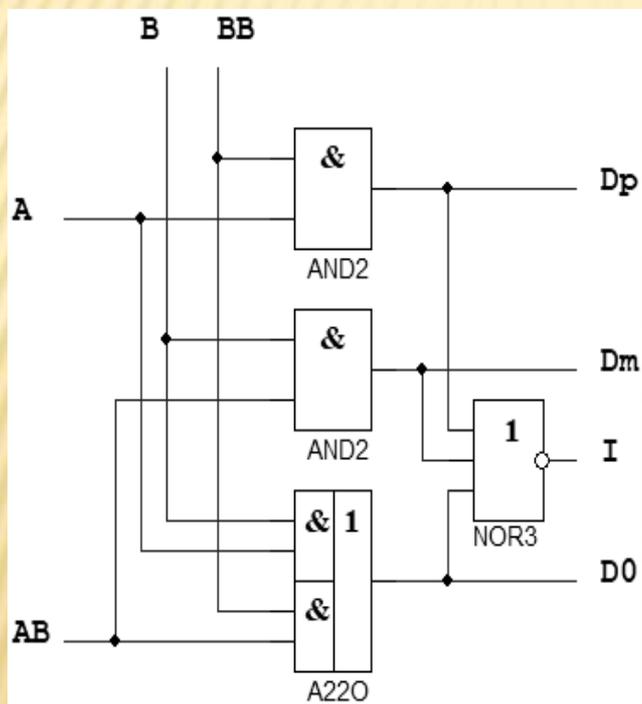
# ИНДИКАЦИЯ ТРОИЧНЫХ СИГНАЛОВ





# ИНДИКАЦИЯ ВЫХОДА СУММЫ (1)

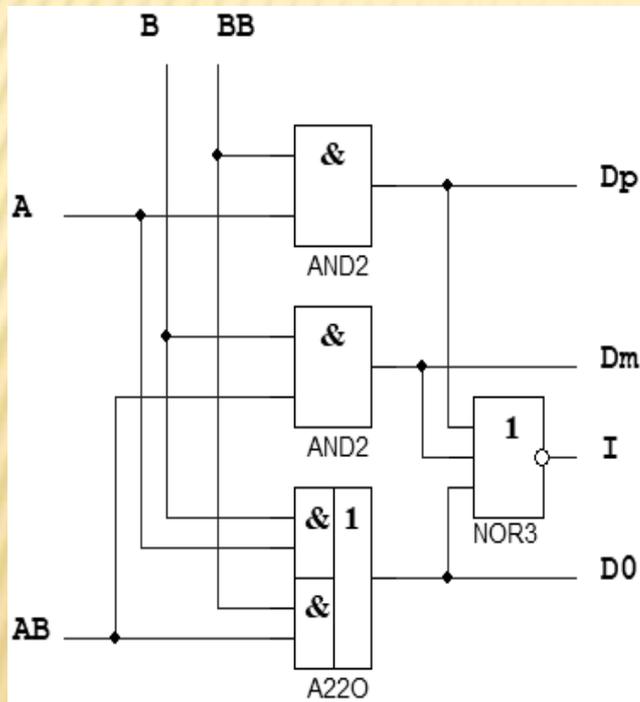
## Бесбойные состояния



A	AB	B	BB	Dp	Dm	D0	I
0	0	*	*	0	0	0	1
*	*	0	0	0	0	0	1
0	1	0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0	1	0

# ИНДИКАЦИЯ ВЫХОДА СУММЫ (2)

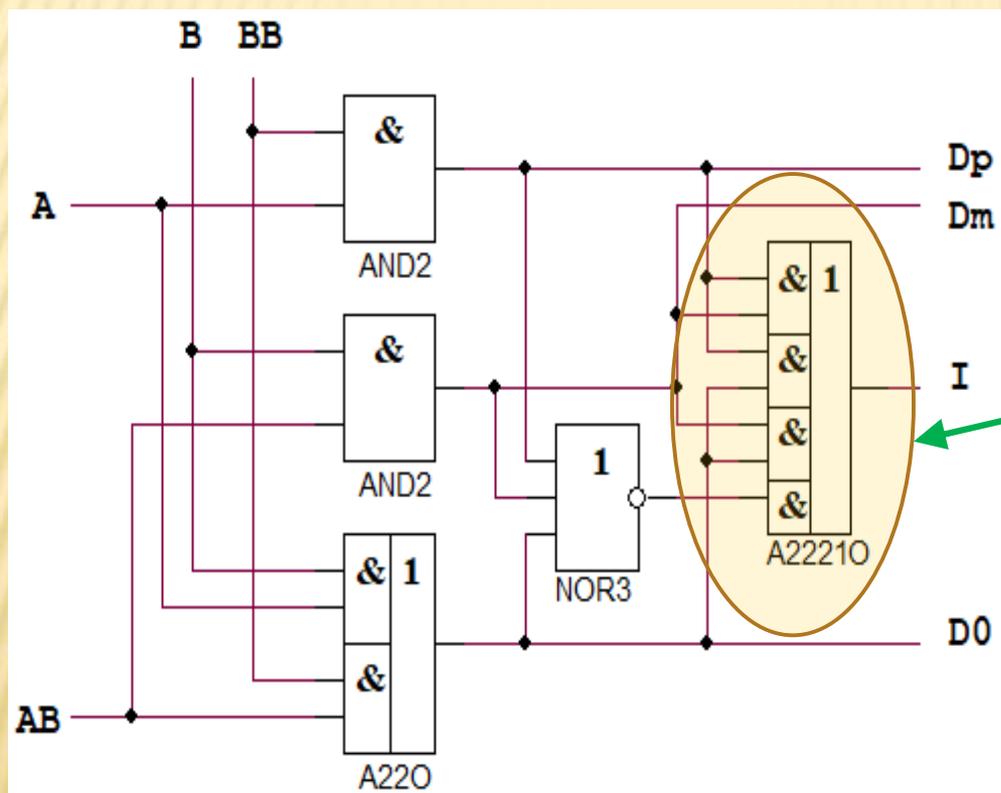
## Сбойные состояния



A	AB	B	BB	Dp	Dm	D0	I
1	1	0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	1	1	0
1	0	1	1	1	0	1	0
*	*	*	*	1	1	0	0
*	*	*	*	1	0	1	0
*	*	*	*	0	1	1	0

# ИНДИКАЦИЯ ВЫХОДА СУММЫ (3)

## Сбоеустойчивая индикация



Индицирует все  
сбойные состояния  
как спейсерные

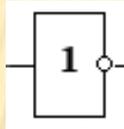
# **СБОЕУСТОЙЧИВОСТЬ ИСХОДНОГО ТРОИЧНОГО СУММАТОРА (1)**

## **Исходные предпосылки:**

- ❖ Поток ядерных частиц распределен равномерно по площади кристалла,**
- ❖ Энергии каждой частицы хватает для изменения состояния выхода логического элемента,**
- ❖ Площадь топологии логического элемента прямо пропорциональна числу транзисторов в нем,**
- ❖ Сбойное состояние входов сумматора в 50% случаев маскируется другими входами**

# СБОЕУСТОЙЧИВОСТЬ ИСХОДНОГО ТРОИЧНОГО СУММАТОРА (2)

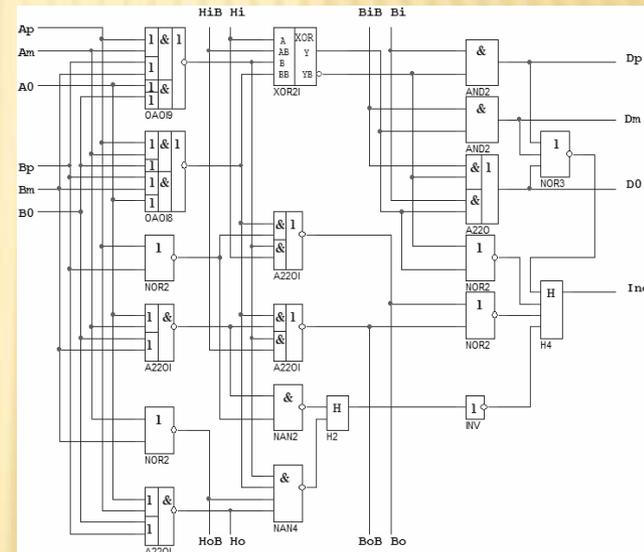
Вероятность сбоя инвертора



$$P_I$$

Исходя из соотношения числа транзисторов в инверторе и сумматоре:

Вероятность сбоя сумматора



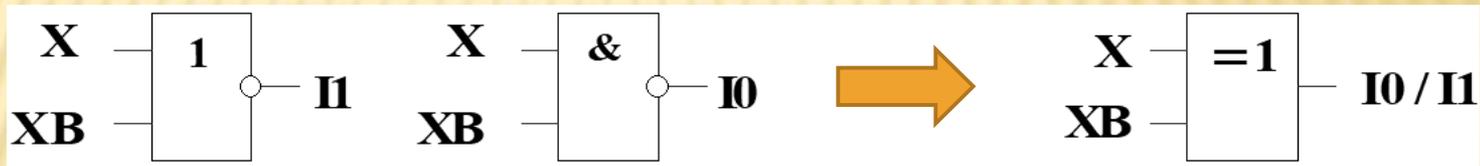
$$P_{S0} = 37 \cdot P_I$$

# ПОВЫШЕНИЕ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ ТРОИЧНОГО СУММАТОРА (1)

**Критичные логические сбои парафазных сигналов:**

❖ **Антиспейсерное состояние:** воспринимается обычной индикацией как рабочее состояние

□ **Лечение:** использование элементов XOR, NXOR в первом каскаде индикаторной подсхемы



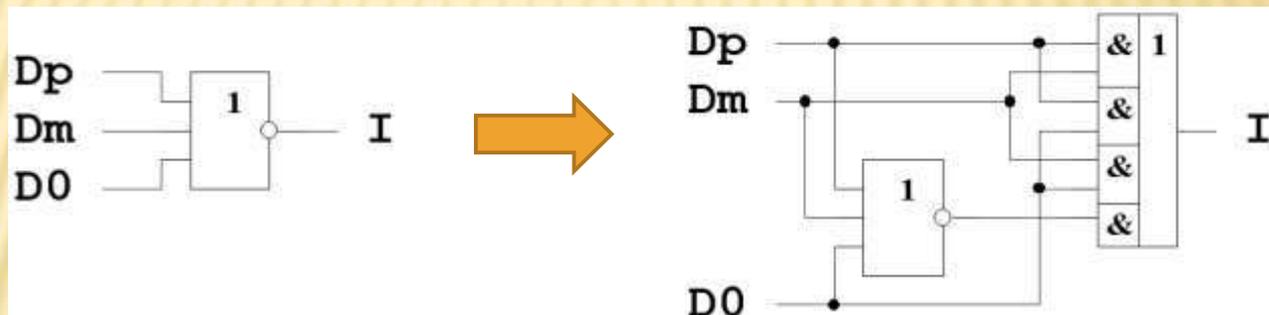
❖ **Некорректное рабочее состояние**

□ **Лечение:** избыточное сбоеустойчивое кодирование информационных сигналов

# ПОВЫШЕНИЕ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ ТРОИЧНОГО СУММАТОРА (2)

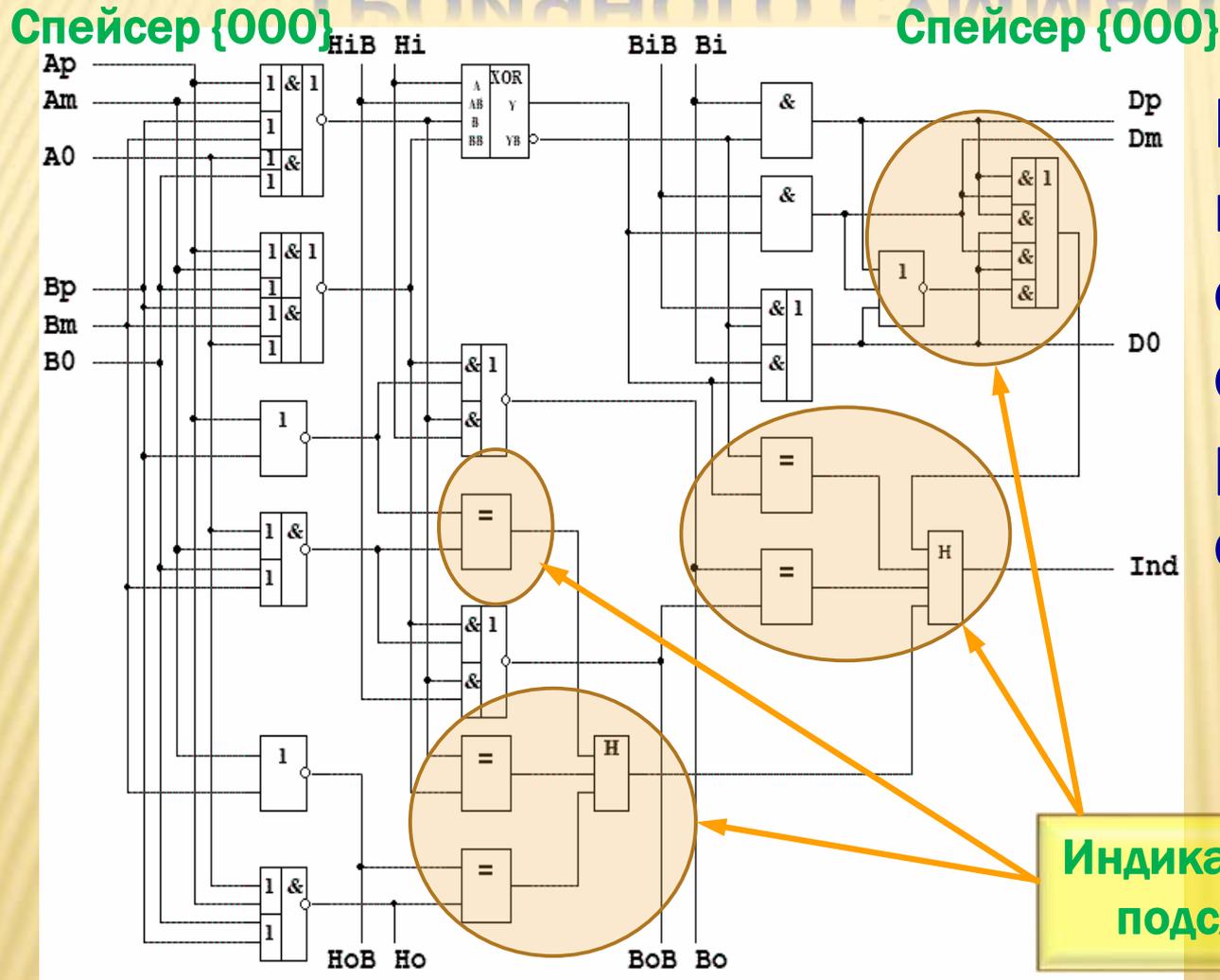
**Критичные логические сбои троичных сигналов:**

- ❖ **Состояние, отличное от спейсера и рабочих состояний:** воспринимается обычной индикацией как рабочее состояние
  - **Лечение:** индикация всех состояний, не совпадающих с легальными рабочими состояниями, как спейсера



- ❖ **Некорректное рабочее состояние**
  - **Лечение:** избыточное сбоеустойчивое кодирование информационных сигналов

# ПОВЫШЕНИЕ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ ТРОИЧНОГО СУММАТОРА (3)



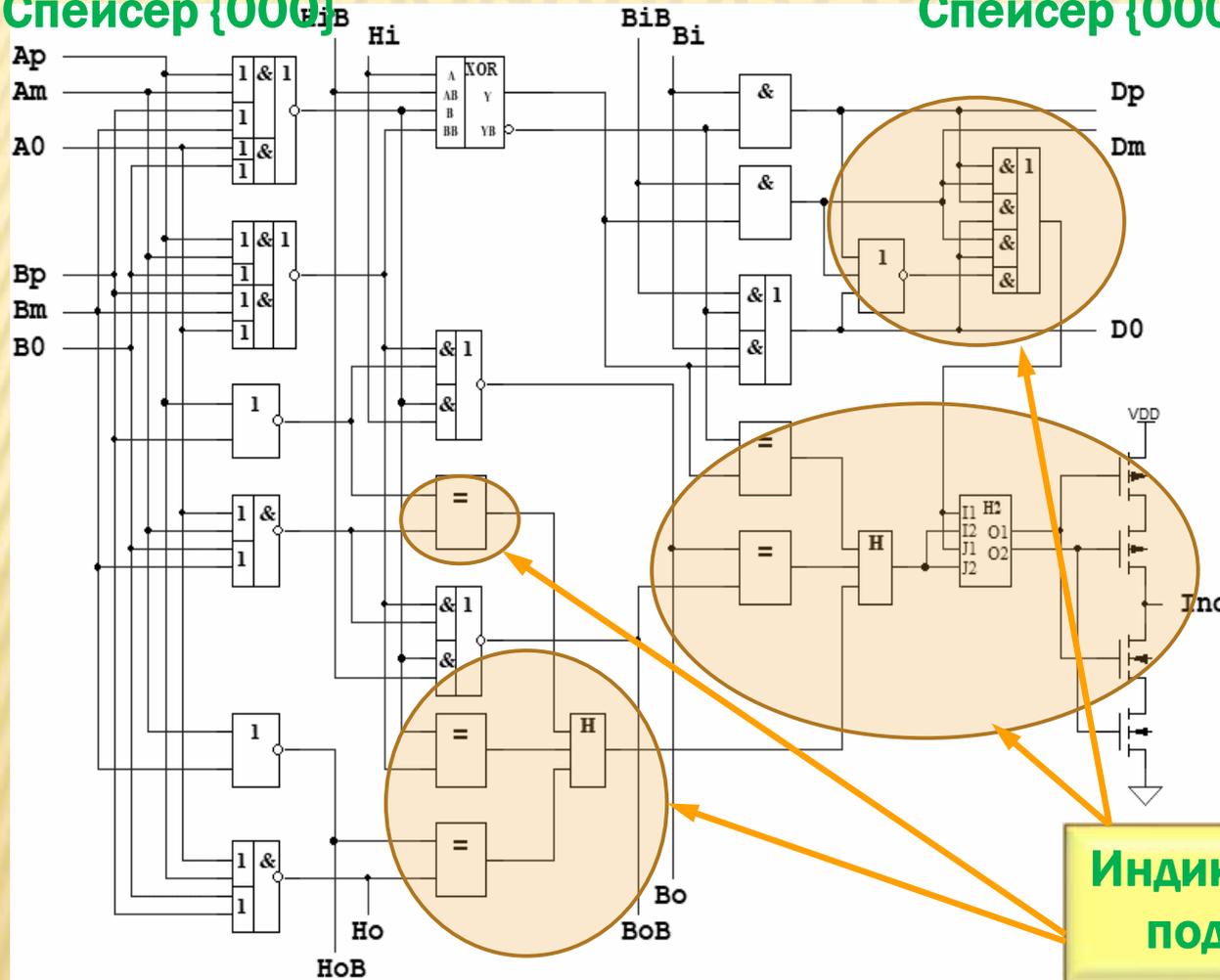
**Маскируются все сбойные состояния, не совпадающие с рабочими и спейсером**

**158 КМОП транзисторов**

# ПОВЫШЕНИЕ СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ ТРОИЧНОГО СУММАТОРА (4)

Спейсер {000}

Спейсер {000}



**Н-триггер DICE-  
типа:  
маскируются  
логические сбои  
в индикаторной  
подсхеме**

**182 КМОП  
транзистора**

**Индикаторная  
подхема**

# СБОЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТРОИЧНОГО СУММАТОРА (1)

Вероятность критического сбоя снижается в 2,55 раза:

$$P_S = 14,5 \cdot P_I = P_{S0} / 2,55$$

За счет увеличения *аппаратных затрат* на 47%:

**124 КМОП  
транзистора**



**182 КМОП  
транзисторов**

# СБОЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТРОИЧНОГО СУММАТОРА (2)

Вероятность сбоя в единицу времени (интенсивность сбоев)  $\lambda$  зависит от плотности потока событий, вызывающих сбои ( $\lambda_C$ ), и вероятности критического сбоя при воздействии одного события ( $P$ ):

$$\lambda = \lambda_C \cdot P$$

Отношение *времен бессбойной работы* сбоеустойчивого и исходного вариантов троичного сумматора обратно пропорционально интенсивности сбоев:

$$K_{TA} = \frac{\lambda_0}{\lambda_{ST}} = \frac{\lambda_C \cdot P_{S0}}{\lambda_C \cdot P_S} = 2,55$$

# СБОЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТРОИЧНОГО УМНОЖИТЕЛЯ

- ❑ Однородная структура дерева Уолеса на троичных сумматорах
- ❑ Одиночные логические сбои – несовместные события



❖ Вероятность логического сбоя в умножителе:

$$P_M = \sum P_{TA}$$

❖ Отношение времен бессбойной работы

$$K_M = \frac{P_{M0}}{P_M} = 2,55$$

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ▣ **Повышение сбоеустойчивости троичного сумматора и умножителя на его основе базируется на:**
  - **обнаружении состояний СС-сигналов, отличных от допустимых рабочих и спейсерных состояний, и индикации их как спейсера,**
  - **использовании DICE-подобного Н-элемента на выходе индикаторной подсхемы**
- ▣ **За счет увеличения на 47% сложности реализации одноразрядного троичного СС-сумматора устойчивость его и умножителя  $54 \times 54$  на его основе к одиночным логическим сбоям и время бессбойной работы увеличивается в 2,55 раза**

**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ !**



# КОНТАКТЫ

- ▣ Адрес: Институт проблем информатики Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ИПИ РАН), Россия, 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корпус 2
- ▣ Директор: академик Соколов И.А.
- ▣ Телефон: +7 (499) 137 34 94
- ▣ E-mail: [ISokolov@ipiran.ru](mailto:ISokolov@ipiran.ru)
- ▣ Степченков Ю.А., +7(495)761-15-20, [Ystepchenkov@ipiran.ru](mailto:Ystepchenkov@ipiran.ru)

## Поддержка

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 075-15-2020-799