

# Сравнительное моделирование сбоеустойчивости суб-100-нм двухфазных КМОП инверторов с разными проектными нормами к воздействию локальных импульсов тока

Ю.В. Катунин<sup>1</sup>, В.Я. Стенин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, stenin@kaf3.mephi.ru

<sup>2</sup>НИИ системных исследований РАН, Москва

**Аннотация** — Определены характеристики чувствительности двухфазных КМОП инверторов с проектными нормами 90 нм, 65 нм и 45 нм. Воздействие отдельной ядерной частицы моделировалось импульсом тока с постоянными времени нарастания 10 пс и спада 30 пс. Установлены допустимые значения емкостей связи выходов (входов) дифференциальных частей двухфазных КМОП логических элементов в зависимости от проектной нормы. Критические заряды для двухфазных инверторов более, чем в 10 раз превышают значения для инверторов с традиционной КМОП схематехникой при той же проектной норме.

**Ключевые слова** — двухфазный КМОП инвертор; локальный импульс тока; критический заряд; проектная норма.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Локальные воздействия ядерных частиц приводят к одиночным сбоям в КМОП СБИС. По мере снижения проектных норм к одиночным сбоям последовательных КМОП схем (single event upset – SEU) добавляются в большей мере и одиночные временные переключения элементов комбинационной логики (single event transient – SET) [1]. Одним из направлений повышения сбоеустойчивости цифровых КМОП СБИС является использование двухфазных КМОП логических элементов [2], [3]. Для снижения чувствительности к воздействиям отдельных ядерных частиц симметричные элементы двухфазных КМОП структур необходимо пространственно разнести, чтобы локальному воздействию ядерной частицы подвергалась только одна из дифференциальных частей двухфазного элемента. Это сопровождается удлинением межсоединений, увеличением их емкостных связей, и, соответственно, емкостных связей как дифференциальных выходов, так и входов элементов, что ведет к снижению их сбоеустойчивости [4].

## II. ДВУХФАЗНЫЙ КМОП ИНВЕРТОР

На рис. 1 приведена схема цепочки из трех двухфазных КМОП инверторов, каждый из которых состоит из двух конверторов. На рис. 1 использовано обозначение двухфазного инвертора как 2ф-инвертор. Первый инвертор включает конвертеры К1.1 и К1.2,

второй – конвертеры К2.1 и К2.2, третий – К3.1 и К3.2. Емкостные связи шин, соединяющих выходы и входы конверторов, отражены на рис. 1 емкостями дифференциальных связей входов  $C_{\text{вх,диф}}$  и выходов  $C_{\text{вых,диф}}$ . При равных синфазных сигналах на входах 1 и 2 двухфазный инвертор ведет себя как обычный КМОП инвертор, но с удвоенными по ширине транзисторами. При возникновении из-за действия помехи дифференциальной составляющей между входами двухфазный инвертор сохраняет исходное логическое состояние, пока синфазная составляющая на его выходах не перейдет пороговое значение [2]. Такие переключения являются временными с последующим восстановлением исходного логического состояния и определяются как “мягкие ошибки” (soft errors) [1].

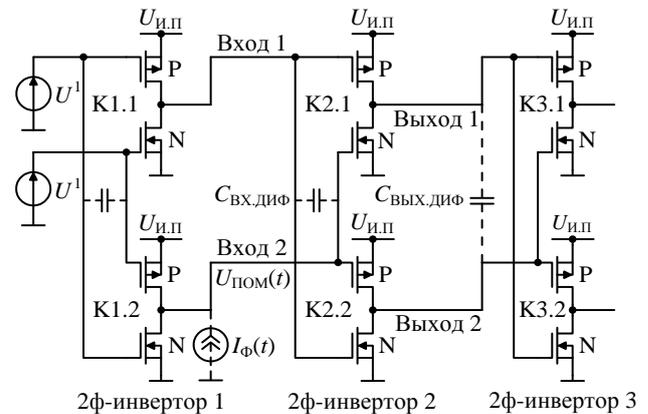


Рис. 1. Цепочка из трех двухфазных КМОП инверторов

Анализ процесса такого индуцированного переключения следует проводить, учитывая изменение состояний трех двухфазных инверторов в цепочке. Схема на рис. 1 приведена с источником фототока  $I_{\phi}(t)$ , имитирующим воздействие отдельной частицы на конвертор К1.2 первого двухфазного инвертора. В результате такого воздействия через выходной узел конвертора К1.2 протекает импульс фототока  $I_{\text{вых,к}}(t) = I_{\phi}(t)$ , сопровождающийся импульсом напряжения помехи  $U_{\text{пом}}(t)$  на этом выходе. Логический дифференциальный сигнал на входе схемы на рис. 1 соответствует “1”, при этом исходное логическое со-

стояние первого 2ф-инвертора будет “0”, а второго – “1”. При входном “0” состояния будут “1” и “0”.

Под действием импульса помехи  $U_{\text{ПОМ}}(t)$  происходит временное изменение состояния транзисторов двухфазных элементов, приводящее к образованию импульсов напряжения на выходах второго инвертора Выход 1 и Выход 2, которые действуют в свою очередь на входы третьего двухфазного инвертора. Изменение логического состояния второго инвертора определяется по достижении напряжением на выходе одного из конверторов К3.1 или К3.2 третьего инвертора порогового значения  $0.5U_{\text{И.П}} = 0.5 \text{ В}$ , и значение амплитуды импульса фототока, приводящее к этому, является критическим –  $I_{\text{Ф.М.КР}}$ . Значение заряда, переносимого импульсом с такой амплитудой, определяется как критическое значение заряда, вызывающего сбой состояния элемента,  $Q_{\text{КР}}$ . Если импульс фототока  $I_{\text{Ф}}(t)$  действует на один из выходов инвертора в состоянии “0” и под действием импульса напряжения помехи  $U_{\text{ПОМ}}(t)$  переключается следующий инвертор из состояния “1”, то этот сбой фиксируется как сбой состояния “1” двухфазного инвертора. Воздействие отдельной ядерной частицы при моделировании имитировалось импульсом фототока  $I_{\text{Ф}}(t)$  двухэкспоненциальной формы [5] с постоянными времени нарастания  $\tau_{\text{Н}} = 10 \text{ пс}$  и спада  $\tau_{\text{СП}} = 30 \text{ пс}$ . Моделирование проводилось в симуляторе Spectre CADENCE для структур по объёмной КМОП технологии,  $U_{\text{И.П}} = 1.0 \text{ В}$ ,  $T = +25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### III. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИМПУЛЬСА ТОКА В ИМПУЛЬС НАПРЯЖЕНИЯ ПОМЕХИ

В табл. 1 приведены параметры МОП транзисторов с типовыми размерами каналов. Отношение ширины каналов P и NМОП транзисторов выбрано  $W_{\text{P}}/W_{\text{N}} = 1.2$ .

Таблица 1

Параметры МОП транзисторов с разными проектными нормами

Проектная норма, нм	45	65	90
Модели транзисторов	gpdk 45	tsmc N65	gpdk 90
$L$ , нм	45	60	100
$W_{\text{N}}$ , нм	120	150	200
$W_{\text{P}}$ , нм	145	180	240
$W_{\text{N}}/L$	2.67	2.5	2.0
$W_{\text{P}}/W_{\text{N}}$	1.21	1.2	1.2
$I_{\text{С.НМОП}}$ , мкА $U_{\text{ЗИ}} = 1.0 \text{ В}$ , $U_{\text{СИ}} = 0.5 \text{ В}$	55	91	111

На рис. 2 и рис. 3 приведены семейства статических выходных нагрузочных вольтамперных характеристик конверторов  $U_{\text{ВЫХ.К}}(I_{\text{ВЫХ.К}})$  в исходном состоянии логического “0” и “1” на основе МОП транзисторов с типовыми размерами для проектных норм 90 нм, 65 нм и 45 нм. Вместе с ними на рис. 2 и рис. 3 приведены и семейства зависимостей амплитуд импульсов напряжения помехи  $U_{\text{ПОМ.М}}(I_{\text{Ф.М}})$  как функции значений амплитуд импульсов фототока  $I_{\text{Ф.М}}$  для  $C_{\text{ВХДИФ}} = 0$ . Зависимости  $U_{\text{ПОМ.М}}(I_{\text{Ф.М}})$  связывают динамические параметры импульсов фототока  $I_{\text{Ф.М}}$  и напряжения по-

мехи  $U_{\text{ПОМ.М}}$ . При малых емкостных нагрузках конвертора зависимость  $U_{\text{ПОМ.М}}(I_{\text{Ф.М}})$  с погрешностью по току не более 20% практически повторяет статическую выходную нагрузочную характеристику конвертора.

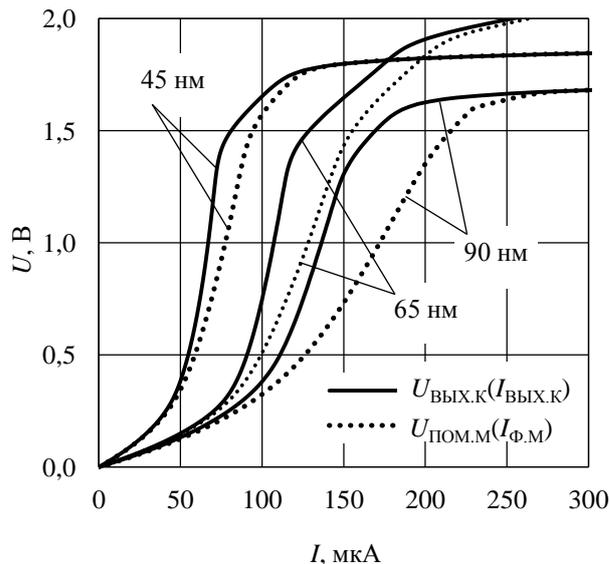


Рис. 2. Семейства нагрузочных характеристик  $U_{\text{ВЫХ.К}}(I_{\text{ВЫХ.К}})$  и характеристик связи амплитуды импульса фототока с амплитудой возникающего импульса напряжения помехи  $U_{\text{ПОМ.М}}(I_{\text{Ф.М}})$  для моделей КМОП конверторов по проектным нормам 90 нм, 65 нм и 45 нм для исходных состояний конверторов - логический “0”

Статические выходные нагрузочные характеристики КМОП конверторов  $U_{\text{ВЫХ.К}}(I_{\text{ВЫХ.К}})$  можно использовать для оценки связи значений амплитуд воздействующих импульсов фототока  $I_{\text{Ф.М}}$  и амплитуд сопровождающих их импульсов помехи  $U_{\text{ПОМ.М}}$ .

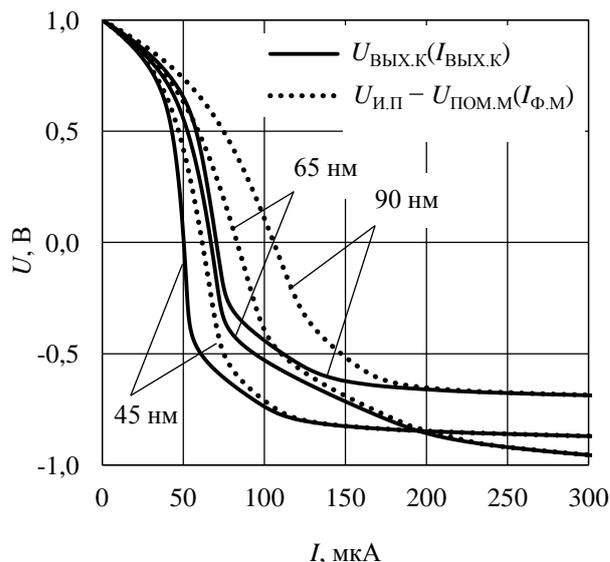


Рис. 3. Семейства нагрузочных характеристик  $U_{\text{ВЫХ.К}}(I_{\text{ВЫХ.К}})$  и характеристик связи амплитуды импульса фототока с амплитудой возникающего импульса напряжения помехи  $U_{\text{ПОМ.М}}(I_{\text{Ф.М}})$  для моделей КМОП конверторов по проектным нормам 90 нм, 65 нм и 45 нм для исходных состояний конверторов - логическая “1”

IV. ОЦЕНКА СБОЕУСТОЙЧИВОСТИ ИНВЕРТОРОВ ПО КРИТИЧЕСКИМ ЗНАЧЕНИЯМ АМПЛИТУД ИМПУЛЬСОВ ТОКА

В этом разделе дано сравнение характеристик сбоеустойчивости двухфазных КМОП инверторов с проектными нормами 90 нм, 65 нм и 45 нм.

А. Двухфазные КМОП инверторы с типовыми размерами транзисторов

На рис. 4 приведены графики критических значений амплитуд импульсов тока  $I_{Ф.М.КР}$  двухфазных инверторов с типовыми размерами транзисторов (см. табл. 1), как функции значений емкости  $C_{ВЫХ.ДИФ}$  при  $C_{ВХ.ДИФ} = C_{ВЫХ.ДИФ}$ . Область “перегиба” графиков можно характеризовать пороговыми значениями  $C_{ВЫХ.ДИФ.ПОР}$  и  $I_{Ф.М.КР.ПОР}$ .

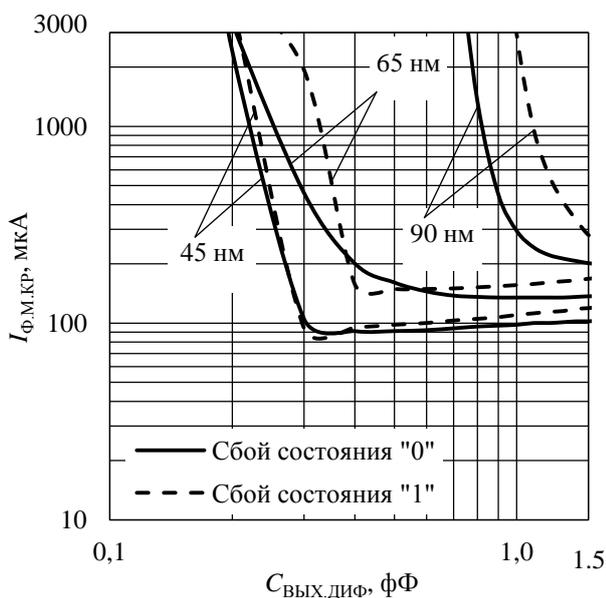


Рис 4. Критические значения амплитуд импульсов тока  $I_{Ф.М.КР}$  двухфазных инверторов с типовыми размерами ширины транзисторов в зависимости от  $C_{ВЫХ.ДИФ}$

В. Двухфазные КМОП инверторы с масштабными увеличенными размерами транзисторов

Увеличение ширины каналов НМОП и РМОП транзисторов сопровождается практически пропорциональным увеличением тока, крутизны и емкостей транзисторов, так что при сохранении быстродействия улучшается сбоеустойчивость, то есть  $I_{Ф.М.КР}$  и  $Q_{КР}$ . В табл. 2 приведены параметры МОП транзисторов с масштабными увеличенными размерами каналов транзисторов. Коэффициенты масштабирования ширины канала  $m_w$  взяты так, чтобы обеспечить одинаковую ширину канала НМОП транзисторов  $W_N = 600$  нм в инверторах с разными проектными нормами.

На рис. 5 приведены зависимости критических значений амплитуд импульсов тока  $I_{Ф.М.КР}$  для двухфазных инверторов с масштабными увеличенными размерами ширины транзисторов.

Параметры транзисторов с увеличенной шириной канала

Проектная норма, нм	45	65	90
Модели транзисторов	gpdk 45	tsmc N65	gpdk 90
$U_{И.П.}$ , В	1.0	1.0	1.0
$L$ , нм	45	60	100
$W_N$ , нм	600	600	600
$W_P$ , нм	725	720	720
$W_N/L$	13.33	10.0	6.0
$W_P/W_N$	1.21	1.2	1.2
$m_w$	5	4	3
$I_{С.НМОП}$ , мкА			
$U_{ЗИ} = 1.0$ В, $U_{СИ} = 0.5$ В	247	334	334

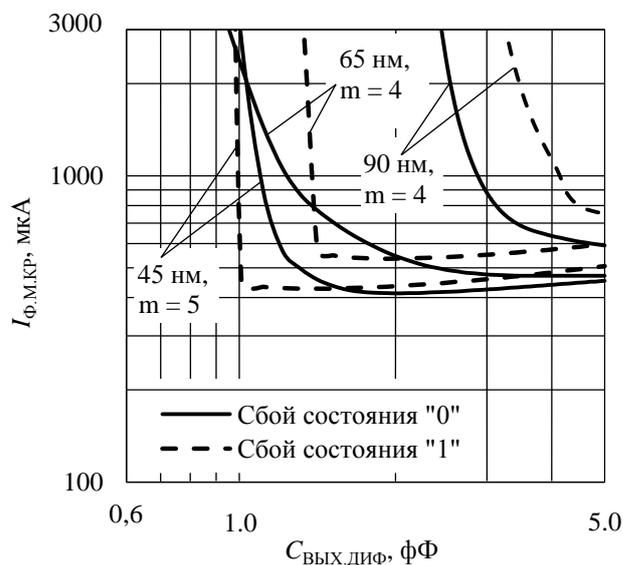


Рис. 5. Критические значения амплитуд импульсов тока  $I_{Ф.М.КР}$  двухфазных инверторов с увеличенными размерами ширины транзисторов в зависимости от  $C_{ВЫХ.ДИФ}$

Существенное увеличение для двухфазных инверторов критических значений амплитуд импульсов тока  $I_{Ф.М.КР}$  при значениях “шунтирующих” емкостей меньше пороговых  $C_{ВЫХ.ДИФ} < C_{ВЫХ.ДИФ.ПОР}$  (при  $C_{ВХ.ДИФ} = C_{ВЫХ.ДИФ}$ ) объясняется следующим образом. “Верхний” ряд конверторов на рис. 1 образует одну (условно первую) фазу цепочки двухфазных инверторов, а “нижний” ряд конверторов – вторую фазу. Переключение, например, первого конвертора К2.1 второго двухфазного инвертора под действием помехи сопровождается сохранением у его второго конвертора К2.2 электрического состояния, близкого к исходному, которое, управляя следующим в цепочке двухфазным инвертором, существенно ослабляет действие на него помехи по сравнению с однофазным аналогом. При этом конвертор К2.2 оказывается в состоянии, когда оба его транзистора закрыты. Соответственно конвертор второй фазы выступает как блокирующий элемент, поскольку наличие у него емкостной нагрузки и довольно длительный перезаряд ее подпороговыми

ми токами МОП транзисторов способствует сохранению его исходного состояния. Для двухфазного инвертора по проектной норме 65 нм скорость перезарядки составляет  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}/\Delta t \approx 10^{-3}$  В/нс.

#### V. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Снижение проектных норм длины канала МОП транзисторов с 90 нм до 65 нм сопровождается уменьшением тока стока НМОП транзистора с типовыми размерами в 1.33 раза, а при снижении до 45 нм еще в 1.66 раза. Пропорционально снижаются значения  $I_{\text{Ф.М.КР}}$  и  $Q_{\text{КР}}$  для КМОП однофазных инверторов с традиционной схемотехникой. Использование же двухфазных КМОП инверторов позволяет существенно повысить сбоеустойчивость.

1) Графики на рис. 4 и рис. 5, характеризующие сбоеустойчивость двухфазных КМОП инверторов, имеют “области перегиба”, которые можно характеризовать пороговыми значениями емкостей  $C_{\text{ВЫХ.ДИФ.ПОР}}$  и амплитуд импульсов тока  $I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}}$ .

2) Пороговые значения емкостей  $C_{\text{ВЫХ.ДИФ.ПОР}}$  (фФ) и амплитуд импульсов  $I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}}$  (мА), значения размеров транзисторов  $W_N$ (нм),  $W_P$ (нм) и проектные нормы, соответствующие им, приведены в табл. 3. Для описания связи пороговых значений этих параметров двухфазных инверторов (для случая  $C_{\text{ВХ.ДИФ}} = C_{\text{ВЫХ.ДИФ}}$ ) можно использовать следующую приближенную формулу:

$$I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}}(\text{мА}) \approx (0.35 \dots 0.45) C_{\text{ВЫХ.ДИФ.ПОР}}(\text{фФ}).$$

Таблица 3

Связь пороговых параметров сбоя КМОП двухфазных инверторов

Проектная норма, нм	45	65	90	45	65	90
$W_N$ , нм	120	150	200	600	600	600
$W_P$ , нм	145	180	240	725	720	720
$C_{\text{ВЫХ.ДИФ.ПОР}}$ , фФ	0.30	0.40	0.92	1.0	1.40	2.80
$I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}}$ , мА	0.11	0.16	0.40	0.45	0.57	1.07
$I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}}$ (мА) / $C_{\text{ВЫХ.ДИФ.ПОР}}$ (фФ)	0.36	0.40	0.43	0.45	0.41	0.38
$Q_{\text{КР2Ф}}$ , фКл	70	90	210	230	310	570
$Q_{\text{КР1Ф}}$ , фКл	3.1	5.2	6.5	13.5	18.2	19.8

Примечание: значения критических зарядов  $Q_{\text{КР1Ф}}$  соответствуют традиционным однофазным КМОП инверторам, а  $Q_{\text{КР2Ф}}$  – двухфазным КМОП инверторам

Для двухэкспоненциального импульса [5] с соотношением постоянных времени  $\tau_n / \tau_{\text{СП}} = 1/3$  критический заряд связан с амплитудой импульса тока выражением  $Q_{\text{КР}}(\text{фКл}) = 0.052 I_{\text{Ф.М.КР}}(\text{мкА})$ . Для однофазного инвертора  $Q_{\text{КР1Ф}}(\text{фКл}) = 0.052 I_{\text{Ф.М}}(U_{\text{ПОМ.М}} = 0.5 \text{ В})$ , где амплитуда импульса тока  $I_{\text{Ф.М}}$  в мкА определяется по характеристике  $U_{\text{ПОМ.М}}(I_{\text{Ф.М}})$  при  $U_{\text{ПОМ.М}} = 0.5 \text{ В}$ .

3) Пороговые значения амплитуд локально воздействующих импульсов тока  $I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}}$  разделяют два

диапазона, соответствующих КМОП традиционным (однофазным) инверторам и двухфазным инверторам. Диапазон амплитуд  $I_{\text{Ф.М.КР}} < I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}}$  характеризует традиционные КМОП инверторы и элементы на их основе с размерами транзисторов, соответствующими этому значению  $I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}}$  (см., например, табл. 3). Значения амплитуд импульсов этого диапазона характеризуют и двухфазные КМОП инверторы в случае больших емкостей  $C_{\text{ВЫХ.ДИФ}} > C_{\text{ВЫХ.ДИФ.ПОР}}(I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}})$ . Значениям амплитуд диапазона  $I_{\text{Ф.М.КР}} > I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}}$  соответствует область повышенной сбоеустойчивости двухфазных КМОП инверторов при условии соблюдения ограничения на значения емкостей, шунтирующих выходы и входы двухфазного инвертора:  $C_{\text{ВЫХ.ДИФ}} < C_{\text{ВЫХ.ДИФ.ПОР}}(I_{\text{Ф.М.КР.ПОР}})$ . При этом двухфазный инвертор блокирует распространение помехи по цепочке инверторов, ограничивая ее воздействие только одним двухфазным инвертором.

Допустимые по расчетам значения  $I_{\text{Ф.М.КР}}$  для этой области параметров двухфазных инверторов в 10...20 раз превышают значения для традиционных КМОП инверторов на транзисторах с теми же параметрами.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены характеристики чувствительности двухфазных КМОП инверторов с проектными нормами 90 нм, 65 нм и 45 нм. Воздействие отдельной ядерной частицы моделировалось импульсом тока с постоянными времени нарастания 10 пс и спада 30 пс. Установлены допустимые значения емкостей связи выходов (входов) дифференциальных частей двухфазных КМОП логических элементов в зависимости от проектной нормы. Критические заряды для двухфазных инверторов более, чем в 10 раз превышают значения для инверторов с традиционной КМОП схемотехникой при той же проектной норме и тех же размерах транзисторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nicolaidis M. Soft errors in modern electronic systems. New York: Springer, 2011. – 316 p.
- [2] Ольчев С.И., Стенин В.Я. Двухфазные КМОП логические элементы с повышенной сбоеустойчивостью к воздействию отдельных ядерных частиц // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 3. С. 156 – 169.
- [3] Катунин Ю.В., Стенин В.Я. Моделирование 65 нм КМОП триггерных ячеек с повышенной сбоеустойчивостью к воздействию отдельных ядерных частиц // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн. трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С. 24 – 33.
- [4] Стенин В.Я., Ольчев С.И. Моделирование характеристик субмикронных двухфазных КМОП логических элементов при воздействии отдельных ядерных частиц // Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2. № 6. С.510 – 515.
- [5] Стенин В.Я. Моделирование воздействия отдельных ядерных частиц на КМОП цифровые схемы по параметрам импульсов воздействующего тока // Известия вузов. Электроника. 2011. № 3(89). С.50 – 57.