

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЦИФРОВЫХ МИКРОСХЕМ ПУТЁМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

С. Ф. Тюрин, А. С. Прохоров

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Поступила в редакцию 28.08.2017 г.

**Аннотация.** Рассматриваются основные методы обеспечения пассивной отказоустойчивости цифровых микросхем для высоконадёжных, радиационно-стойких приложений. Анализируются троирование (мажоритирование), глубокое мажоритирование, мажоритирование отдельных элементов. Рассматриваются учетверенные транзисторные структуры. Предлагаемые элементы обладают способностью сохранения исходной функции при отказах одного из четырех транзисторов в каждой транзисторной структуре. Производится сравнение по вероятности безотказной работы с троированными структурами.

**Ключевые слова:** логический элемент, интегральные микросхемы, транзистор, избыточность, вероятность безотказной работы, троирование (мажоритирование), расчетверение.

**Annotation.** We study the basic methods of providing passive fail-safe digital chips for high-reliability, radiation-resistant applications. Analyzes the triple redundancy, deep triple redundancy, gates triple redundancy. We consider the quadruple transistor structures. Proposed elements have the ability to maintain the original function in case of failure of one of the four transistors in each transistor structure. We analyze the complexity of the proposed elements with the elements, retorts failure of one transistor in each transistor structure. A comparison on the probability of failure-free operation with the triple redundancy.

**Keywords:** Integrated Circuits, Fault-tolerant, Radiation Resistance, Transistor, Redundancy, Reliabilities, Triple Redundancy, Quadrupling, TMR (Triple Modular Redundancy), Radiation Hardened By Design.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время чрезвычайно актуально научное и технологическое направление создания высоконадёжных, отказоустойчивых, радиационно-стойких микросхем для космических, специальных и военных применений. Радиационная стойкость – это свойство аппаратуры, комплектующих элементов и материалов выполнять свои функции и сохранять параметры в пределах установленных норм во время или после ионизирующего излучения [1]. Известный пример негативного воздействия тяжёлых заряженных частиц (ТЗЧ) на микросхемы цифровой аппаратуры систем управления – потеря космического аппарата «Фобос-Грунт» [2]. Накопление дозы радиации в микросхемах приводит к росту задержек внутри микросхемы или изменение

логических уровней, в результате попадания одной частицы происходят так называемые одиночные события SEE (Single Event Effect) [3, 4]. Основные англоязычные термины по радиационной стойкости представлены на рис. 1.

Одним из самых опасных подвидов SEE является защелкивание транзисторов (Single Event Latchup, SEL) в пропускающем состоянии (тиристорный эффект). При этом возможны разрушения транзисторов и «разрыв» вентиля – SEGR (Single Event Gate Rupture). При воздействии ТЗЧ могут происходить кратковременные изменения выхода логического элемента – SET (Single Event Transient), элементов памяти – SEU (Single Event Upset), изменяющие состояние логических элементов [3, 4]. Лидером создания радиационно-стойких микросхем за рубежом является компания Atmel [3, 4]. Для создания радиационно-стойких микросхем применяют долго-

№	Термин	Расшифровка англ.	Расшифровка рус.	Определение
1.	SEL	Single Event Latch	Тиристорный эффект, вызванный ионизацией	Переход микросхемы в состояние с высоким потреблением тока. Требуется обязательное снятие питания для восстановления.
2.	SEGR	Single Event Gate Rupture	«Разрыв» вентиля, вызванный ионизацией	Неисправность затвора или подзатворной области в результате перехода транзистора в состояние высокого потребления тока, обусловленного тиристорным эффектом.
3.	SET	Single Event Transient	Однократный восстанавливаемый отказ	Кратковременное изменение состояния логического выхода.
4.	SEU	Single Event Upset	Однократный восстанавливаемый сбой памяти	Обратимое изменение состояния регистра памяти, ОЗУ или триггера.
5.	SHE	Single Event Hard Error	Необратимое изменение состояния регистра	Необратимое изменение состояния регистра памяти, ОЗУ или триггера.
6.	SEFI	Single Event Functional Interrupt	Функциональный отказ в результате SEU	Отказ в работе прибора. Как правило, для устранения этого отказа требуется либо снятие и восстановление питания, либо перезагрузка системы.
7.	RH	Radiation Hard	Устойчивый к радиации	Устройство, гарантированно сохраняющее работоспособность при дозе поглощенного излучения вплоть до заданной (обычно более 300 крад).
8.	RT	Radiation Tolerant	Выдерживающий (толерантный) радиацию	Устройство, гарантированно сохраняющее работоспособность при дозе поглощенного излучения вплоть до заданной (обычно более 300 крад).
9.	RHBD	Radiation Hardened By Design	Устойчивый к радиации за счет дизайна	Устройство, в котором для увеличения радиационной стойкости применяются специальные схемные/технологические решения, например, троирование триггеров со схемой восстановления после ошибок, применение RC-фильтров для устойчивости к импульсам тока, постоянный опрос конфигурации с восстановлением ее и т.д.

Рис. 1. Основные термины радиационной стойкости

стоящие технологии, например, «кремний на диэлектрике» (англ. Silicon-on-insulator, SOI), исключаящие тиристорные эффекты. Хорошо зарекомендовала себя технология КНС – кремний на сапфире. Применяют отключение питания на период воздействия ТЗЧ, помехоустойчивые коды, используют сохранение нескольких состояний шины данных с некоторым интервалом и последующее голосование «по большинству голосов», например, «два из трёх», «три из пяти». Методы обеспечения радиационной отказоустойчивости – RHBD (Radiation Hardened By Design) включают парирование SEU ячеек статической оперативной памяти SRAM путем особого дублирования – DICE (Dual Inter\_locked Storage)

[3, 4]. Для парирования отказов используют тройное резервирование (Triple Modular Redundancy, TMR) [3, 4] или мажоритирование [7]. Проанализируем основные варианты резервирования с целью повышения радиационной стойкости и предложим пути его совершенствования.

#### МАЖОРИТИРОВАНИЕ 2 ИЗ 3-х

Согласно нового ГОСТ [8] термин «сбой» исключён, рассматривается событие – «отказ» (Failure) – потеря способности изделия выполнить требуемую функцию. Отказ приводит в состояние неисправности (Fault) и вызывает ошибку (Error).

Под надёжностью (dependability) понимается свойство готовности и влияющие на него свойства безотказности и ремонтпригодности, и поддержка технического обслуживания [8]. Под безотказностью (Reliability) понимается способность изделия выполнить требуемую функцию в заданном интервале времени при данных условиях [8].

Системы, обладающие свойством функционировать в условиях отказов, в состояниях неисправности называют отказоустойчивыми. Создание надёжных, отказоустойчивых систем является одной из ключевых задач науки и технологии.

Для этого применяют резервирование (Redundancy) – наличие в изделии больше одного средства, необходимого для выполнения требуемой функции [8–13], например, введение дополнительных каналов цифровой аппаратуры. Резервирование  $m$  из  $n$  ( $m$  out of  $n$  redundancy) – это резервирование, при котором  $m$  изделий из общего их количества  $n$  должны функционировать для выполнения требуемой функции, например, резервирование 2 из 3 [8].

Отказоустойчивые цифровые приборы и вычислительные комплексы впервые были разработаны для военной аппаратуры [7]. Резервирование  $m$  из  $n$  часто называют мажоритированием – голосованием по большинству голосов. Различают пассивную и активную отказоустойчивость [7]. При пассивной отказоустойчивости отказы маскируются системой, которая продолжает функционирование и при возникновении определённого количества отказов. Это требует значительной избыточности – мажоритирования 2 из 3 (парировается 1 отказ – в одном из 3 каналов, то есть отказ 1 канала), мажоритирования 3 из 5 (парировается отказ 2 каналов), мажоритирования 4 из 7 (парировается отказ 3 каналов) и т. д. Пассивная отказоустойчивость применяется там, где недопустимы даже кратковременные перемены в работе системы. Активная отказоустойчивость требует времени на обнаружение, локализацию отказов и так называемую реконфигурацию системы, зато выигрышна с точки зрения избыточности.

Для мажоритирования 2 из 3-х используется более чем трёхкратная избыточность – 3 канала одного цифрового устройства (рис. 2) и специальный мажоритарный элемент МЭ (рис. 3).

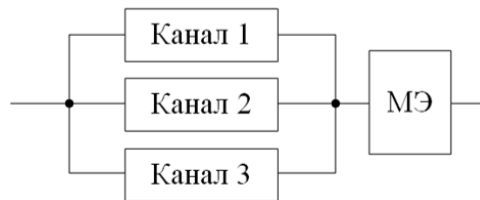


Рис. 2. Мажоритирование – резервирование 2 из 3 (2 out of 3 redundancy)

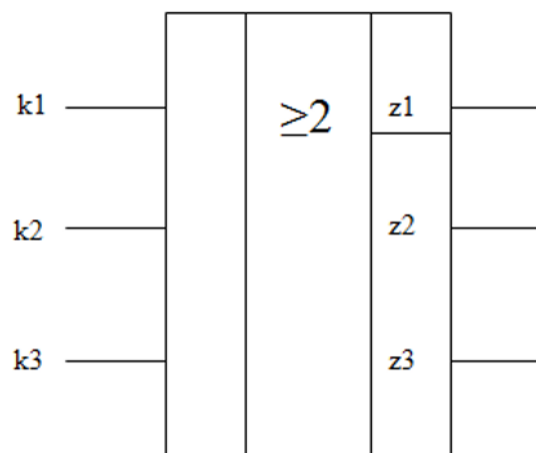


Рис. 3. Мажоритарный элемент МЭ с формированием номера отказа

Мажоритарный элемент с формированием номера отказавшего канала представлен на рис. 3 (интегральные микросхемы, например, 561 ЛП3, 561 ЛП13) и описывается таблицей истинности (рис. 4).

Кроме того, необходимы три источника питания. Без учёта мажоритарного элемента (вероятность безотказной работы его принимаем = 1) получаем вероятность безотказной работы мажоритарной системы ( $P_{м.с}$ ) с выбором 2 из 3:

$$P_{м.с} = p^3 + 3p^2(1-p) = 1 - (1-p)^3 - 3p(1-p)^2 = 3p^2 - 2p^3$$

Таким образом:

$$P_{м.с}^{2 \text{ из } 3}(t) = 3P^2 - 2P^3$$

Например, при  $P = 0,9$ :

$$P_{м.с}^{2 \text{ из } 3}(t) = 3(0,9)^2 - 2(0,9)^3 = 0,972$$

k3	k2	k1	BC	z1	z2	z3
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	1
0	1	0	2	0	1	0
0	1	1	3	1	1	1
1	0	0	4	0	1	1
1	0	1	5	1	1	0
1	1	0	6	1	0	1
1	1	1	7	1	0	0

Рис. 4. Таблица истинности мажоритарного элемента с формированием номера отказавшего канала

Для модели отказов Вейбулла, применяемой с целью оценки радиационной стойкости во времени:

$$P(t) = e^{-\lambda t^\alpha}; P_{\text{м.с}} = [3e^{-2\lambda t^\alpha} - 2e^{-3\lambda t^\alpha}],$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов одного канала,  $1 \leq \alpha \leq 2$  – коэффициент,  $t$  – время работы при воздействии радиации.

С учётом отказов мажоритарного элемента получаем вероятность безотказной работы:

$$P_{\text{м.с}} = [3e^{-2\lambda t^\alpha} - 2e^{-3\lambda t^\alpha}]e^{-\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha},$$

где  $\lambda_{\text{м.э}}$  – интенсивность отказов мажоритарного элемента. Для парирования радиационного отказа мажоритарных элементов – тоже три, и каждый выдаёт сигналы в следующий участок схемы (рис. 5).

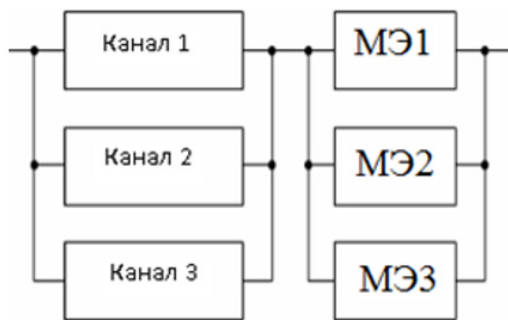


Рис. 5. Мажоритирование мажоритарных элементов

В итоге получаем вероятность безотказной работы в таком виде:

$$P_{\text{м.с}} = [3e^{-2\lambda t^\alpha} - 2e^{-3\lambda t^\alpha}][3e^{-2\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha} - 2e^{-3\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha}].$$

### МАЖОРИТИРОВАНИЕ 3 ИЗ 5-ТИ

При мажоритировании 3 из 5 парируются радиационные отказы в двух каналах, получим:

$$P_{\text{м.с}}^{3 \text{ из } 5}(t) = P^5 + 5P^4(1-P) + 10P^3(1-P)^2.$$

Например, при  $P = 0,9$ :

$$P_{\text{м.с}}^{3 \text{ из } 5}(t) = (0,9)^5 + 5(0,9)^4(0,1) + 10(0,9)^3(0,1)^2 = 0,99144.$$

Без учёта мажоритарных элементов для схемы 3 из 5:

$$P_{\text{м.с}}^{3 \text{ из } 5}(t) = e^{-5\lambda t^\alpha} + 5e^{-4\lambda t^\alpha}(1 - e^{-\lambda t^\alpha}) + 10e^{-3\lambda t^\alpha}(1 - e^{-\lambda t^\alpha})^2.$$

Соответственно, необходимо пять мажоритарных элементов «3 из 5»:

$$P_{\text{м.с}}^{3 \text{ из } 5}(t) = [e^{-5\lambda t^\alpha} + 5e^{-4\lambda t^\alpha}(1 - e^{-\lambda t^\alpha}) + 10e^{-3\lambda t^\alpha}(1 - e^{-\lambda t^\alpha})^2] \times [e^{-5\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha} + 5e^{-4\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha}(1 - e^{-\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha}) + 10e^{-3\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha}(1 - e^{-\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha})^2].$$

Сравнение одноканальной цифровой системы (красная) с мажоритированием P1 – 2 из 3 (синяя), P2 – 3 из 5 (зелёная) при  $\alpha = 1$  представлено на рис. 6.

Видим, что мажоритирование P2 – 3 из 5 существенно лучше, чем P1 – 2 из 3, но после некоторого значения времени нерезервированная система становится лучше резервированной.

### МАЖОРИТИРОВАНИЕ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РАБОТЫ НА ОДНОМ КАНАЛЕ

В этом случае система способна перестраиваться в дублированную и из неё в случае необходимости – в одноканальную. По существу, здесь используется и пассивная и активная.

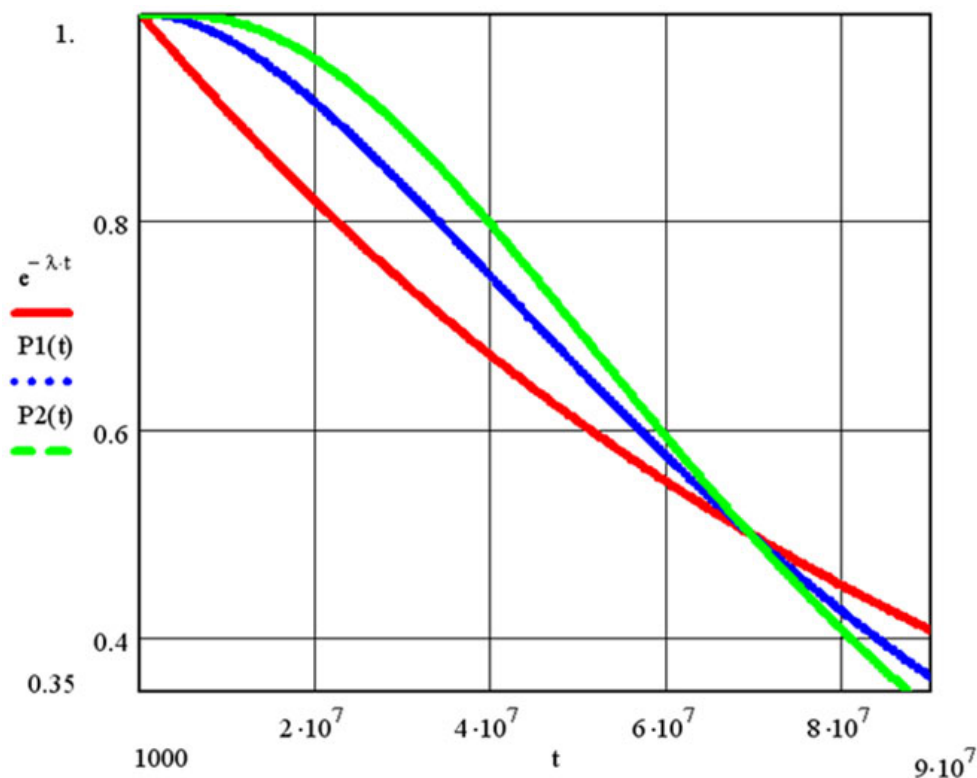


Рис. 6. Сравнение одноканальной цифровой системы  $e^{-\lambda t}$  с мажоритированием P1 – 2 из 3 (синяя), P2 – 3 из 5 (зелёная)  $\alpha = 1, \lambda = 10^{-8}$

тивная отказоустойчивость. Для этого нужна более сложная дополнительная аппаратура. Без учёта этой дополнительной аппаратуры и мажоритарных элементов, которые также троируются, получим вероятность безотказной работы:

$$P_{\text{м.с1}} = P^3 + 3P^2(1 - P) + 3P(1 - P)^2 = 1 - (1 - P)^3.$$

Например, при  $P = 0,9$ :

$$P_{\text{м.с1}} = 1 - (0,1)^3 = 0,999.$$

Видим, что такой результат существенно выше, чем мажоритирование 3 из 5-ти ( $P_{\text{м.с}}^3$ ), однако выражение  $P_{\text{м.с1}}$  не учитывает дополнительную аппаратуру тестирования в случае не сравнения двух оставшихся каналов. С учётом мажоритарных элементов и дополнительной аппаратуры реконфигурации (интенсивность отказов  $\lambda_d$ ) вероятность безотказной работы:

$$P_{\text{м.с}} = [1 - (1 - e^{-\lambda t^\alpha})^3] \times [3e^{-2(\lambda_{\text{м.э}} + \lambda_d)t^\alpha} - 2e^{-3(\lambda_{\text{м.э}} + \lambda_d)t^\alpha}].$$

Но данное выражение не учитывает вероятность «промаха» в случае, если оператив-

ное тестирование не приводит к обнаружению отказавшего канала.

### ГЛУБОКОЕ МАЖОРИТИРОВАНИЕ

Мажоритируются отдельные подблоки блоков ПЛИС, например, АЛУ процессора, устройство управления и т. д. Разработчики приводят такой пример: ни один канал в «разваленном» состоянии не работает, а в мажоритарном – система работоспособна. То есть допускается большее число радиационных отказов – по одному в каждом «слое».

Для троированных мажоритаров получим:

$$P_{\text{г.м}} = \prod_{j=1}^k [3e^{-2\lambda_k t^\alpha} - 2e^{-3\lambda_k t^\alpha}] [3e^{-2\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha} - 2e^{-3\lambda_{\text{м.э}} t^\alpha}]^k,$$

где  $P_{\text{г.м}}$  – вероятность безотказной работы глубоко мажоритированной структуры из  $k$  троированных слоёв,  $\lambda_k$  – интенсивность отказов  $k$ -го троированного слоя,  $\lambda_{\text{м.э}}$  – интенсивность отказов мажоритарного элемента,  $t$  – время работы.

Необходимо сравнить  $P_{\text{г.м}}$  с троированием всей структуры без разбивки на слои с одним троированным мажоритаром:

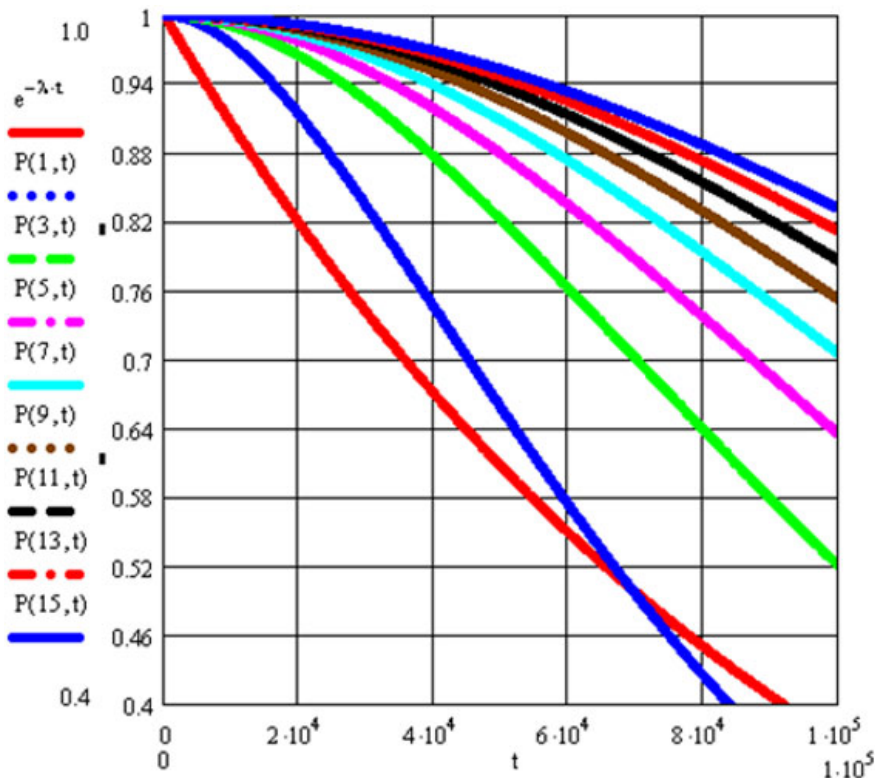


Рис. 7. Графики изменения вероятности безотказной работы системы без мажоритирования (красная), с мажоритированием ( $P(1,t)$  –синяя) и с глубоким мажоритированием  $k$  слоёв  $P(k,t)$ ,  $\lambda = 10^{-8}$ ,  $\alpha = 1$

$$P_{м.с} = [3e^{-2\lambda t^\alpha} - 2e^{-3\lambda t^\alpha}] [3e^{-2\lambda_{м.э} t^\alpha} - 2e^{-3\lambda_{м.э} t^\alpha}],$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов всей структуры,  $\lambda_{м.э}$  – интенсивность отказов мажоритарного элемента,  $t$  – время работы.

На рис. 7 представлены графики изменения вероятности безотказной работы ПЛИС без мажоритирования, с мажоритированием и с глубоким мажоритированием.

При этом стоимость системы увеличивается по сравнению с обычным мажоритированием:

$$C_{м} = 3(C_{\lambda} + C_{м.э} + C_{и.п}),$$

где  $C_{\lambda}$  – стоимость одного канала,  $C_{м.э}$  – стоимость мажоритара,  $C_{и.п}$  – стоимость источника питания. Задержка прохождения сигнала увеличивается всего на величину задержки одного мажоритара  $\tau_{м.э}$ . При этом не учитывается усложнение связей (трассировки). В случае глубокого мажоритирования:

$$C_{г.м} = 3(C_{\lambda} + kC_{м.э} + C_{и.п}).$$

Задержка прохождения сигнала увеличивается на величину задержки  $k$  мажоритаров

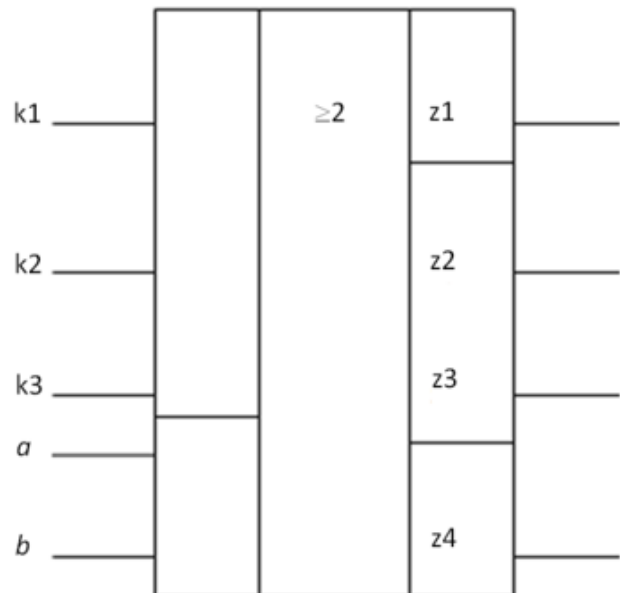


Рис. 8. Мажоритарный мультиплексор с возможностью «развала» системы на отдельные каналы

$k \cdot \tau_{м.э}$ . Используются три так называемых мажоритарных мультиплексора (рис. 8).

Подключение входов мажоритарного мультиплексора представлено на рис. 9.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>z1</i>
0	0	k1
0	1	k2
1	0	k3
1	1	мажоритирование

Рис. 9. Подключение входов мажоритарного мультиплектора

При этом происходит снижение производительности на 10–15 % за счет введения большого количества мажоритарных схем, однако конструкторы идут на это, компенсируя временные затраты другими методами [4].

Таким образом, наиболее эффективно «глубокое» мажоритирование, но оно является и самым дорогим методом, кроме того, необходимо оценивать допустимое снижение быстродействия.

### МАЖОРИТИРОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Пределом «глубины» мажоритирования может считаться уровень отдельных логических элементов и триггеров. На рис. 10 изображено мажоритирование элемента 2И-НЕ с использованием одного мажоритарара.

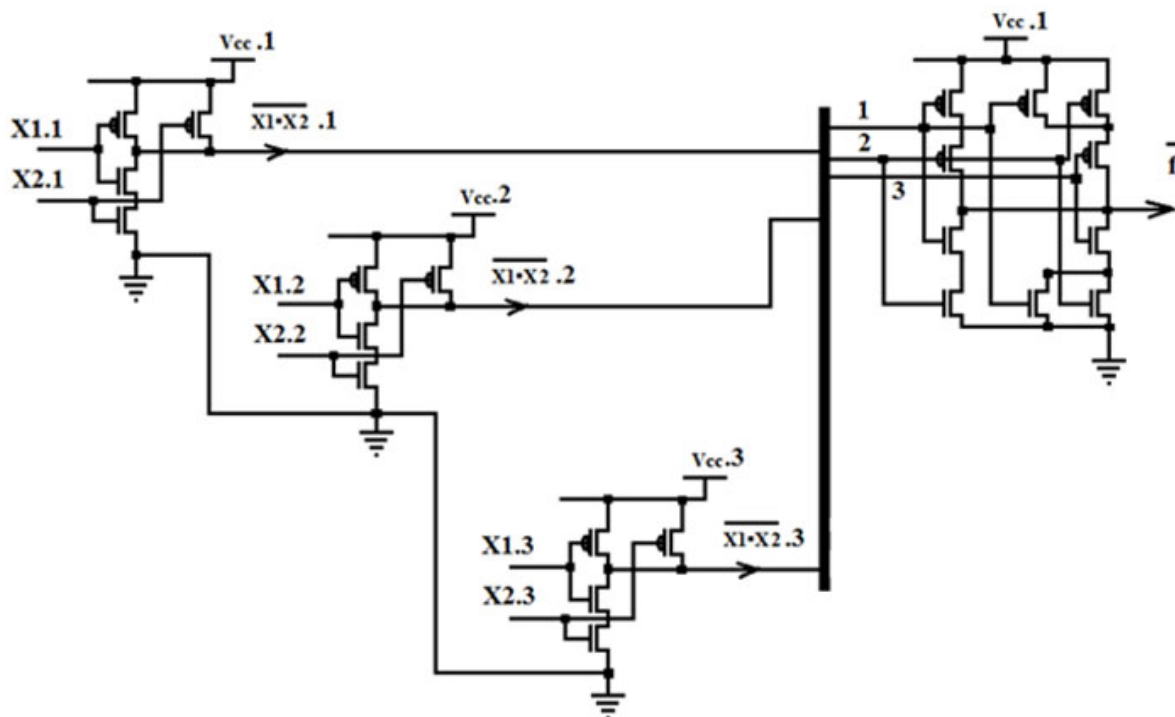


Рис. 10. Мажоритирование элемента 2И-НЕ с использованием одного мажоритарара

На рис. 11 Изображено мажоритирование элемента 2И-НЕ с использованием трёх мажоритараров.

Получается, что на один вентиль из 4-х транзисторов необходимо 18 дополнительных транзисторов в случае одного мажоритарара и 38 в случае трёх. Но количество парируемых радиационных отказов увеличивается. Это ещё мы не учли необходимость инверсии сигналов на выходах мажоритараров (рис. 10, 11) – это ещё дополнительно два транзистора для инвертора по выходу каждого мажоритарара.

### ТРАНЗИСТОРНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ НА УРОВНЕ ЭЛЕМЕНТА

Предлагается транзисторное резервирование внутри элемента [14–19] путём так называемого расчленения, например, для 2И-НЕ получим рис. 12.

Недостатком такой структуры является наличие одного источника питания. Предложим дублирование источника питания для 2И-НЕ – рис. 13.

Таким образом, с учетом того, что в каждой «четвёрке» транзисторов с интенсивностью отказов  $\lambda$  один отказ не изменяет её работу, получаем для 2И-НЕ, содержащего 4 транзистора:

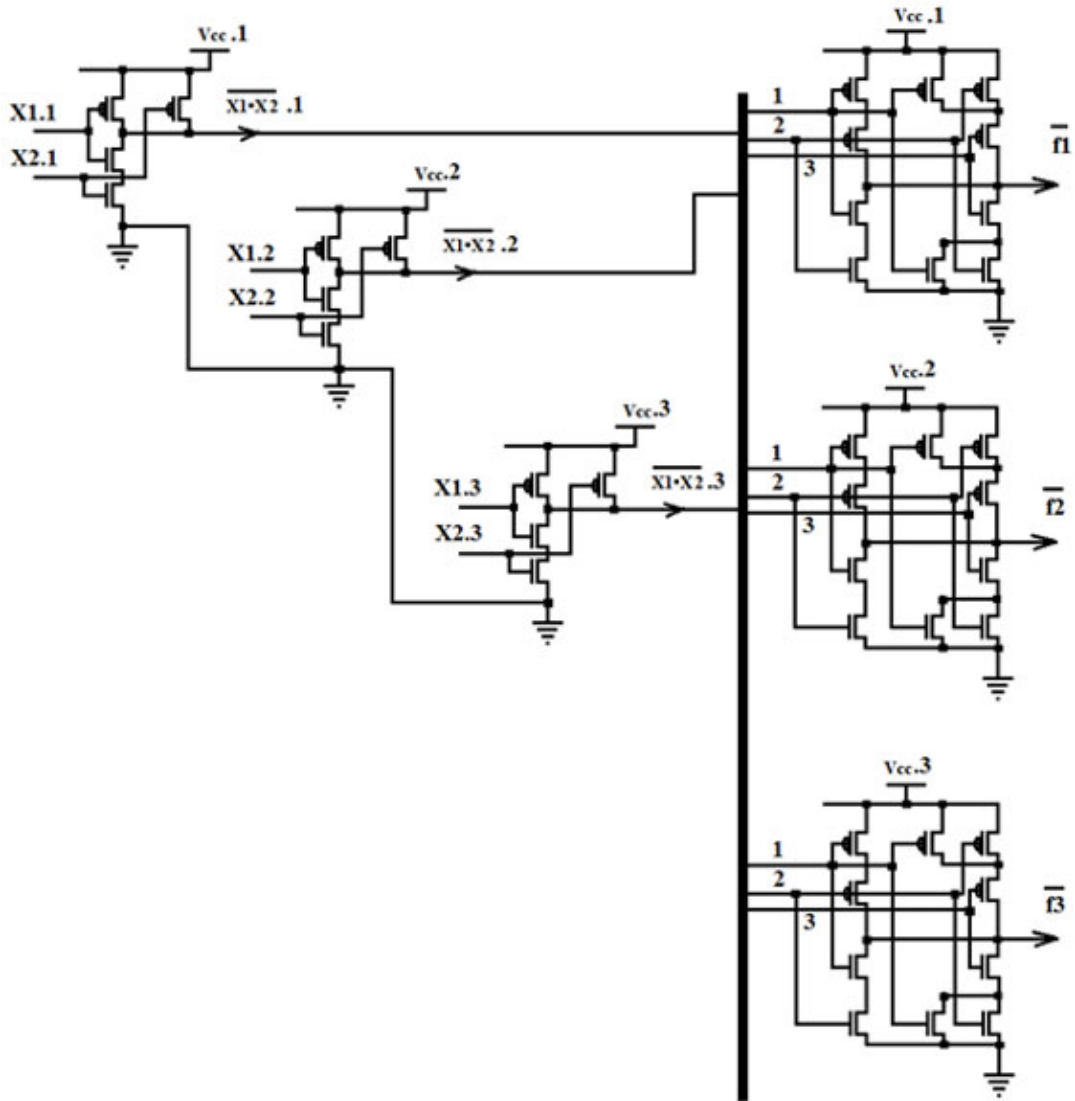


Рис. 11. Мажоритирование элемента 2И-НЕ с использованием трёх мажоритаров

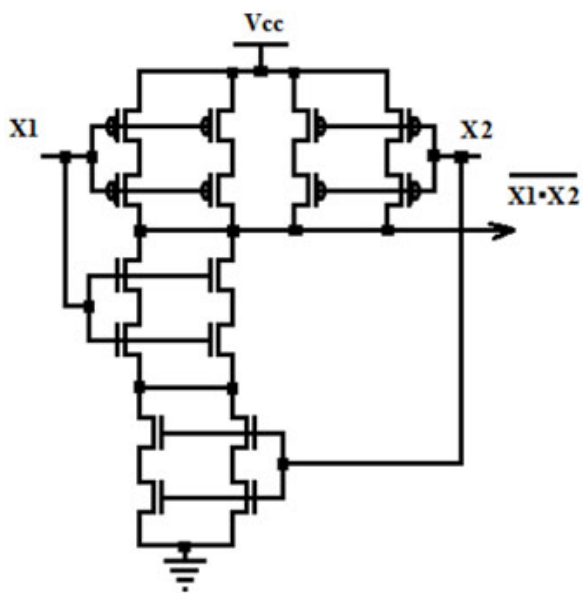


Рис. 12. Расчетверённый 2И-НЕ

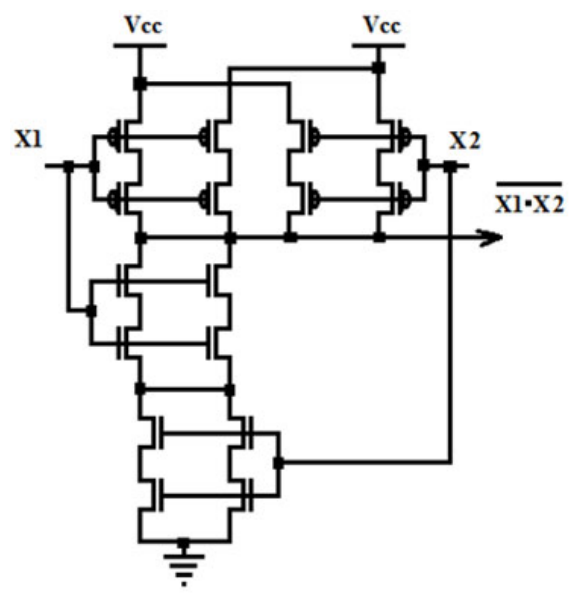


Рис. 13. Расчетверённый 2И-НЕ с дублированным источником питания



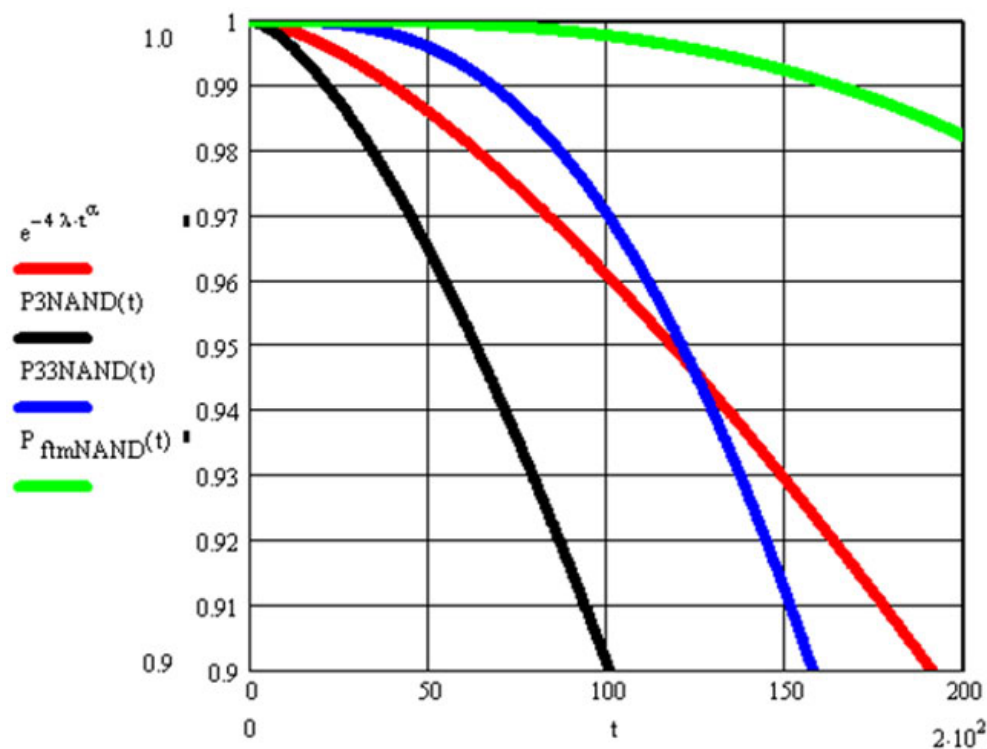


Рис. 14. Графики изменения вероятности безотказной работы 2И-НЕ без мажоритирования (красная), с мажоритированием и одним мажоритаром  $P_{3NAND}(t)$  – чёрная, с мажоритированием и тремя мажоритароми  $P_{33NAND}(t)$  – синяя, и транзисторное резервирование (зелёная)  $P_{ftmNAND}(t)$ ,  $\lambda = 10^{-5}$ ,  $\alpha = 1,5$

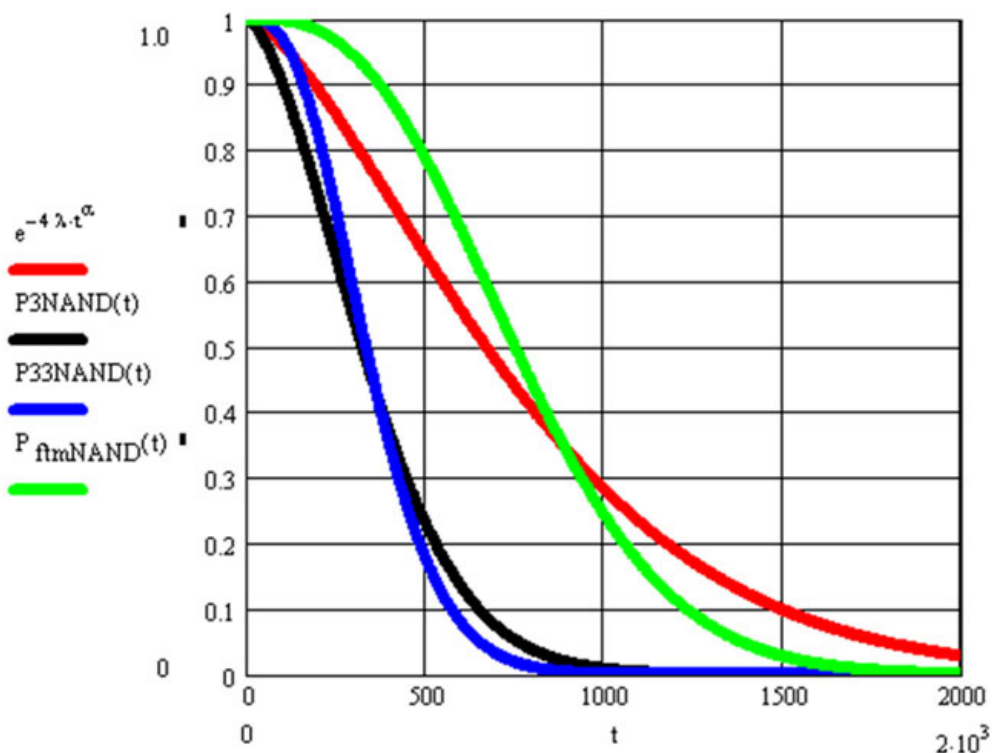


Рис. 15. Графики изменения вероятности безотказной работы 2И-НЕ в диапазоне времени от 0 до 2000 часов, без мажоритирования (красная), с мажоритированием и одним мажоритаром  $P_{3NAND}(t)$  – чёрная, с мажоритированием и тремя мажоритароми  $P_{33NAND}(t)$  – синяя, и транзисторное резервирование (зелёная)  $P_{ftmNAND}(t)$ ,  $\lambda = 10^{-5}$ ,  $\alpha = 1,5$

$$P_{\text{fimNAND}} = [e^{-4\lambda t^\alpha} + e^{-3\lambda t^\alpha} (1 - e^{-\lambda t^\alpha})]^4.$$

Графики изменения вероятности безотказной работы элемента 2И-НЕ без мажоритирования, с мажоритированием и одним мажоритаром  $P_{3\text{NAND}}(t)$  с мажоритированием и тремя мажоритароми  $P_{33\text{NAND}}(t)$ , и при транзисторном резервировании  $P_{\text{fimNAND}}(t)$  представлены на рис. 14–15.

Видим преимущество транзисторного резервирования. Троирование с одним мажоритаром даже хуже нерезервированной схемы. Ограничением является тот факт, что согласно законов проектирования Мида и Конвей число транзисторов в последовательной цепочке не должно быть больше 4-х [16]. Поэтому необходима декомпозиция исходной схемы, если число транзисторов в последовательной цепочке превышает 2, так как при транзисторном резервировании происходит увеличение в два раза, как на рис. 12–13. Если ограничение выполняется, то такое резервирование иногда даже менее затратно, чем троирование, так как в последнем случае необходимы мажоритары, для чего, с учётом дополнительного требуется 12 транзисторов. Если в схеме при соблюдении ограничения 2 транзистора в последовательной цепочке

(что существенно для транзисторного резервирования и несущественно для мажоритирования) имеется всего  $n$  транзисторов и  $m$  выходов (что существенно для мажоритирования и не существенно для транзисторного резервирования), то сложность троирования с тремя мажоритароми имеет вид:

$$L_{33} = 3n + 12m.$$

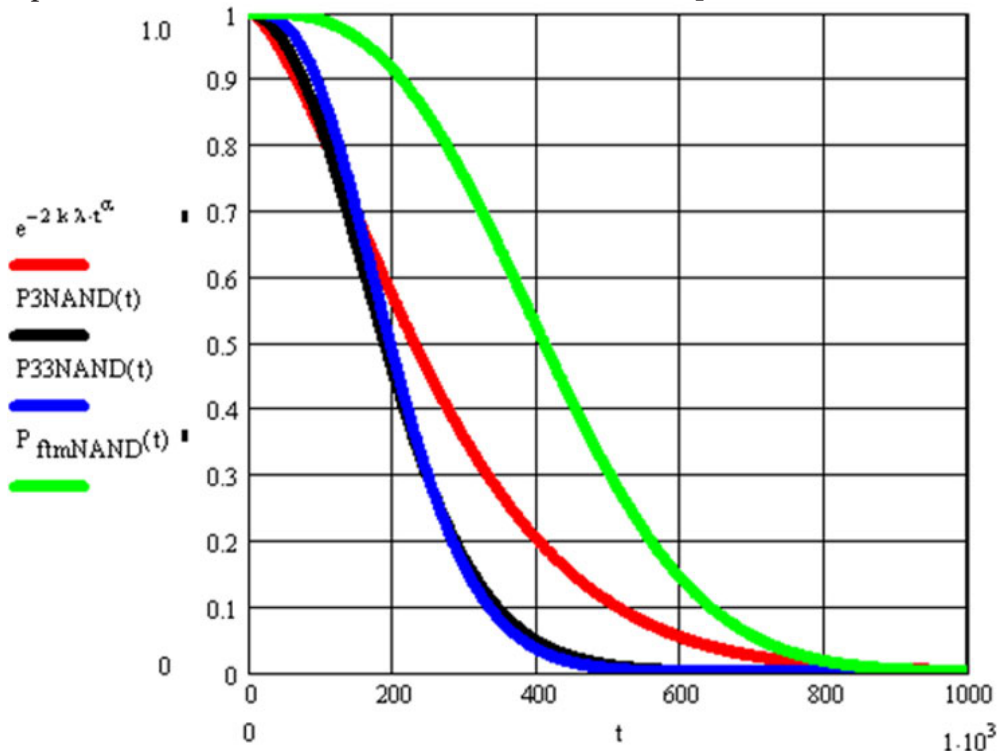
В то же время сложность транзисторного резервирования  $L_{\text{fim}}$  (без декомпозиции) описывается выражением:

$$L_{\text{fim}} = 4n.$$

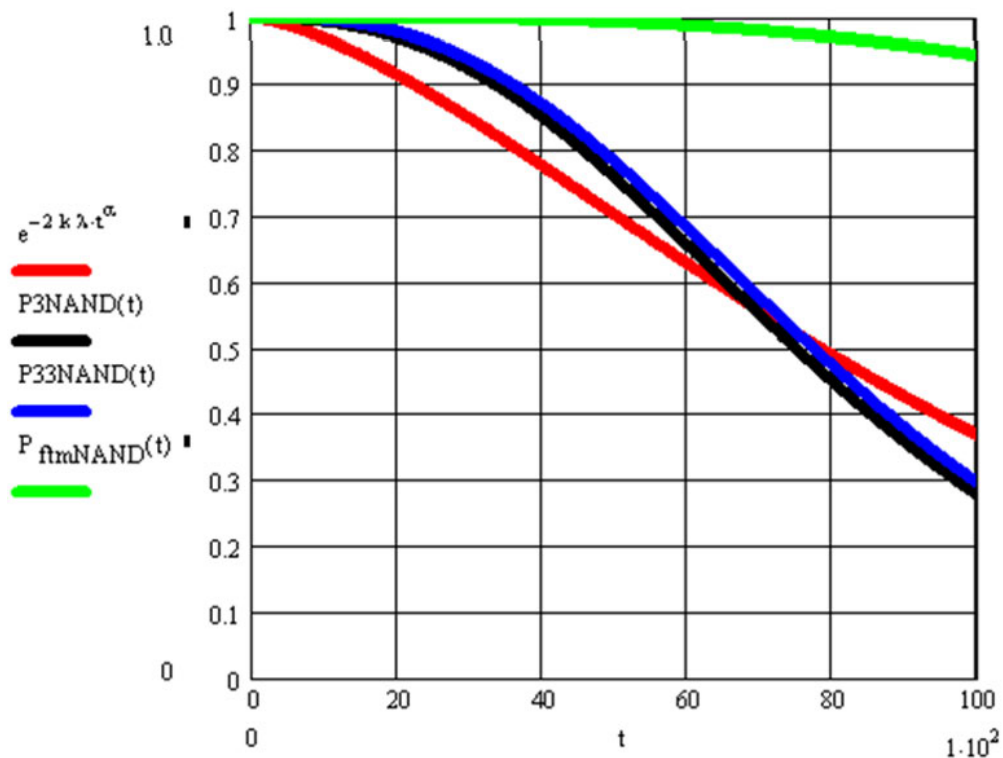
Таким образом, в ряде случаев троирование сложнее расчётверения при:

$$(4n / (3n + 12m)) < 1.$$

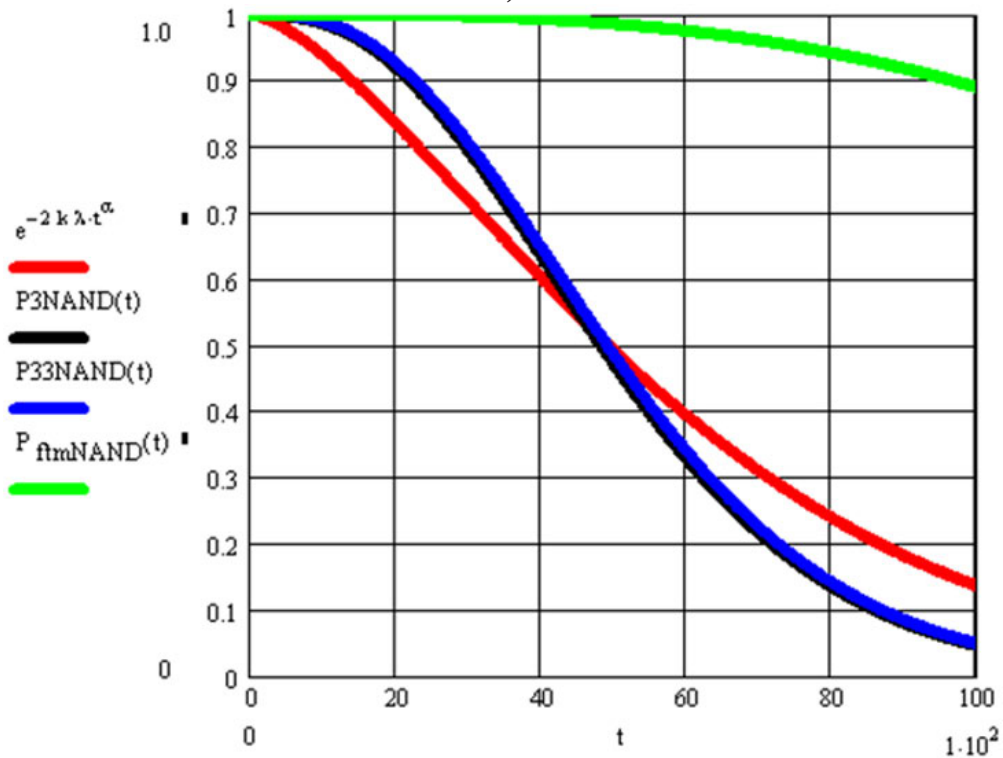
Пусть  $k$  количество транзисторов в одной из двух частей КМДП схемы (подключения шины питания или шины «Ноль вольт»). В схеме 2И-НЕ  $k = 2$ . Графики изменения вероятности безотказной работы элемента без мажоритирования, с мажоритированием и одним мажоритаром  $P_{3\text{NAND}}(t)$ , с мажоритированием и тремя мажоритароми  $P_{33\text{NAND}}(t)$ , и при транзисторном резервировании  $P_{\text{fimNAND}}(t)$  в зависимости от количества транзисторов  $k$  представлены на рис. 16.



А)



Б)



В)

Рис. 16. Графики изменения вероятности безотказной работы элемента в диапазоне вероятности от 0 до 1 без мажоритирования (красная), с мажоритированием и одним мажоритаром  $P_{3NAND}(t)$  (чёрная), с мажоритированием и тремя мажоритарями  $P_{33NAND}(t)$  (синяя), и транзисторное резервирование  $P_{ftmNAND}(t)$  (зелёная),  $\lambda = 10^{-5}$ ,  $\alpha = 1,5$ ; а)  $k = 10$ , б)  $k = 50$ , в)  $k = 100$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, резервирование транзисторов представляет собой максимальную степень резервирования. Для парирования одного отказа необходимо четыре транзистора, для парирования двух отказов – 9, для парирования трёх отказов – 16 [15]. Избыточность запредельная, но она того стоит в случае создания аппаратуры, работающей в условиях воздействия ТЗЧ [20]. Использование транзисторного резервирования существенно повышает радиационную стойкость цифровой аппаратуры. При этом, как ни парадоксально, в ряде случаев оно, представляющее собой так называемое расчленение, оказывается не сложнее троирования, которое, как показал пример, даже хуже нерезервированной схемы, если использовать один мажоритар. В дальнейшем целесообразно исследовать особенности резервирования в базовых матричных кристаллах-БМК [21–23]. В частности, вызывает интерес создание структур, в которых на этапе производства возможно отключение отдельных транзисторов в резервированных цепочках с целью диагностирования [5, 6, 12].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18298-79. Стойкость аппаратуры, комплектующих элементов и материалов радиационная. Термины и определения. – Москва : Изд-во стандартов, 1980. – 13 с.

2. Основные положения Заключения Межведомственной комиссии по анализу причин нештатной ситуации, возникшей в процессе проведения летных испытаний космического аппарата «Фобос-Грунт». – Режим доступа: <http://www.federalspace.ru/18126/> (дата обращения 30.06.2016)

3. *Donald C. Mayer, Ronald C. Laco*. Designing Integrated Circuits to Withstand Space Radiation. – V. 4, № 2, Crosslink. – Режим доступа: <http://www.aero.org/publications/crosslink/summer2003/06.html> (дата обращения 20.10.2013)

4. *Юдинцев В.* Радиационно-стойкие интегральные схемы. Надёжность в космосе и на земле / В. Юдинцев // Электроника: Наука,

Технология, Бизнес: журнал. – 2007. – № 5. – С. 72–77.

5. Надёжность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. / ред. совет во главе с В. С. Авдуевским (предс.) [и др.] Т. 1: Методология. Организация. Терминология / под ред. А. И. Рембезы. – М. : Машиностроение, 1989. – 224 с.

6. Надёжность и эффективность в технике: справочник: в 10 т. / ред. совет во главе с В.С. Авдуевским (предс.) [и др.]. Т. 2: Математические методы в теории надёжности и эффективности / под ред. Б. В. Гнеденко. – М. : Машиностроение, 1987. – 280 с.

7. *Бородин В. А.* Отказоустойчивые вычислительные системы / В. А. Бородин [и др.]. – М., 1990. – С. 55.

8. ГОСТ Р 53480-2009. Надёжность в технике. Термины и определения. ИЕС 60050 (191):1990-12 (NEQ). – Москва: Стандартинформ, 2010.

9. *Угрюмов Е. П.* Цифровая схемотехника: учебное пособие / Е. П. Угрюмов. – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – 518 с.

10. Электронный справочник «Надёжность электрорадиоизделий». – Режим доступа: [katus.ru/forums/attachmentid=9706&id=1278880836](http://katus.ru/forums/attachmentid=9706&id=1278880836) (дата обращения 17.10.2014)

11. ГОСТ 27.301-95. Надёжность в технике. Расчет надёжности. Основные положения. – Москва: Стандартинформ, 1995. – 15 с.

12. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 1991. – 10 с.

13. *Тюрин С. Ф., Громов О. А., Греков А. В.* Функционально-полный толерантный элемент ФПТ+ // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2011. – № 1(115). – С. 24–31.

14. *Тюрин С. Ф., Громов О. А.* Функционально-полный толерантный элемент. Патент РФ № 2438234. Оpubл. 27.12.2011. Бюлл. № 36.

15. *Тюрин С. Ф., Громов О. А., Греков А. В.* Функционально-полный толерантный элемент. Патент РФ №2449469. Оpubл. 27.04.2012. Бюлл. № 12.

16. *Тюрин С. Ф., Громов О. А., Греков А. В., Сулейманов А. А.* Функционально-полный

толерантный элемент. Патент РФ №2496227. Оpubл. 20.10.2013. Бюлл. № 29.

17. Дудкин Ю. П., Тюрин С. Ф., Южаков А. А., Громов О. А. Функционально-полный толерантный элемент. Патент РФ № 2541854. Оpubл. 20.02.2015. Бюлл. № 5.

18. Тюрин С. Ф. Ячейка статической оперативной памяти. Патент РФ № 2573226. Оpubл. 20.01.2016. Бюлл. № 2.

19. Ульман Дж. Д. Вычислительные аспекты СБИС. Пер. с англ.: А. В. Неймана. Под ред. П. П. Пархоменко. – М. : Радио и связь, 1990. – 480 с.

20. Проблемы создания отечественной элементной компонентной базы. – Режим доступа: <http://www.electronics.ru/journal/article/295> (дата обращения 27.06.2015).

21. Базовые матричные кристаллы. – Режим доступа: [http://www.asic.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=52&Itemid=92](http://www.asic.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=52&Itemid=92) (дата обращения 27.06.2015).

22. Гаврилов С. В., Денисов А. Н., Коняхин В. В., Макарецва М. М. САПР «Ковчег 3.0» для проектирования микросхем на БМК серий 5503, 5507, 5521 и 5529. – М. : 2013. – 295 с.

23. Денисов А. Н., Фомин Ю. П., Коняхин В. В., Федоров Р. А. Библиотека функциональных ячеек для проектирования полужаказных микросхем серий 5503 и 5507 / Под общ. ред. А. Н. Саурова. – М. : Техносфера, 2012. – 304 с.

**Тюрин Сергей Феофентович** – заслуженный изобретатель Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры Автоматики и телемеханики, электротехнический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.  
E-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru

**Tyurin Sergey Feofentovich** – Honored Inventor of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Automation and Telemechanics, Electrical Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University.  
E-mail: tyurinsergfeo@yandex.ru

**Прохоров Андрей Сергеевич** – аспирант кафедры Автоматики и телемеханики, электротехнический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.  
E-mail: прохор007@yandex.ru

**Prokhorov Andrey Sergeevich** – postgraduate student at the Department of Automation and Telemechanics, Electrical Engineering Faculty, Perm National Research Polytechnic University.  
E-mail: npoxop007@yandex.ru