

# Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем

**О.В. Дворников**

**д.т.н., доц. (ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн",  
г. Минск, Беларусь)**

**[oleg\\_dvornikov@tut.by](mailto:oleg_dvornikov@tut.by)**



# Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

## Особенности 1,5 мкм БиПТП- технологии

Применение известных конструктивно-технологических способов увеличения радиационной стойкости (полной диэлектрической изоляции, тонкопленочных резисторов, вертикальных  $p-n-p$ - транзисторов с тонкой активной базой и др.) приводит к существенному удорожанию ИС.

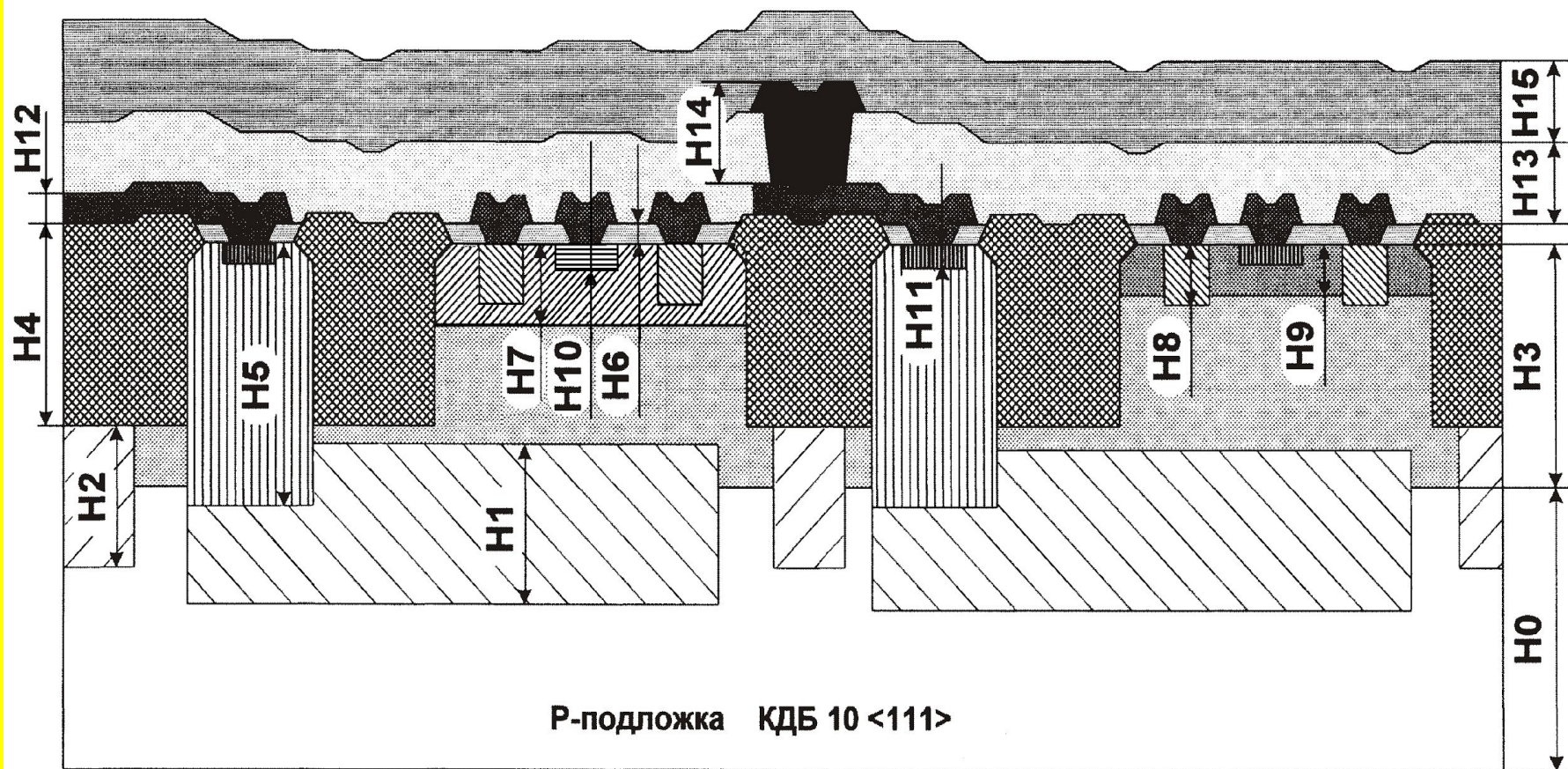
При создании на ОАО «Интеграл» (г. Минск, Беларусь) маршрута изготовления микросхем с биполярными (БТ), полевыми транзисторами с  $p-n$ - переходом (ПТП) и проектной нормой 1,5 мкм использован компромиссный подход, ориентированный на одновременное увеличение быстродействия, уменьшение шумов и стоимости, обеспечение радиационной стойкости, а именно:

- формирование комбинированной изоляции элементов диэлектриком и  $p^+$ - скрытым слоем для уменьшения площади  $p-n$ - переходов и предотвращения «защелкивания» транзисторных структур при радиационном воздействии;

# Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

- уменьшение всех топологических размеров;
- уменьшение глубины залегания базовой и эмиттерной областей  $n-p-n$ - транзистора и максимальное увеличение концентрации примеси в них;
- конструктивное исключение соприкосновения областей  $n^+$ - эмиттера и диэлектрической изоляции для предотвращения тока утечки между коллектором и эмиттером  $n-p-n$ - транзистора по окислу;
- формирование резисторов на сильнолегированных полупроводниковых областях;
- повышение плотности тока в транзисторных структурах до границы наступления эффектов высокого уровня инжекции.

# Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС



Вид структуры кристалла

# Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

Элементы структуры		Обозначение	Толщина, мкм	Тип проводимости	Поверхностное сопротивление, Ом/•
Пластина кремниевая эпитаксиальная со скрытым слоем	Подложка	H0	460±20	p	10±2,0 Ом/см
	N+ - скрытый слой	H1	6,0±1,0	n+	35±8
	P+ - скрытый слой	H2	2,5±0,3	p+	150±30
	Эпитаксиальный слой	H3	2,3±0,3	n-	1,0±0,1 Ом/см
Разделение		H4	1,35±0,05	–	–
Глубокий коллектор		H5	2,5±0,4	n+	22±4
Базовый окисел		H6	0,22±0,02	–	–
P - канал		H7	1,4±0,3	p-	5500±700
P+ - база		H8	0,6±0,1	p+	80±20
P- база		H9	0,36±0,04	p-	560±60
N+ - затвор		H10	0,4±0,04	n+	60±20
N+ - эмиттер		H11	0,22±0,02	n+	45±5
Металл 1		H12	0,55±0,05	–	–
Межуровневый диэлектрик		H13	0,8±0,1	–	–
Металл 2		H14	1,1±0,1	–	–
Пассивация		H15	0,9±0,1	–	–

**Данные по изготовлению отдельных слоев структуры**

# Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

## Параметры транзисторов и тестовых элементов

Наименование параметра, размерность, режим измерения	Норма
<b><i>n-p-n</i> БТ</b>	
Коэффициент усиления $\beta$ ( $\Delta I_B = 1$ мкА, $V_{CE} = 1$ В, $N_B = 5$ )	>100
Пробивное напряжение коллектор- эмиттер $V_{CEOBR}$ , В, (база в обрыве)	>8
Пробивное напряжение коллектор-база $V_{CBBR}$ , В	>12
Пробивное напряжение эмиттер-база $V_{EBBR}$ , В	>4,5
<b><i>L p-n-p</i> БТ</b>	
Коэффициент усиления $\beta$ ( $\Delta I_B = 1$ мкА, $V_{CE} = 1$ В, $N_B = 5$ )	>15
Пробивное напряжение коллектор- эмиттер $V_{CEOBR}$ , В, (база в обрыве)	>8
Пробивное напряжение коллектор-база $V_{CBBR}$ , В	>10
Пробивное напряжение эмиттер-база $V_{EBBR}$ , В	>10



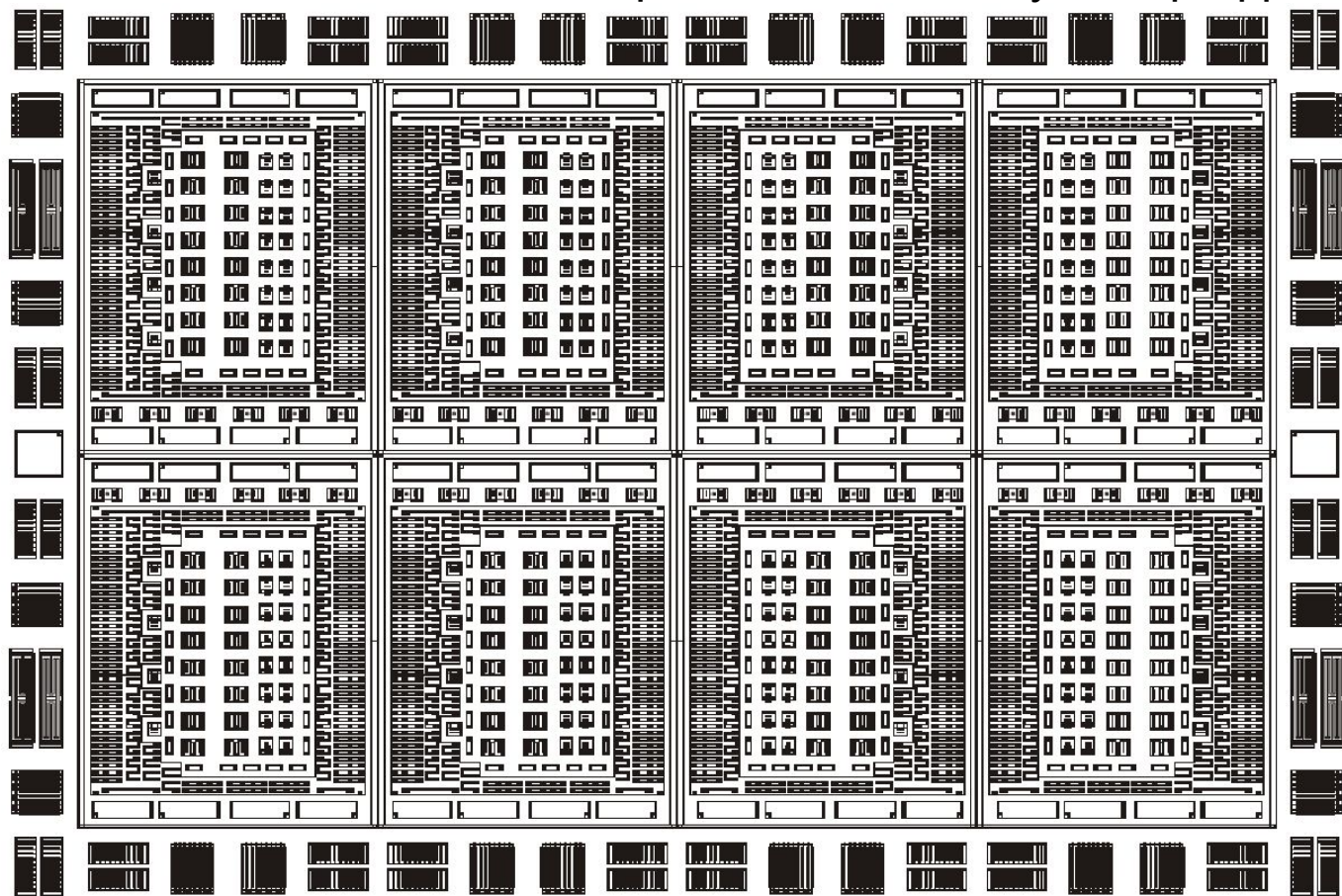
# Технологический маршрут изготовления радиационно-стойких аналоговых ИС

## Параметры транзисторов и тестовых элементов

Наименование параметра, размерность, режим измерения	Норма
<b>Малосигнальный <i>p</i>- ПТП</b>	
Максимальный ток стока, мкА, ( $V_{DS} = 4 \text{ В}$ , $V_{GS} = 0$ )	110-220
Напряжение отсечки, В	1,5-2,5
<b>Тестовые элементы</b>	
<i>p</i> - база, сопротивление слоя, Ом/квадрат	500-620
<i>n</i> + - глубокий коллектор, сопротивление слоя, Ом/квадрат	19-25
Напряжение пробоя изоляции, В	>16

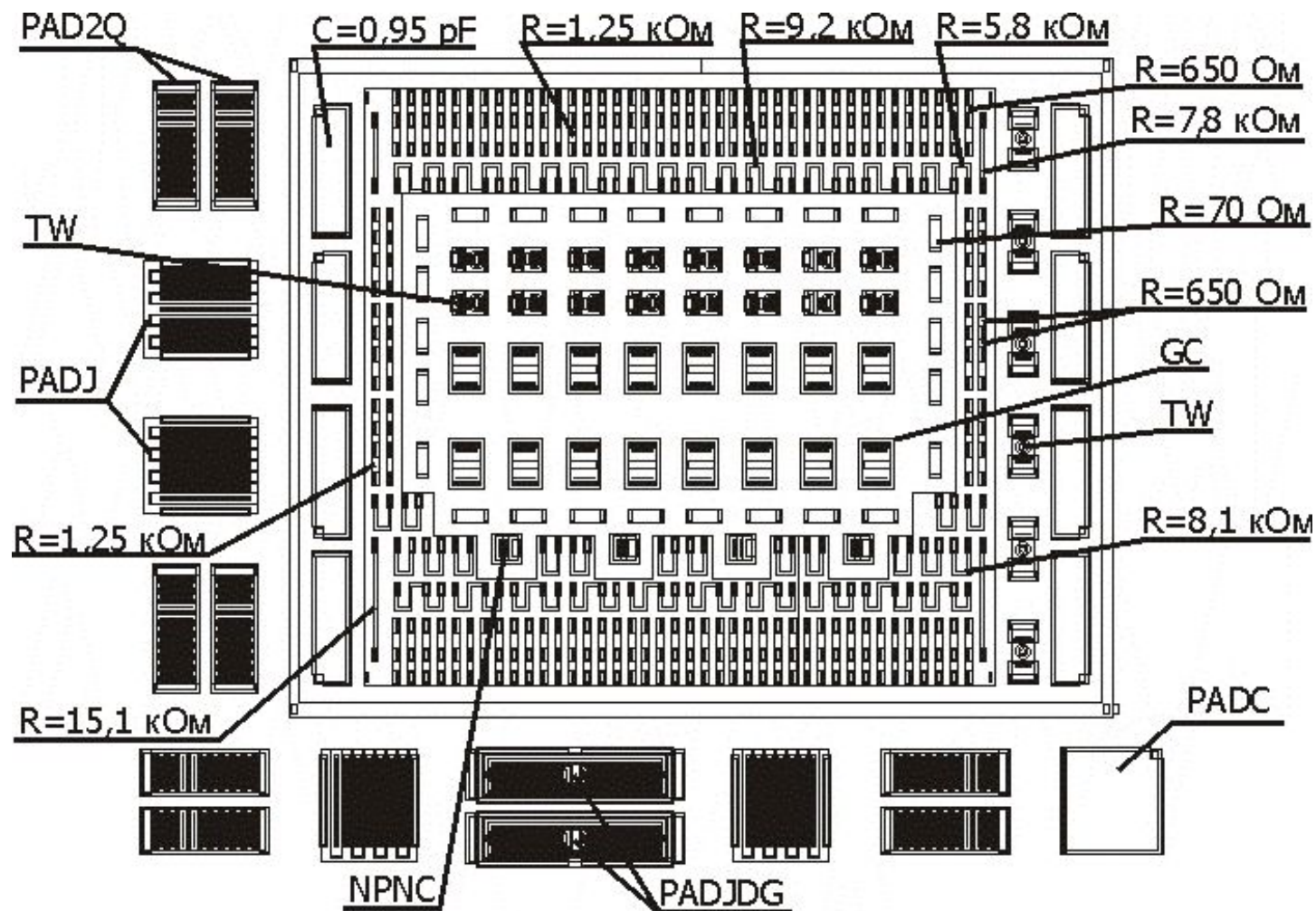
# Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК 1 3»

На основе 1,5 мкм БиПТП- технологии создан базовый матричный кристалл (БМК) типа «АБМК\_1\_3» для изготовления малошумящих и широкополосных аналоговых ИС. «АБМК\_1\_3» содержит четыре идентичных канала, каждый из которых состоит из двух макрофрагментов.





# Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК\_1\_3»



Макрофрагмент АБМК\_1\_3

# Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК\_1\_3»

По периметру БМК расположены сложнофункциональные контактные площадки, которые используются для соединения кристалла проводниками с траверсами корпуса или в качестве элементов ИС:

- *PAD2Q* – два многоэмиттерных малошумящих *n-p-n*-транзистора;
- *PADJ* – малошумящий *p*-ПТП;
- *PADJDG* – два двухзатворных *p*-ПТП;
- *PADC* – МОП- конденсатор с номиналом 2,3 пФ.

Каждый макрофрагмент включает один изолированный карман, в котором размещены резисторы с номиналом от 650 Ом до 15,1кОм и 70 Ом; *n-p-n*-транзисторы (*NPNC*) для источников стабильного тока; МОП- конденсаторы с емкостью 0,95 пФ; функционально-интегрированные элементы (*PNPJF*), представляющие собой каскодное соединение *p-n-p*-транзистора и *p*-ПТП; *n-p-n*-транзисторы с объединенными коллекторами (*GC*); 4-х- слойные полупроводниковые структуры (*TIW*), позволяющие с помощью различного выполнения межсоединений областей получить два *n-p-n*- или *p-n-p*-транзистор.

# Результаты радиационных испытаний

**Место испытаний:** установка ИБР-2, канал №3, Объединенный институт ядерных исследований (г. Дубна, РФ).

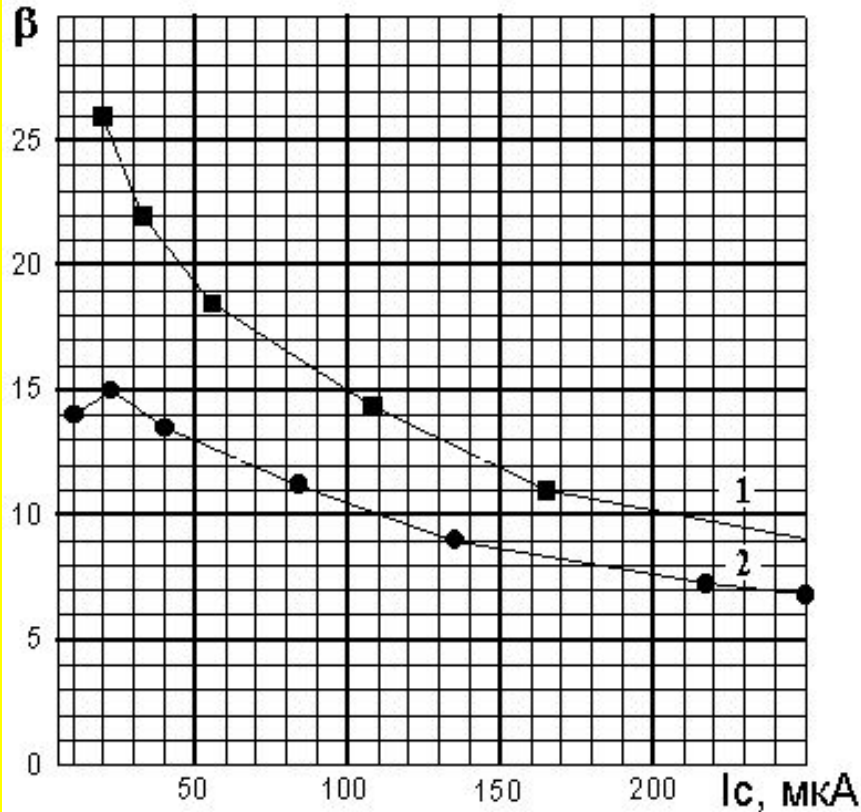
Экспериментальная установка описана в Сообщении ОИЯИ, Р13-96-403. Испытания проведены совместно с Замятиным Н.И. (CMS-RDMS/JINR meeting, Dubna, 15.04.1998).

**Объект испытаний:** тестовые транзисторы, резисторы, микросхема «Тетрод-Б», изготовленные по 1,5 мкм БиПТП-технологии.

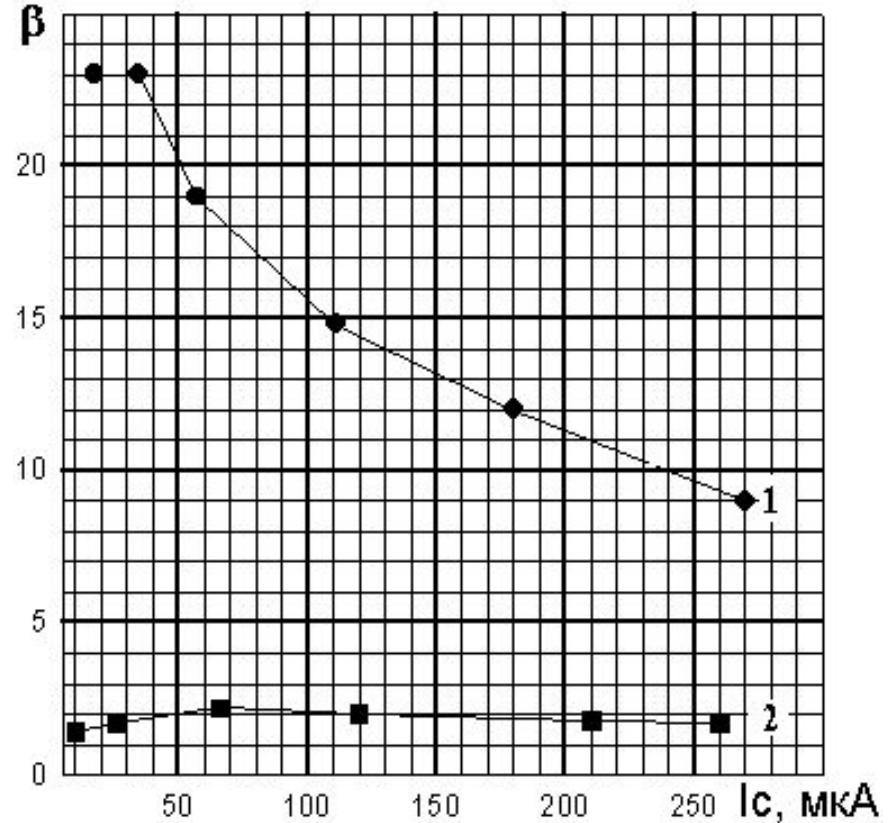
**Условия испытаний:** гамма-источник -  $^{137}\text{Cs}$ , комнатная температура, без электрического режима.

Интегральный поток нейтронов, $\text{n}/\text{cm}^2$ , $E_n > 100$ кэВ	Поглощенная доза, Мрад	Плотность потока или мощность дозы
$2 \cdot 10^{14}$	0,12	$2 \cdot 10^{10}$ н/(см <sup>2</sup> *с)
$9 \cdot 10^{12}$	-	$2 \cdot 10^{10}$ н/(см <sup>2</sup> *с)
-	1,0	180 крад/ч

# Результаты радиационных испытаний

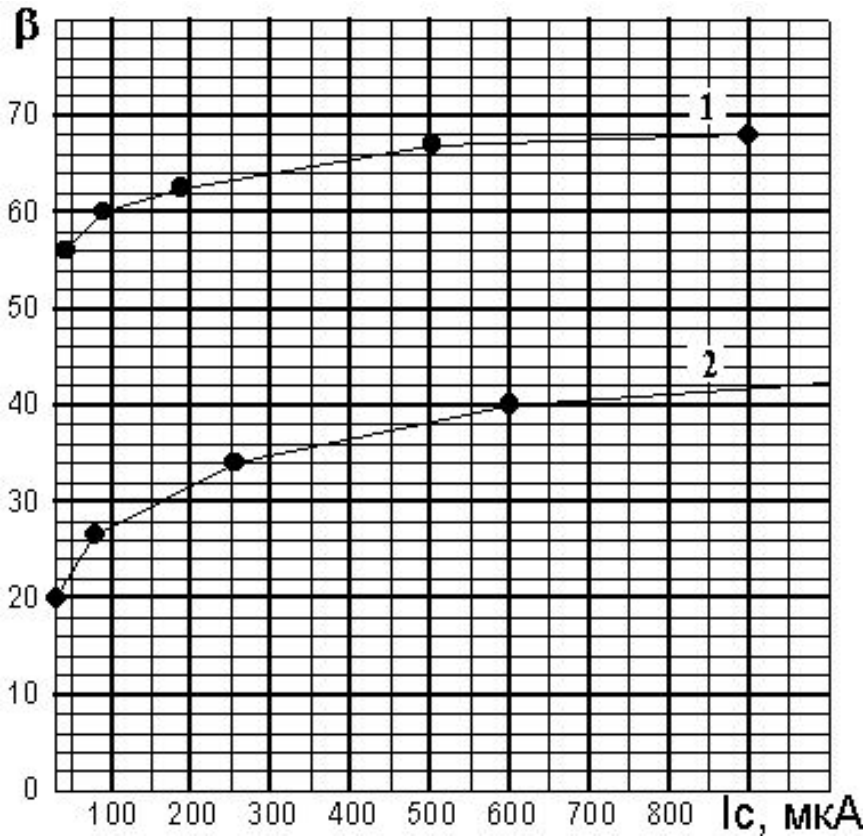


Зависимость коэффициента усиления тока  $\beta$  от тока коллектора  $p-n-p$ - транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов  $9 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2$

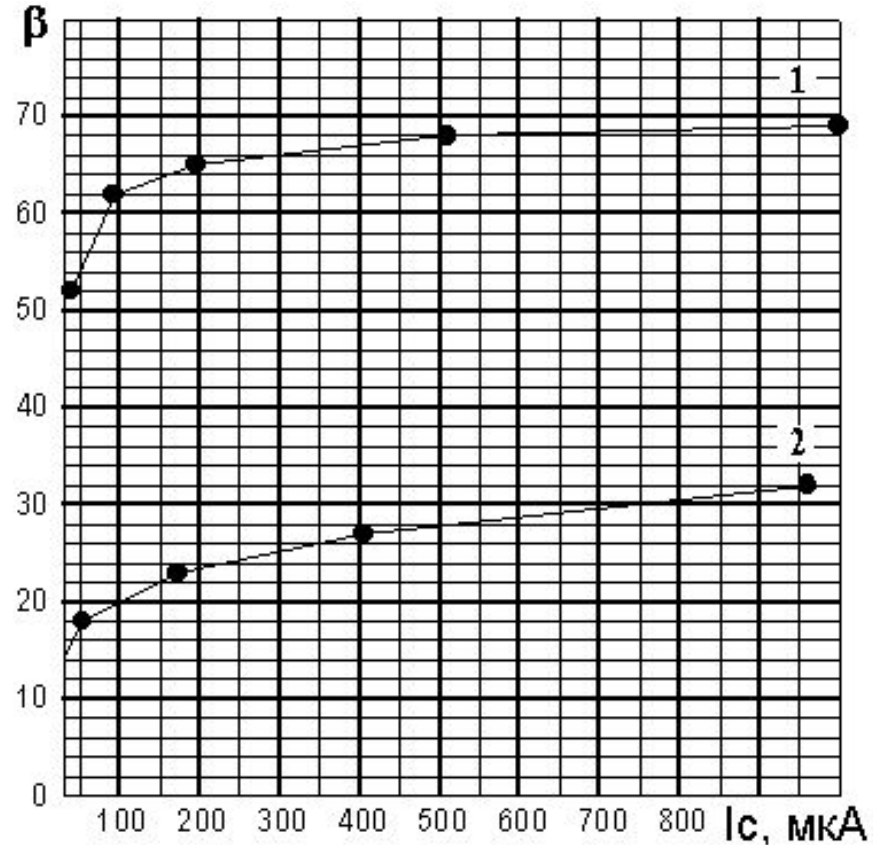


Зависимость коэффициента усиления тока  $\beta$  от тока коллектора  $p-n-p$ - транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов  $2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$

# Результаты радиационных испытаний



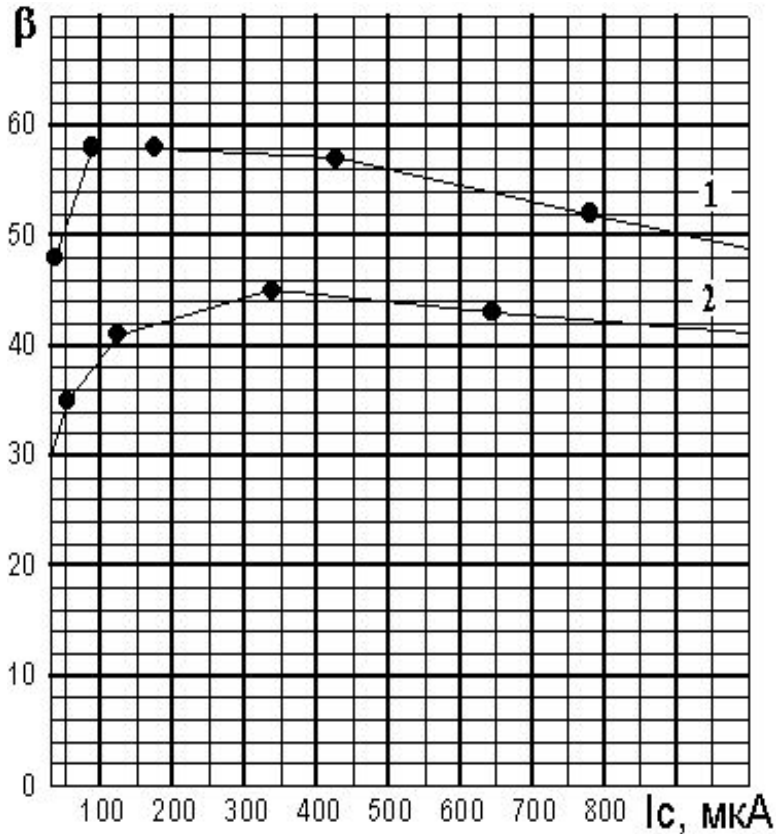
Зависимость коэффициента усиления тока  $\beta$  от тока коллектора малошумящего  $n-p-n$  транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов  $9 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2$



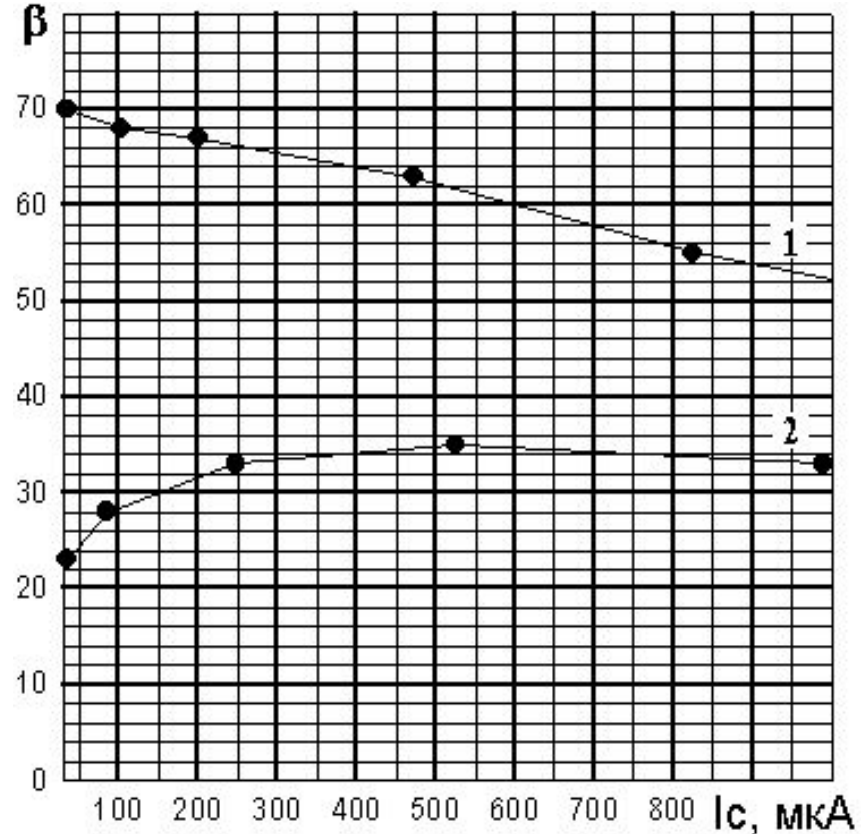
Зависимость коэффициента усиления тока  $\beta$  от тока коллектора малошумящего  $n-p-n$  транзистора: 1 – до облучения, 2 - после воздействия потока нейтронов  $2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$



# Результаты радиационных испытаний

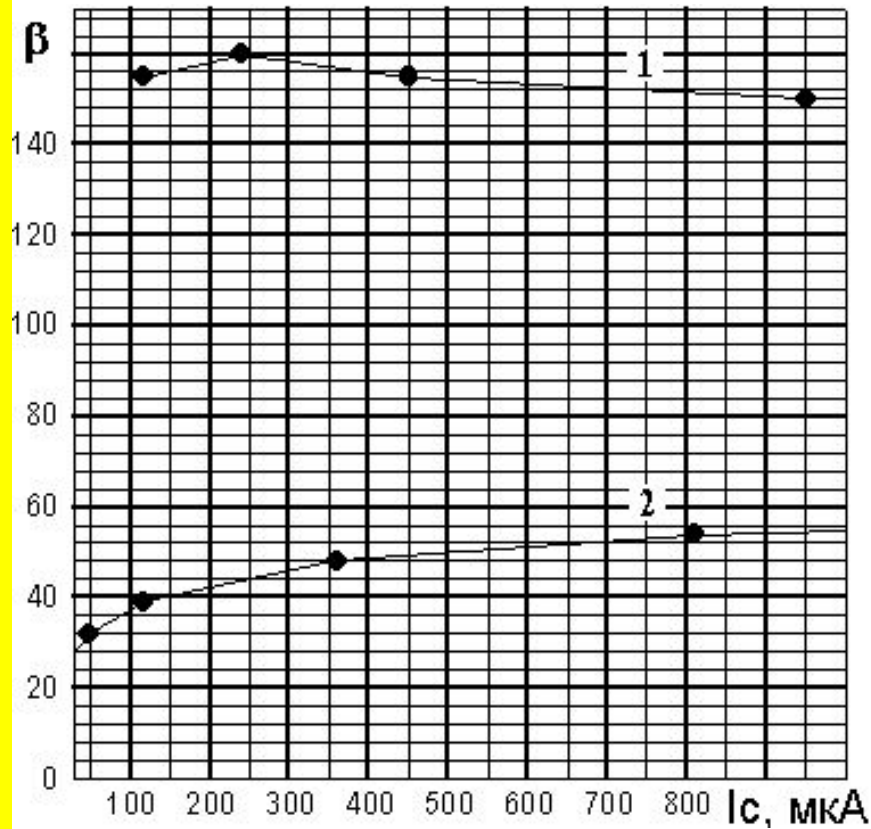


Зависимость коэффициента усиления тока  $\beta$  от тока коллектора малосигнального *n-p-n* транзистора:  
1 – до облучения, 2 – после воздействия потока нейтронов  $9 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2$

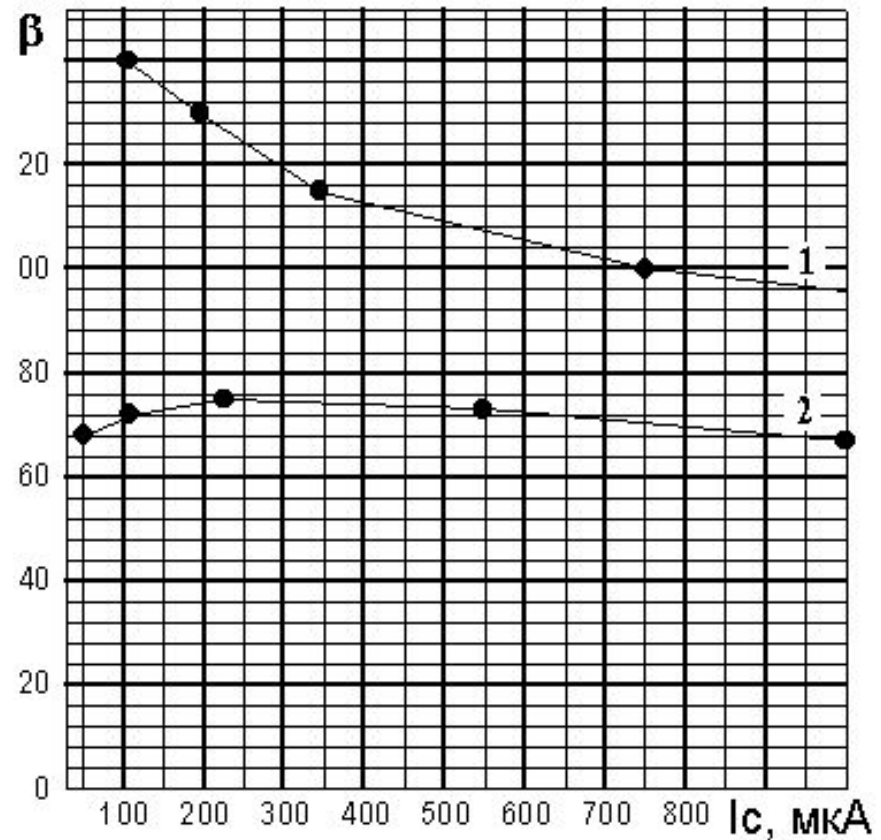


Зависимость коэффициента усиления тока  $\beta$  от тока коллектора малосигнального *n-p-n* транзистора:  
1 – до облучения, 2 – после воздействия потока нейтронов  $2 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2$

# Результаты радиационных испытаний

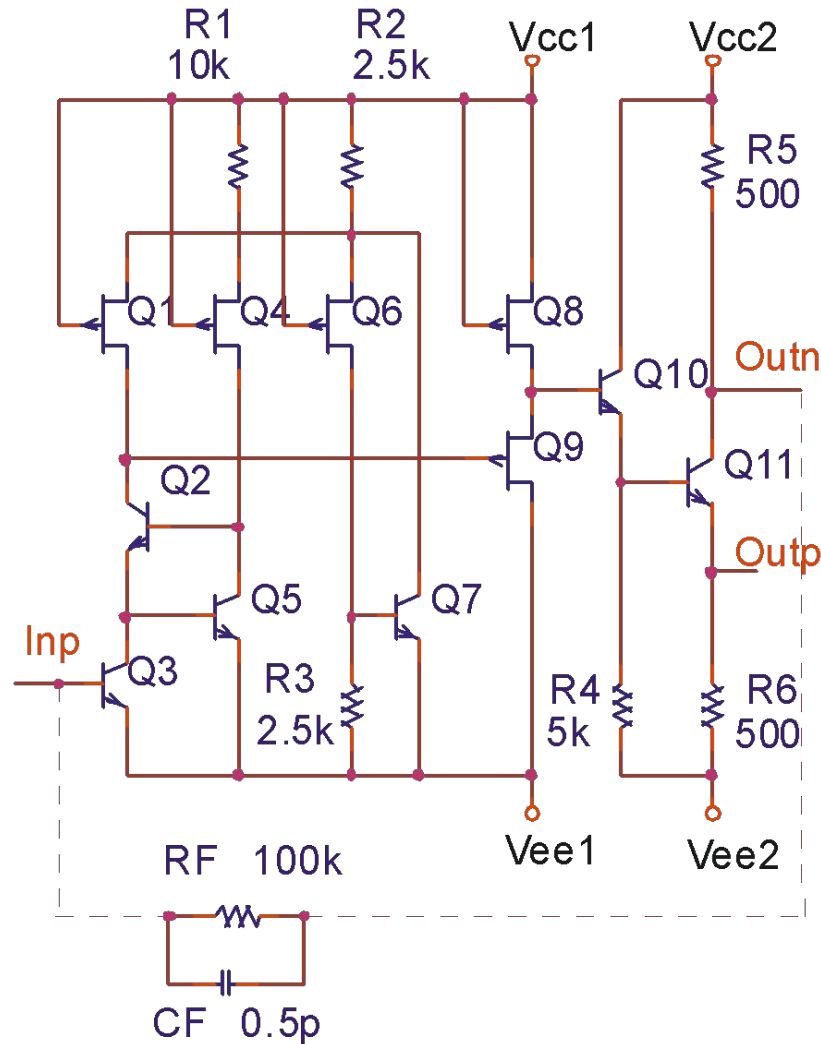


Зависимость коэффициента усиления тока  $\beta$  от тока коллектора малoshумящего *n-p-n* транзистора: 1 – до облучения, 2 – после гамма-облучения, поглощенная доза 1Мрад



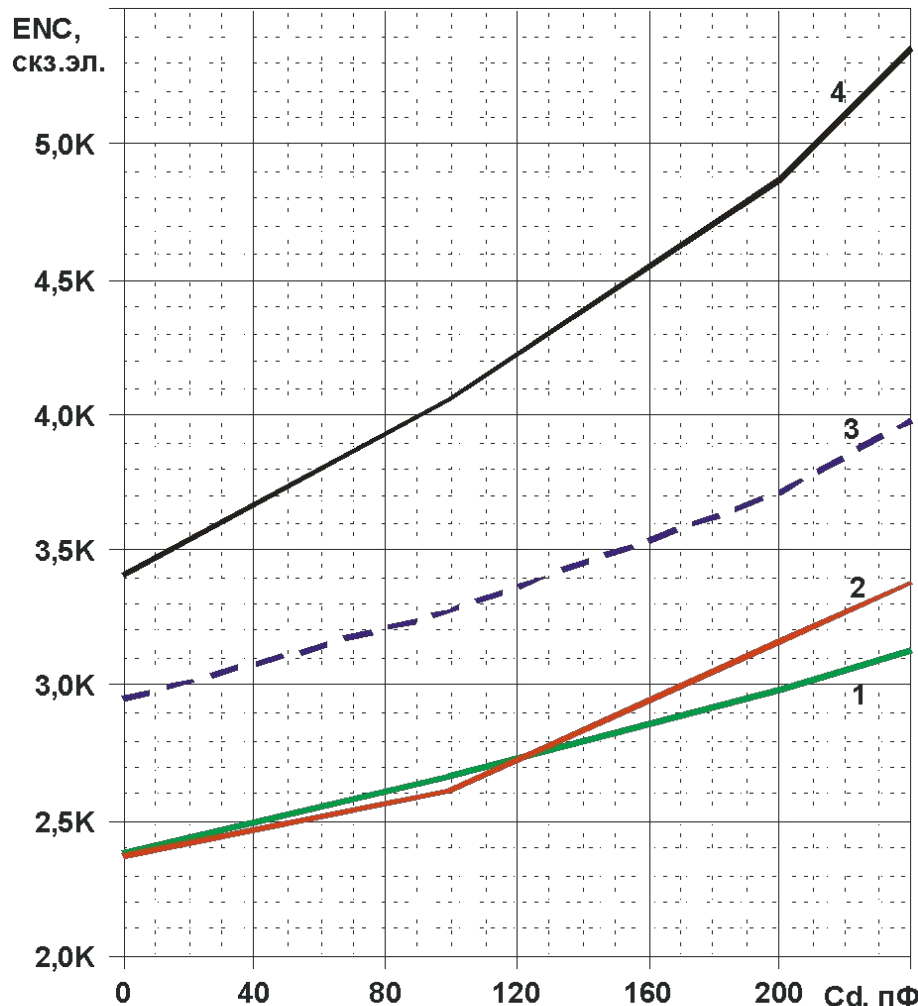
Зависимость коэффициента усиления тока  $\beta$  от тока коллектора малосигнального *n-p-n* транзистора: 1 – до облучения, 2 – после гамма-облучения, поглощенная доза 1Мрад

# Результаты радиационных испытаний



Электрическая схема усилителя Тетрод-Б

# Результаты радиационных испытаний



Зависимость эквивалентного шумового заряда ( $ENC$ ) ИС «Тетрод- Б» от емкости детектора ( $C_d$ ) при времени формирования  $T_p=0,5$  мкс:

- 1 – до облучения,
- 2 - после воздействия потока нейтронов  $9 \cdot 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>,
- 3 - после гамма- облучения, поглощенная доза 1 Мрад,
- 4 - после воздействия потока нейтронов  $2 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>

$$ENC^2 \approx \alpha_{S2} T_p q \left( \frac{2kT}{qR_F} + \frac{I_E}{\beta} \right) + \frac{\alpha_{S1}}{T_p} kT (C_D + C_F + C_{INPAMP})^2 \frac{\Phi_T}{I_E} + \frac{2\alpha_{S1}}{T_p} kTR_B (C_D + C_F)^2$$

где  $\alpha_{S1}$ ,  $\alpha_{S2}$  – коэффициенты, характеризующие форму импульса на выходе фильтра, соединенного с ИС «Тетрод- Б»

# Результаты радиационных испытаний

## Выводы по результатам испытаний:

- *n-p-n*, *p*-ПТП сохраняют свою работоспособность при поглощенной дозе гамма-излучения 1 Мрад и потоке нейтронов  $2 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>, а горизонтальные *p-n-p*-транзисторы - при потоке нейтронов до  $9 \cdot 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>.
- Изменение величины сопротивления резисторов при поглощенной дозе гамма-излучения 1 Мрад и потоке нейтронов  $2 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup> не происходит в пределах погрешности измерений.
- Среднее изменение параметров *p*-ПТП составляет

условия облучения	изменение максимального тока стока, %	изменение напряжения отсечки, %
$2 \cdot 10^{14}$ н/см <sup>2</sup>	-18,6	-8,5
$9 \cdot 10^{12}$ н/см <sup>2</sup>	-10,0	-3,4
1,0 Мрад	-10,6	-6,0.



# Результаты радиационных испытаний

## Выводы по результатам испытаний:

- Коэффициент усиления паразитного транзистора (коллектор-коллектор близко расположенных *n-p-n*-транзисторов) чрезвычайно мал (0,1-0,2), не изменяется при гамма-облучении и уменьшается до 0,02 при воздействии потока нейтронов.
- Пробивное напряжение транзисторов при воздействии радиации не ухудшилось.
- Радиационная стойкость разработанных *n-p-n*-транзисторов незначительно уступает зарубежным аналогам, изготовленным по *DMILL* и *H2CMOS*-технологиям.

# Результаты радиационных испытаний

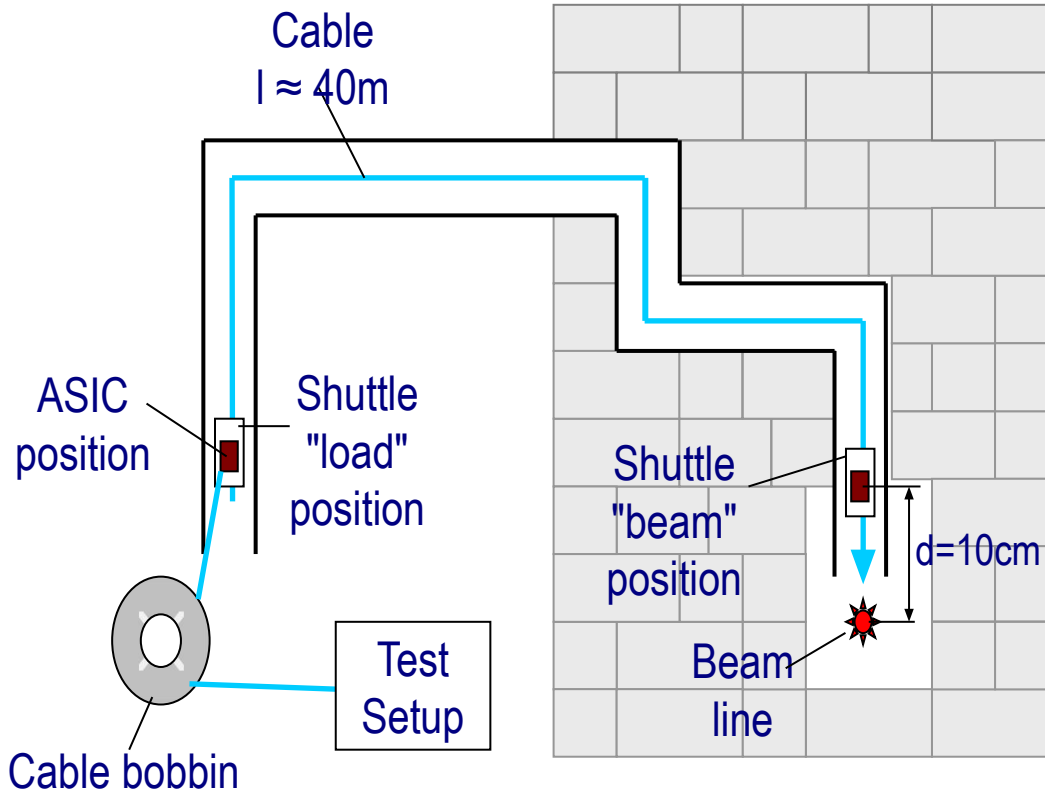
**Место испытаний:** канал *PS-T8* ускорителя *PS*, стенд *IRRAD2*, Европейский центр ядерных исследований (г. Женева, Швейцария).

**Объект испытаний:** ИС 8-ми канального усилителя-формирователя-дискриминатора «АНОД», изготовленная по 1,5 мкм БиПТП- технологии. Испытания проведены Чеховским В.А., Солиным А.В.

**Условия испытаний:** Облучение ИС проводилось в течение нескольких экспозиций, в перерывах между которыми измерялись основные характеристики схемы. Спектр нейтронов - аналогичный ожидаемому на установке *LHC*. Во время облучения осуществлялся контроль напряжения питания и тока потребления ИС, а также регистрировались срабатывания каждого канала.

# Результаты радиационных испытаний

## Схема проведения эксперимента



### Primary PS proton beam :

Beam line: PS-T8

Beam energy : 24 GeV/c

Beam spot (h,v) : 6 x 4 cm<sup>2</sup>

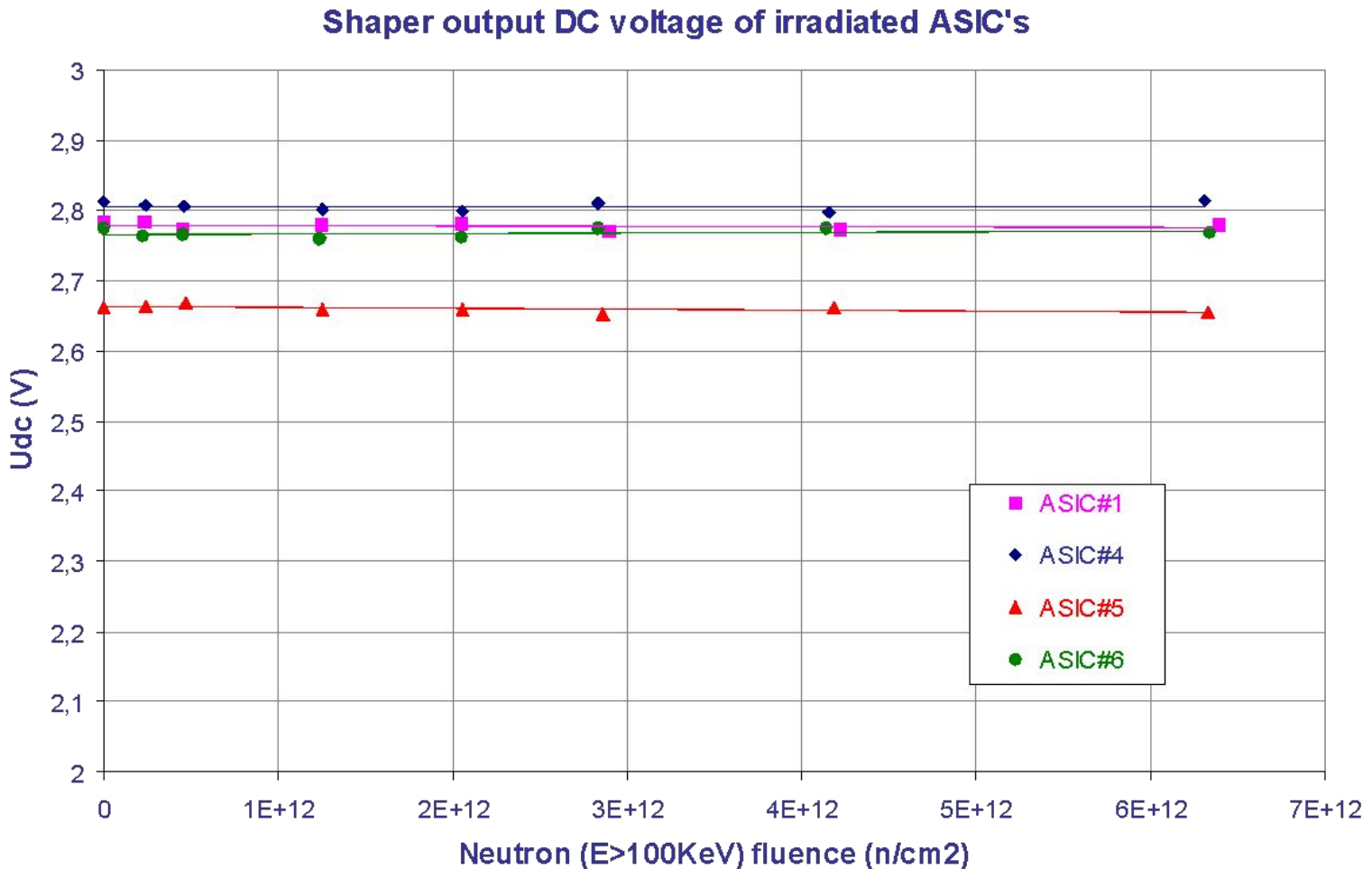
### Secondary particles in the irradiation cavity :

neutron : 50 KeV ÷ >20 MeV

p, π<sup>+</sup>, π<sup>-</sup> : 0.3 ÷ 4 GeV

gamma : 100 KeV ÷ 100 MeV

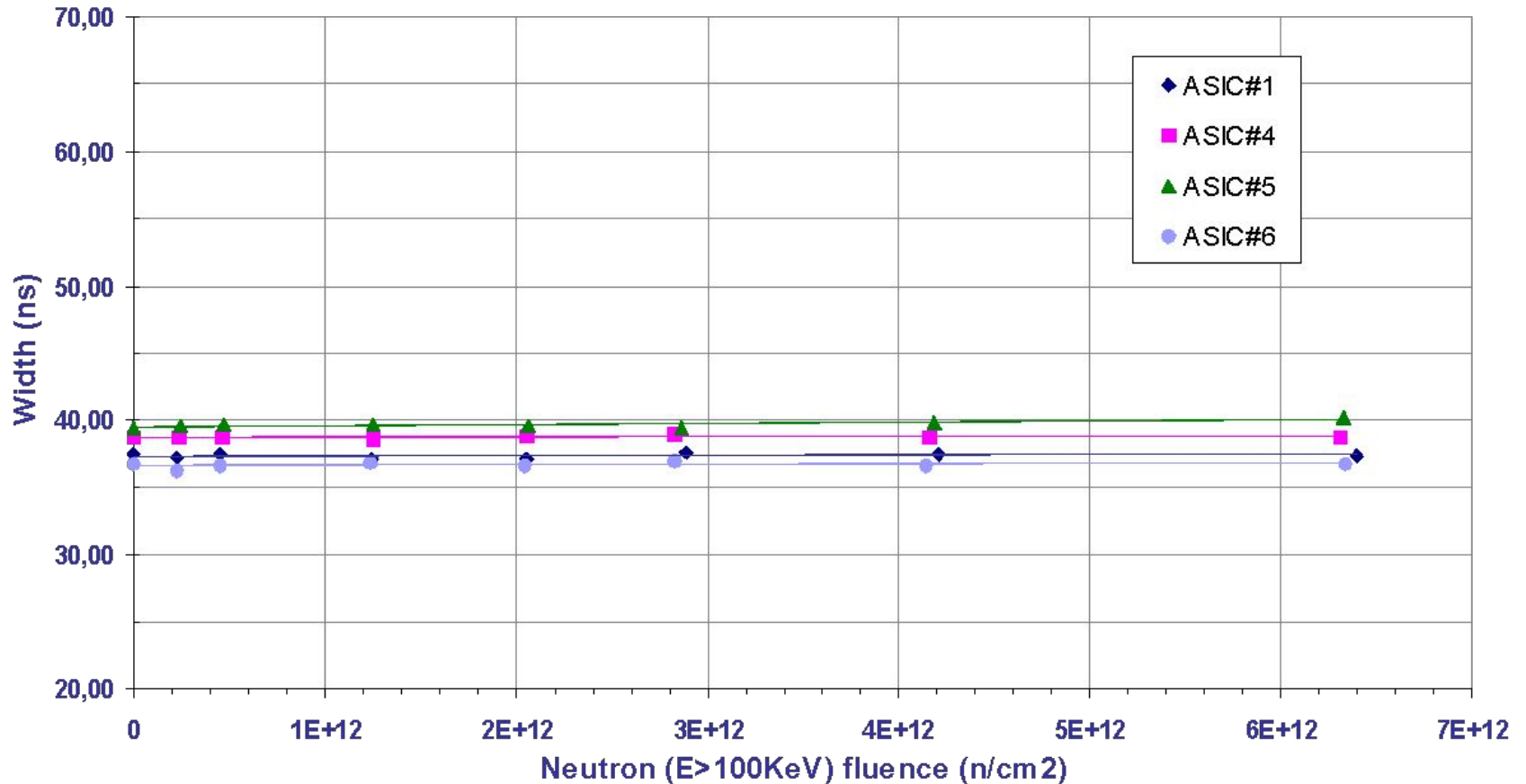
# Результаты радиационных испытаний



Зависимость постоянного напряжения на выходе формирователя от интегрального потока нейтронов

# Результаты радиационных испытаний

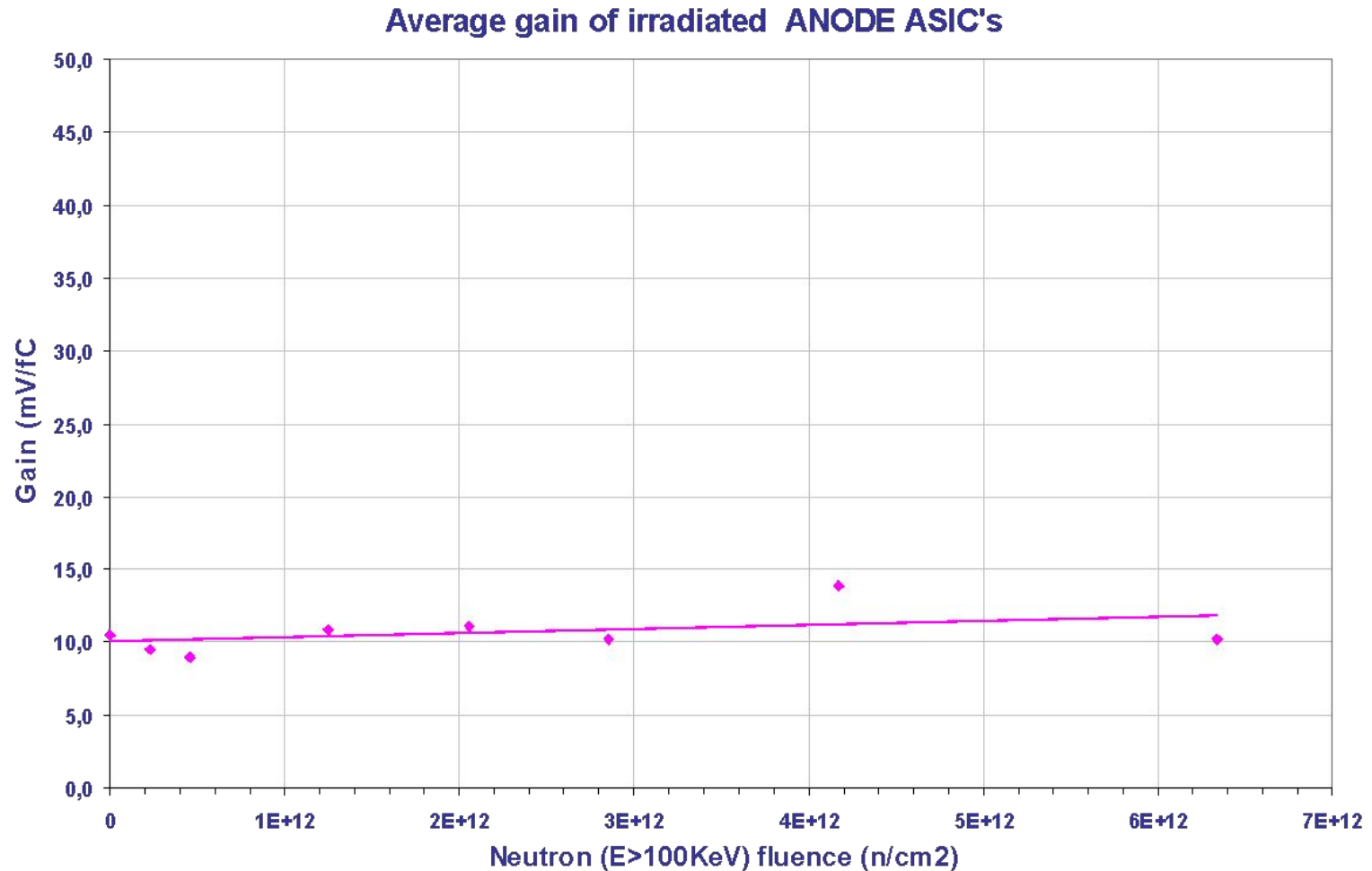
Average ME1/1 Anode ASIC output pulse width



Зависимость длительности выходного импульса от интегрального потока нейтронов

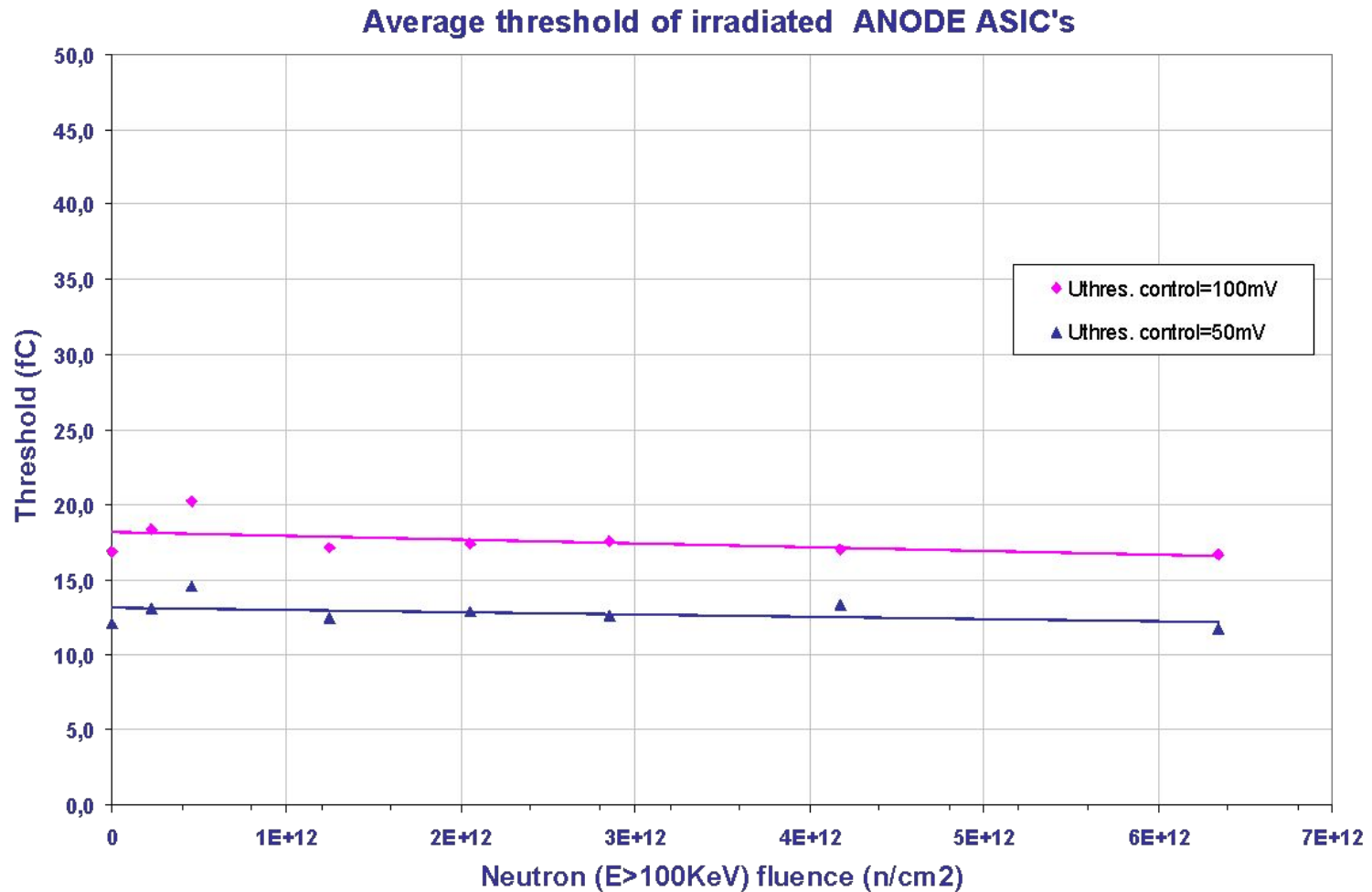


# Результаты радиационных испытаний



Зависимость среднего значения коэффициента преобразования усилителя от интегрального потока нейтронов

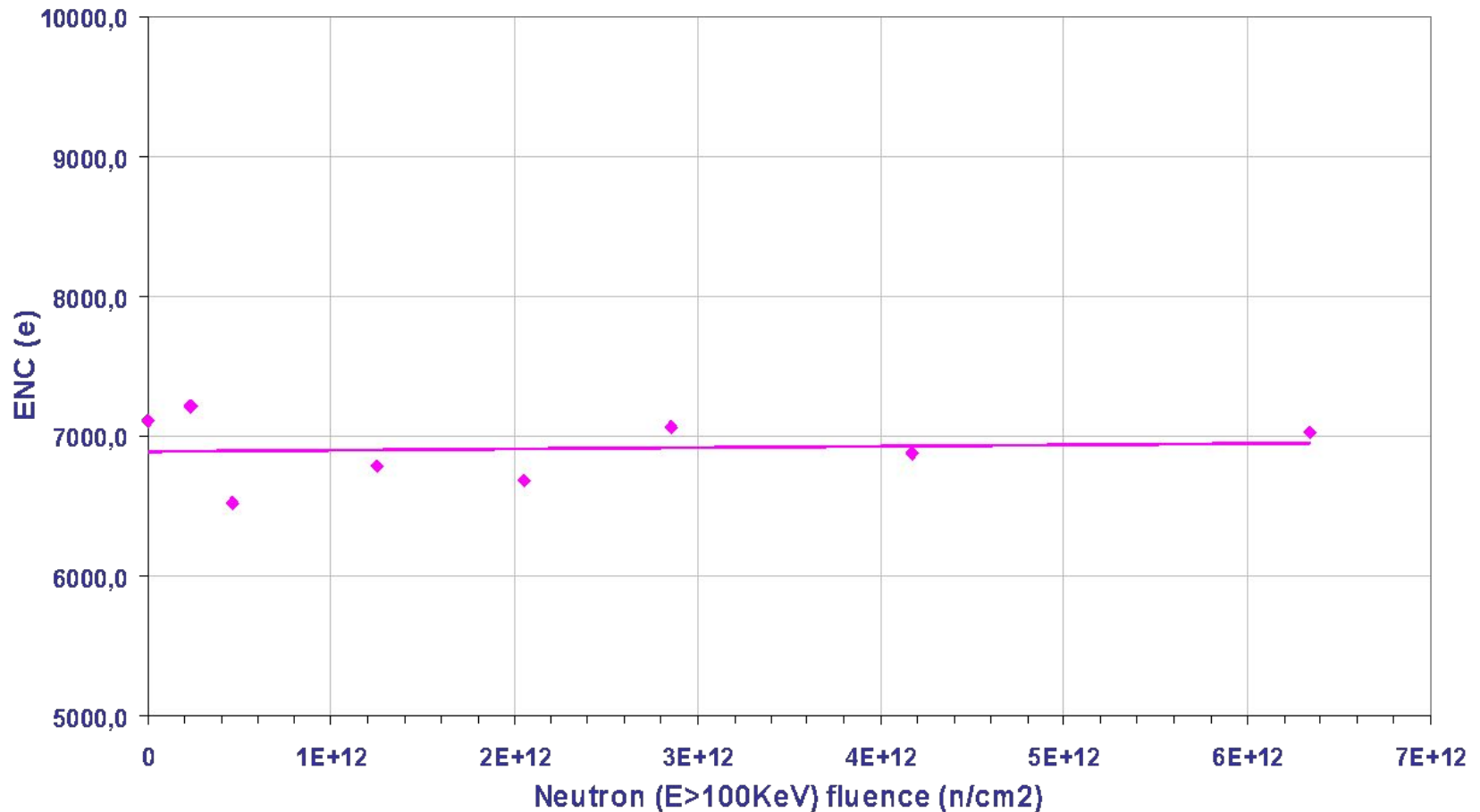
# Результаты радиационных испытаний



Зависимость порога срабатывания дискриминатора от интегрального потока нейтронов

# Результаты радиационных испытаний

Average ENC of irradiated ANODE ASIC's

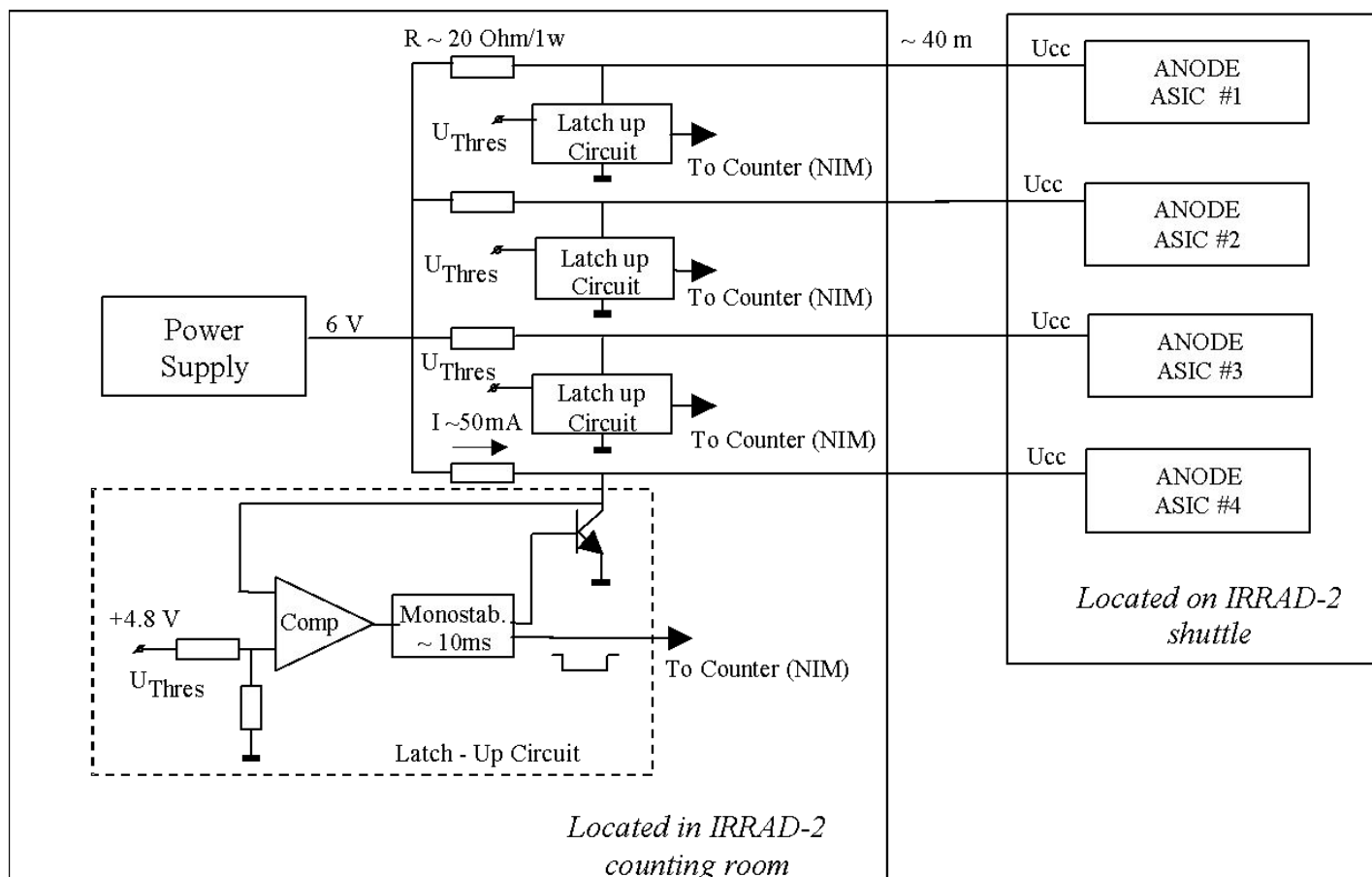


Зависимость шумов от интегрального потока нейтронов

# Результаты радиационных испытаний

Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией  $E_n > 20$  МэВ

Схема проведения эксперимента



# Результаты радиационных испытаний

## Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией $E_n > 20$ МэВ Исследование эффекта «защелкивания» (*SEL*)

Назначение схемы - защита ИС по току. Порог компаратора подбирался таким образом, чтобы при превышении заданной величины тока источника питания ток потребления ИС ограничивался на время срабатывания одновибратора  $T \sim 10$  мс. Сигнал с выхода одновибратора подавался на счетчик, контролируемый в процессе облучения.

Результаты эксперимента показали **отсутствие эффекта «защелкивания»** (*SEL*), вплоть до интегрального потока нейтронов  $6 \cdot 10^{11}$  н/см<sup>2</sup> с энергией  $E_n > 20$  МэВ.



# Результаты радиационных испытаний

Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией  $E_n > 20$  МэВ

## Исследование кратковременных сбоев (*SEU*)

Регистрация событий проводилась с каждого канала облучаемой ИС в течение 5 часов. На рисунке представлена зависимость среднего значения сечения  $\sigma_{seu}$  для 4-х облученных ИС (32 канала) от величины интегрального потока нейтронов при значении порога дискриминатора, равного  $Tresh = 18$  фК (100 мВ).

$$\sigma_{seu} = N_{seu} / F_n,$$

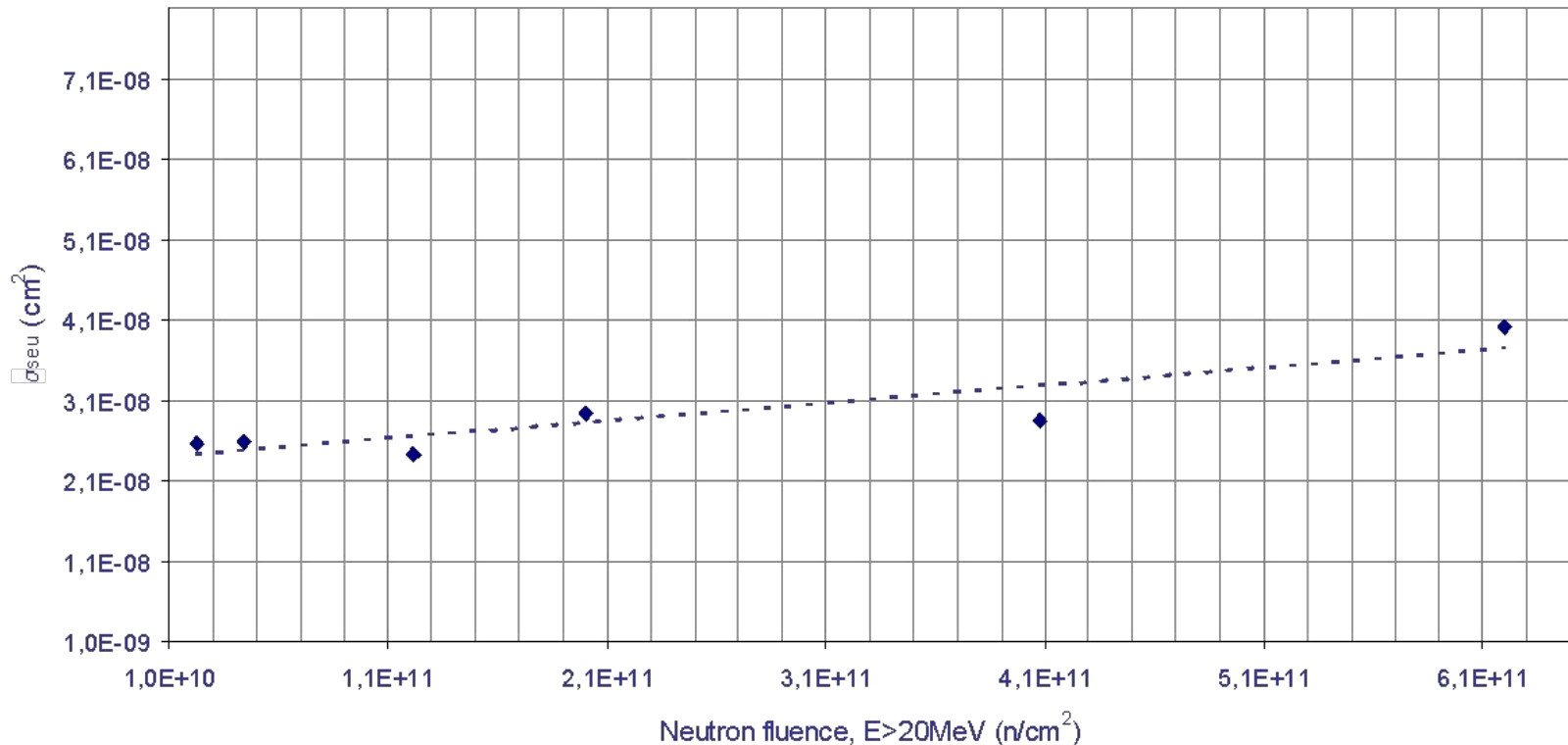
где  $N_{seu}$  - количество зарегистрированных *SEU*- событий,  
 $F_n$  - интегральный поток нейтронов.

# Результаты радиационных испытаний

Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией  $E_n > 20$  МэВ

Исследование кратковременных сбоев (*SEU*)

Mean value of SEU cross-section of 4 ANODE ASIC's as a function of neutron fluence

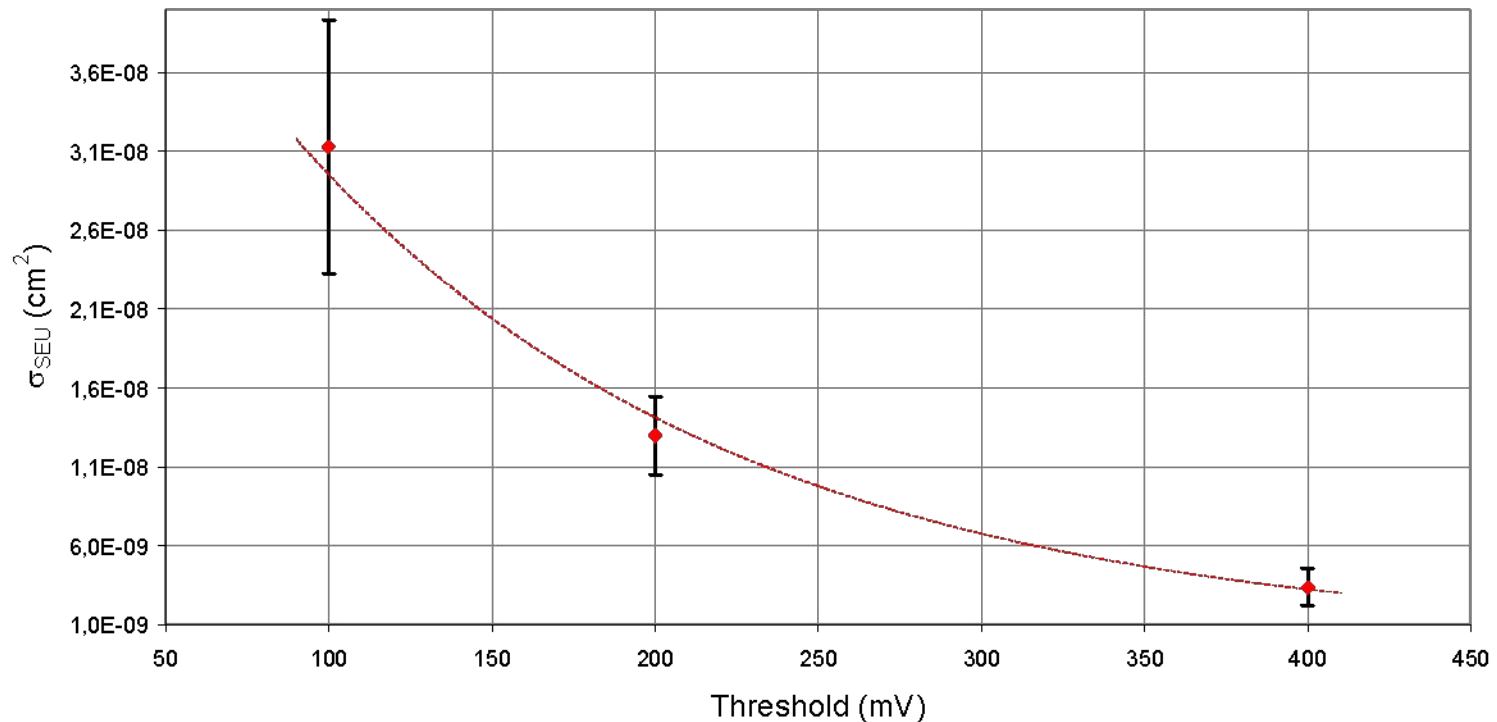


# Результаты радиационных испытаний

Исследование “эффектов одиночных событий” (*SEE*) при облучении ИС нейтронами с энергией  $E_n > 20$  МэВ

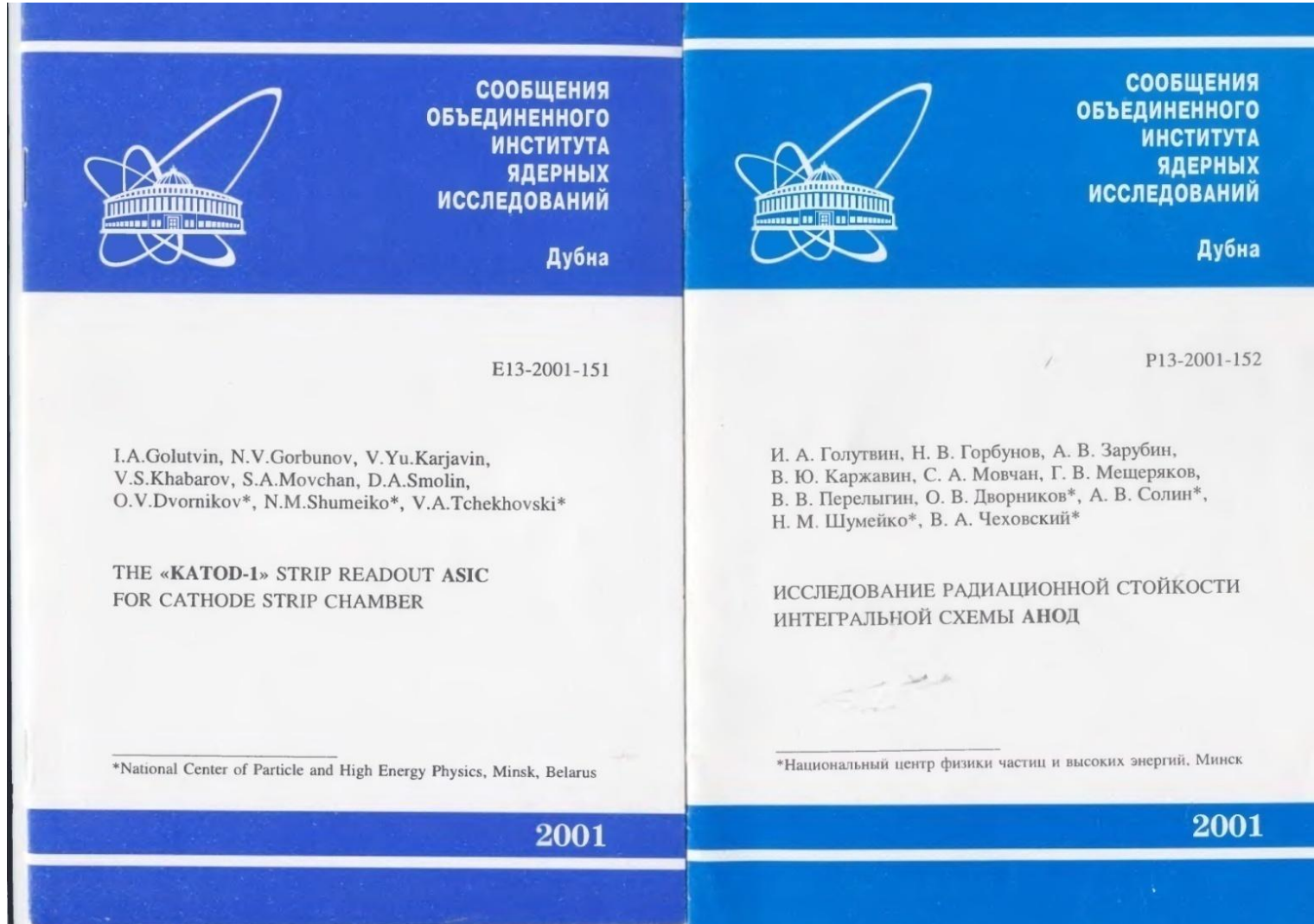
Зависимость среднего значения сечения *SEU*-эффекта от напряжения управления порогом дискриминатора

SEU cross-section of ANODE ASIC as a function of discriminator threshold



# Результаты радиационных испытаний

Подробная методика и результаты опубликованы



# Основные направления работ

**Основные направления работ при создании радиационно-стойких микросхем:**

- **разработка комбинированных моделей, адекватно описывающих радиационное изменение параметров интегральных элементов;**
- **схемотехнический синтез аналоговых ИС с минимальным изменением характеристик при воздействии проникающей радиации;**
- **совершенствование методик радиационных испытаний.**

# Подход к проектированию радиационно-стойких микросхем

При проектировании радиационно-стойких микросхем целесообразно применение следующего подхода:

1. Выявление параметров моделей интегральных элементов, оказывающих наиболее сильное влияние на характеристики аналоговых микросхем.
2. Определение взаимосвязи параметров моделей с конструктивно-технологическими параметрами типовой структуры.
3. Разработка соотношений, связывающих параметры моделей и излучения (вид излучения, энергия, поглощенная доза, интегральный поток частиц) с помощью эмпирических коэффициентов.

# Подход к проектированию радиационно-стойких микросхем

При проектировании радиационно-стойких микросхем рекомендуется применение следующего подхода:

4. Разработка методов идентификации основных параметров моделей из измерений и методик радиационного воздействия на элементы и аналоговые компоненты в режимах близких к рабочим.
5. Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) облученных интегральных элементов, идентификация основных параметров моделей, корректировка эмпирических коэффициентов для выбранного технологического маршрута изготовления микросхем.



# Подход к проектированию радиационно-стойких микросхем

При проектировании радиационно-стойких микросхем рекомендуется применение следующего подхода:

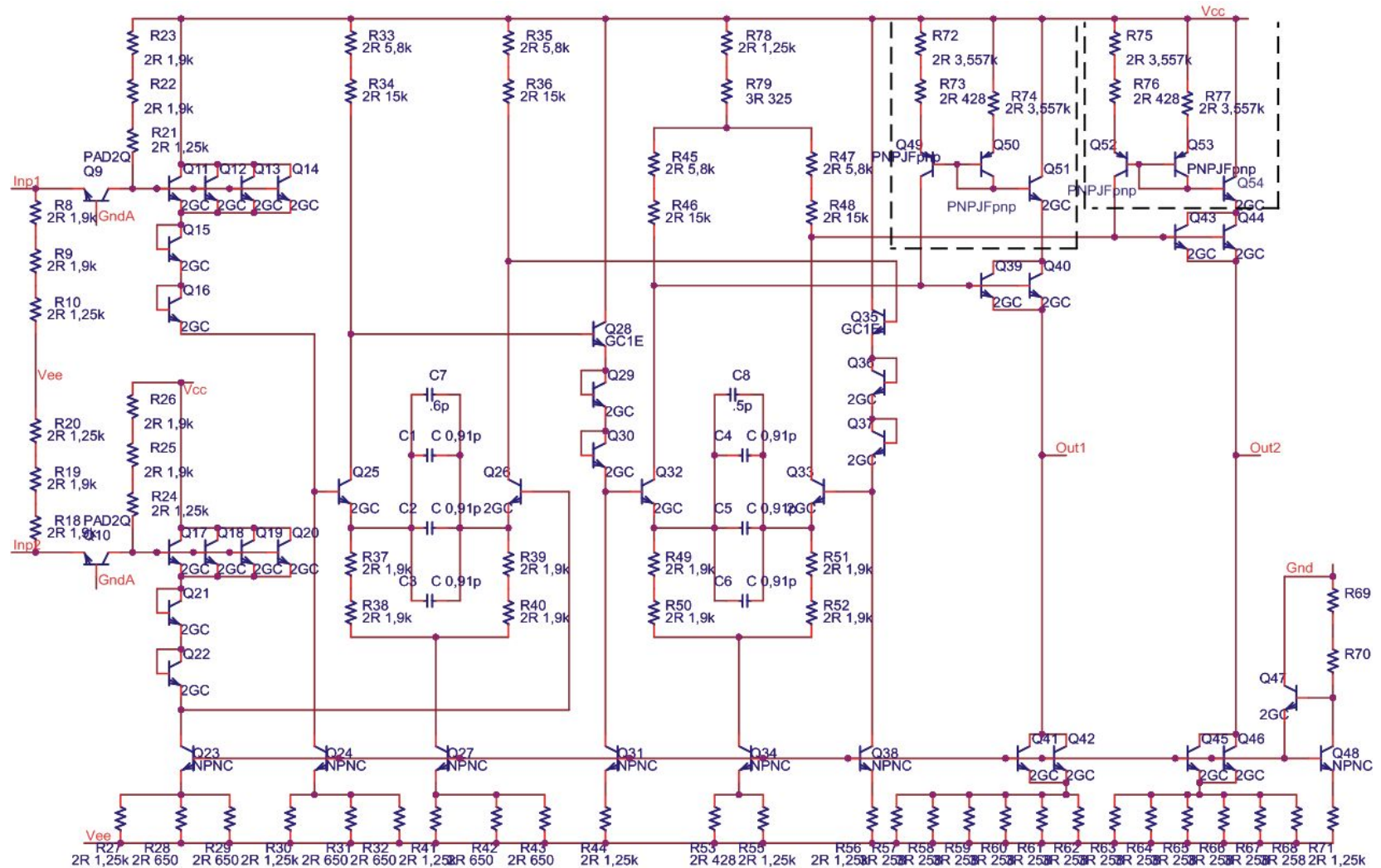
6. Схемотехническое моделирование аналоговых ИС, выявление каскадов наиболее чувствительных к воздействию ПР и их модернизация (введение цепей компенсации входных токов, стабилизация режима работы, уменьшение изменения напряжения смещения нуля, применение новых методов построения сложно-функциональных аналоговых компонентов).
7. Выявление интегральных элементов критически чувствительных к воздействию ПР, их топологическая модернизация или замена на радиационно-стойкие.

# Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС

Подход к проектированию аналоговых ИС со средним уровнем радиационной стойкости:

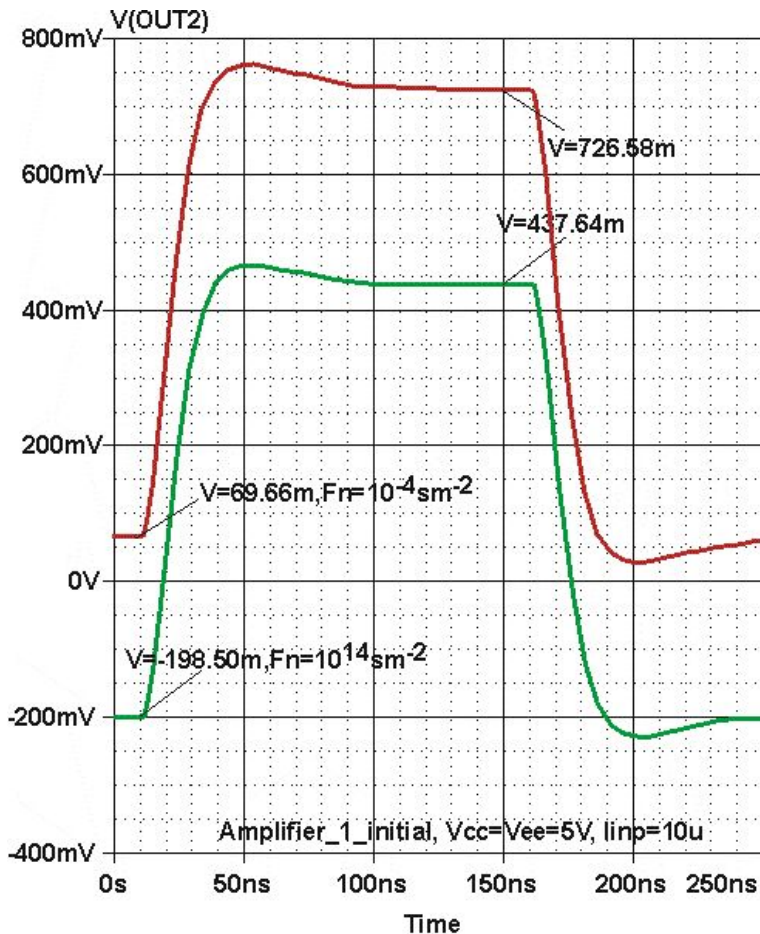
- использование дифференциальной структуры ИС;
- увеличение плотности эмиттерного тока;
- использование горизонтальных *p-n-p*-транзисторов только в источниках тока или в схемах с общей базой (ОБ);
- формирование резисторов на сильнолегированных полупроводниковых слоях;
- схемотехническая модернизация каскадов (введение цепей компенсации входных токов, стабилизация режима работы, уменьшение изменения напряжения смещения нуля).

# Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС

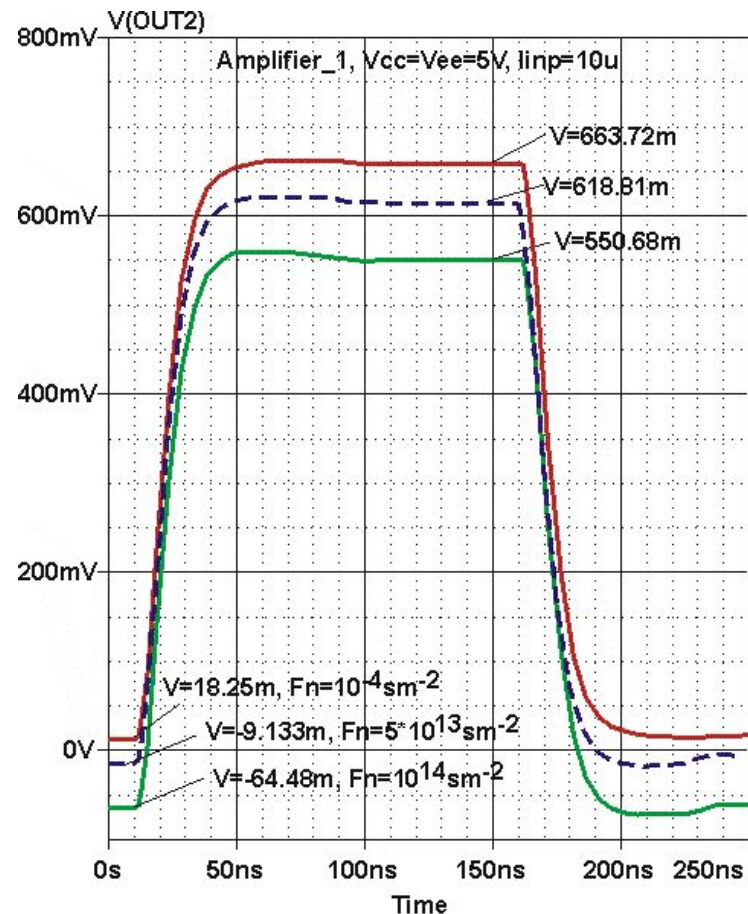


Электрическая схема трансрезистивного усилителя **Amplifier\_1**

# Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



до модернизации

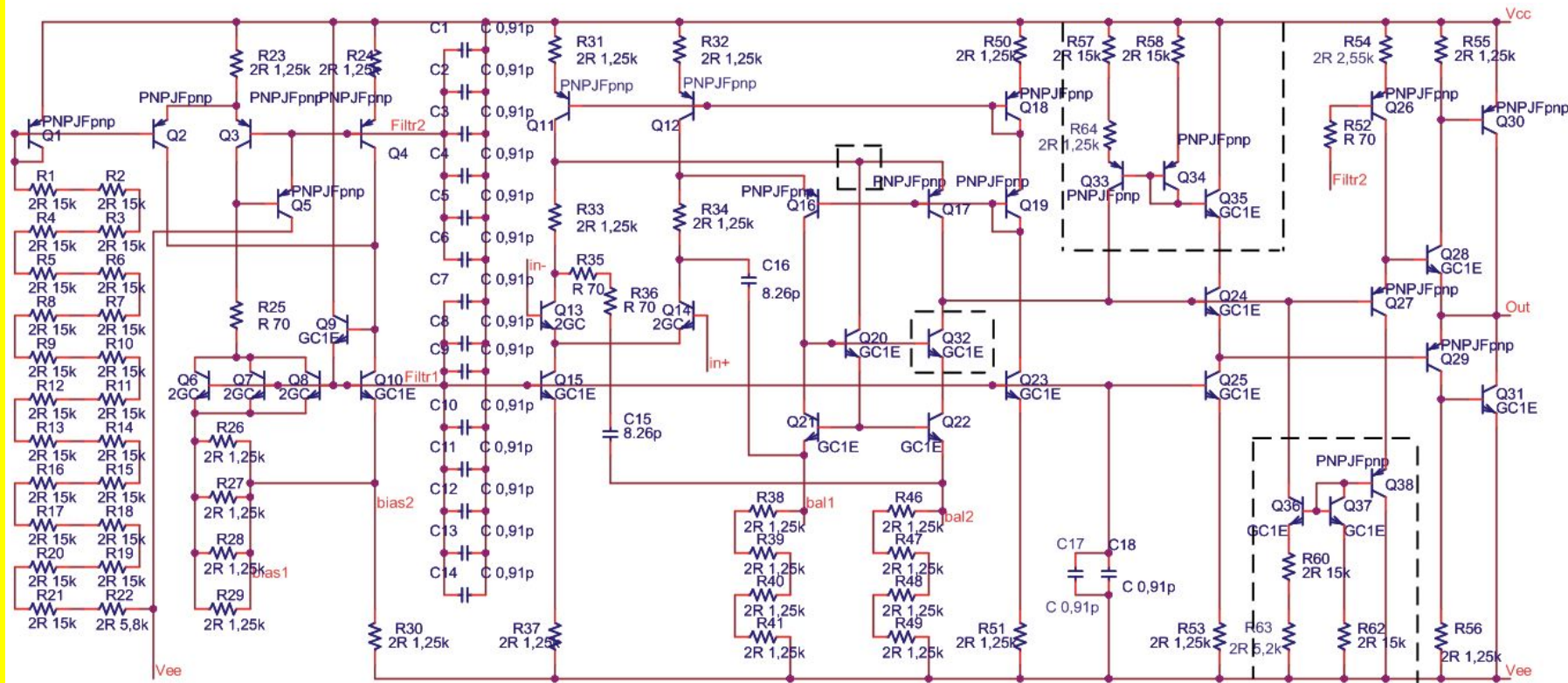


после модернизации

Напряжение на выходе усилителя *Amplifier\_1* до и после воздействия потока нейтронов

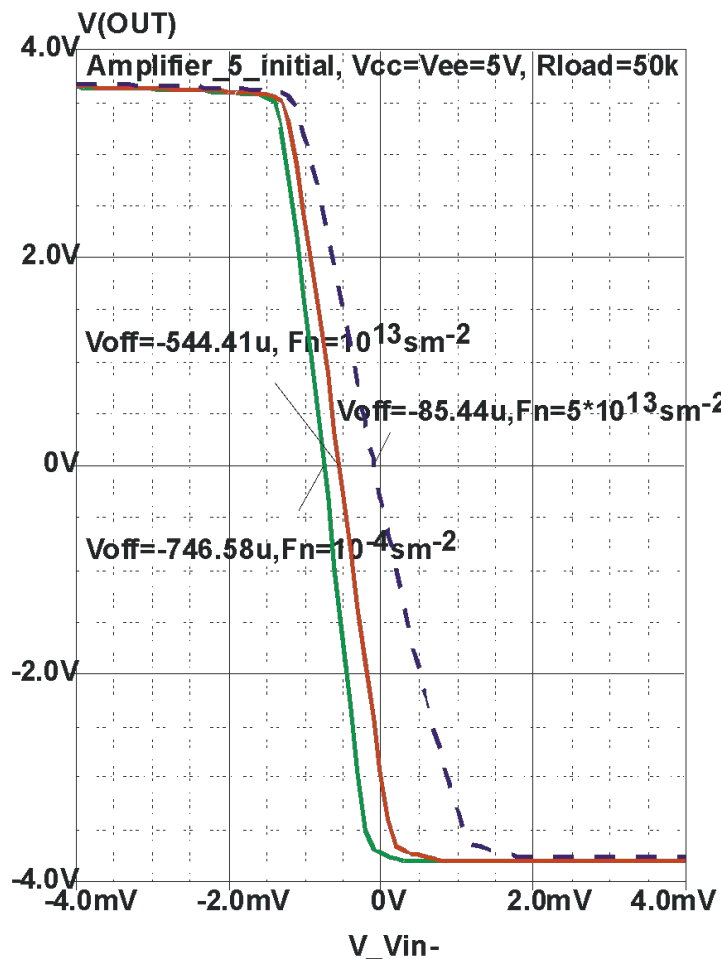


# Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС

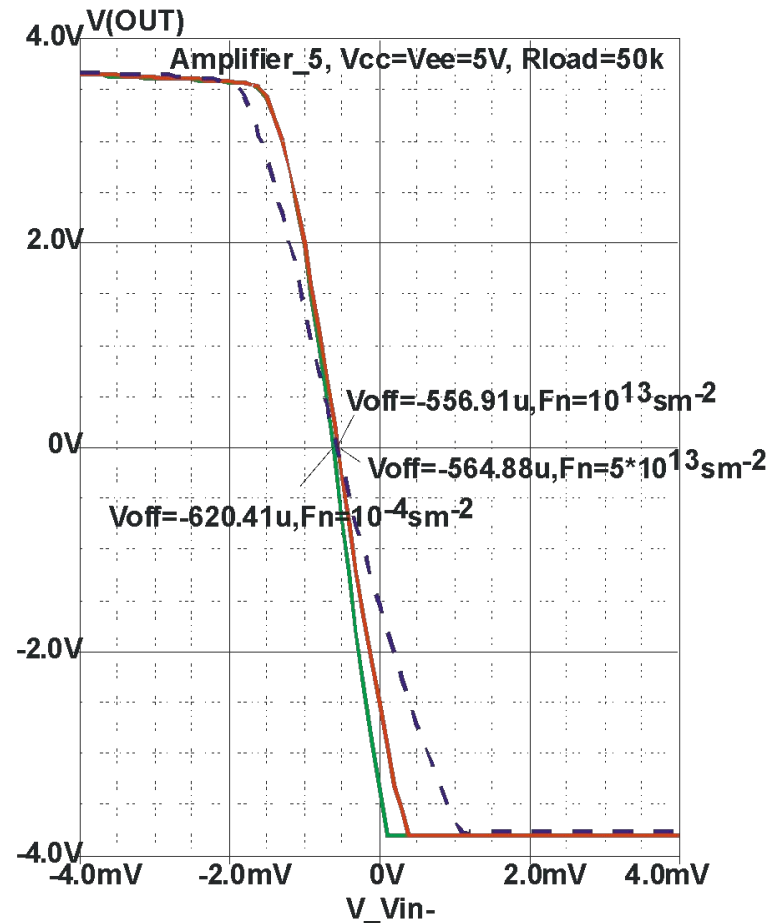


Электрическая схема программируемого операционного усилителя *Amplifier\_5*

# Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



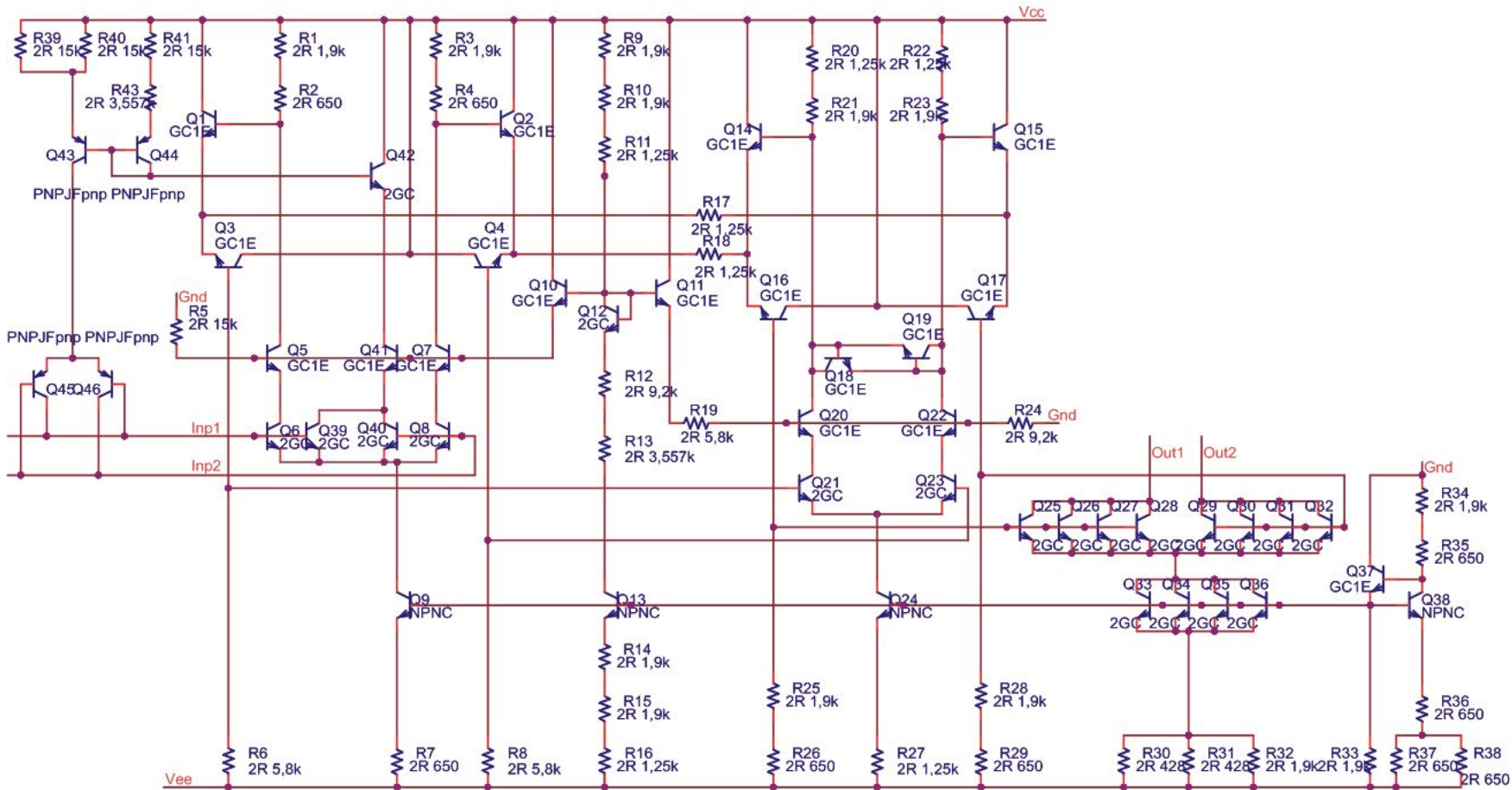
до модернизации



после модернизации

Передаточная характеристика усилителя *Amplifier\_5* до и после воздействия потока нейтронов

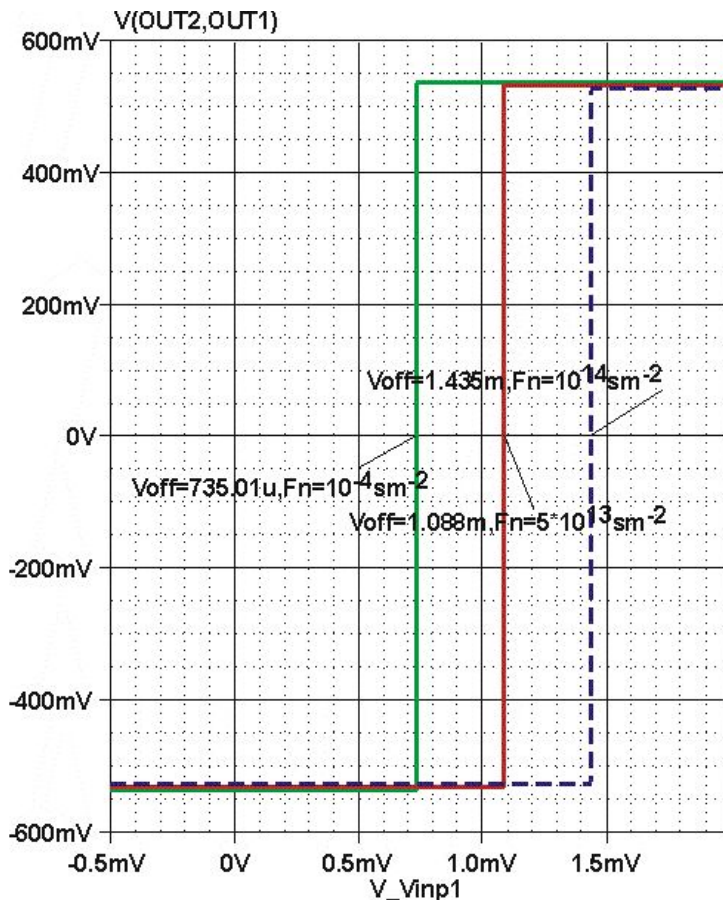
# Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



Электрическая схема компаратора *Comparator\_1*

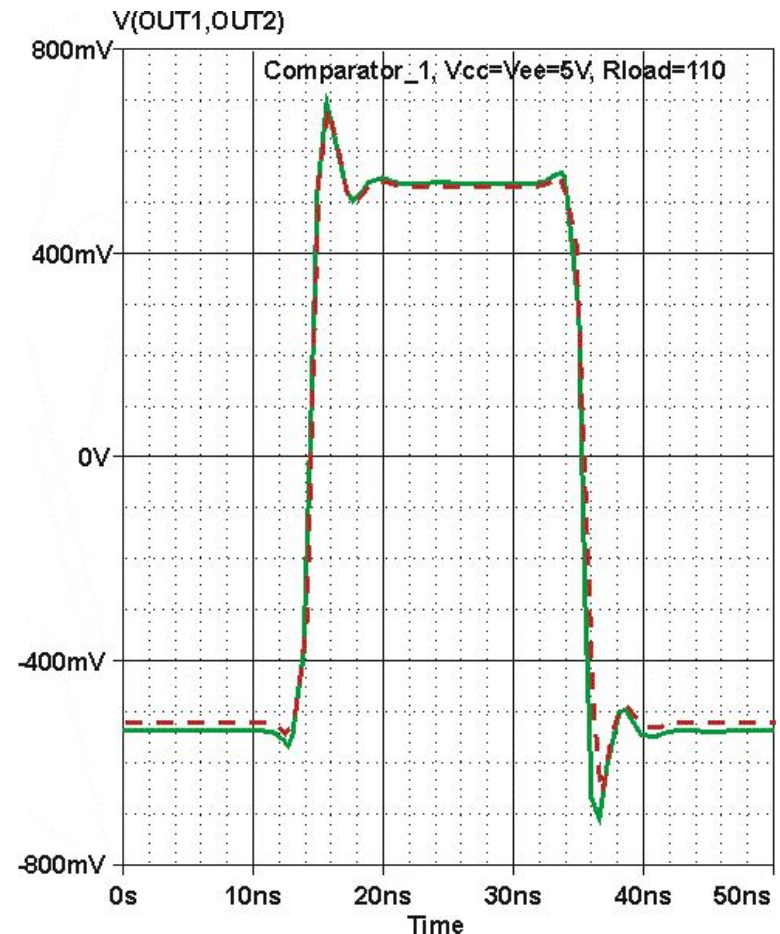


# Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



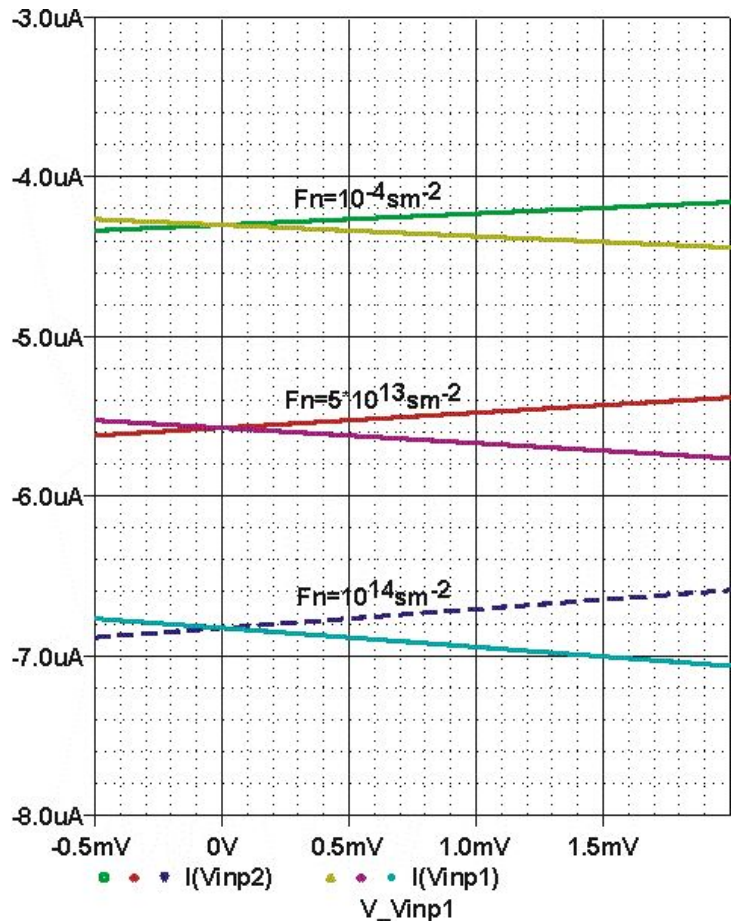
Передаточная характеристика компаратора *Comparator\_1* до и после воздействия потока нейтронов

ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн»

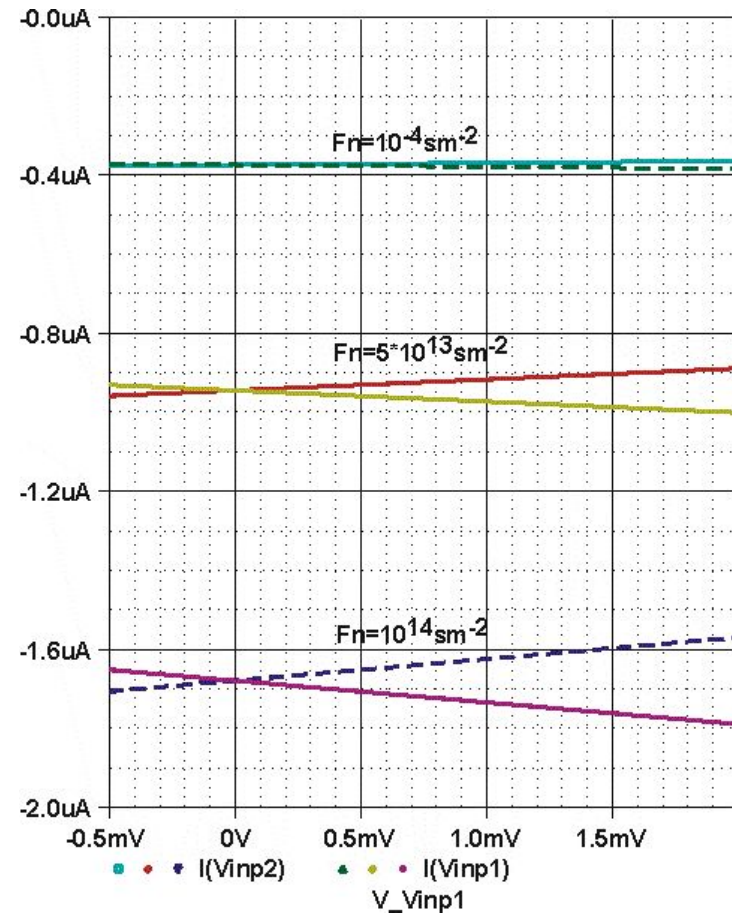


Выходное напряжение компаратора *Comparator\_1* до и после (штриховая) воздействия потока нейтронов  $F_n = 10^{14} \text{sm}^{-2}$

# Схемотехнический синтез аналоговых радиационно-стойких ИС



до модернизации



после модернизации

Входные токи компаратора *Comparator\_1* до и после воздействия потока нейтронов

# Особенности ОУ с высоким уровнем радиационной стойкости

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)

Требования к схемотехнике ОУ с высоким уровнем радиационной стойкости :

1. В качестве критерия качества при схемотехнической синтезе и оптимизации следует выбирать минимальное изменение определяющего параметра ИС при радиационном воздействии (например, для быстродействующего ОУ – скорости нарастания выходного напряжения, для прецизионного – напряжения смещения или уровня шумов).

2. Не применять горизонтальные  $Lp-n-p$ -транзисторы для усиления, заменять их  $p$ -ПТП.

3. Источники вытекающего тока целесообразно выполнять на  $p$ -ПТП, а втекающего – на  $n-p-n$ -транзисторах.

4. Для двухкаскадного ОУ входной дифференциальный каскад рекомендуется выполнить на:

-  $n-p-n$ -транзисторах с источником втекающего тока;

- на  $p$ -ПТП с источником вытекающего тока;

- комбинации  $n-p-n$ - и  $p$ -ПТП с перекрестными связями (ток дифференциального каскада определяется напряжением затвор-исток  $p$ -ПТП).

# Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)

5. Промежуточный каскад может быть реализован на:

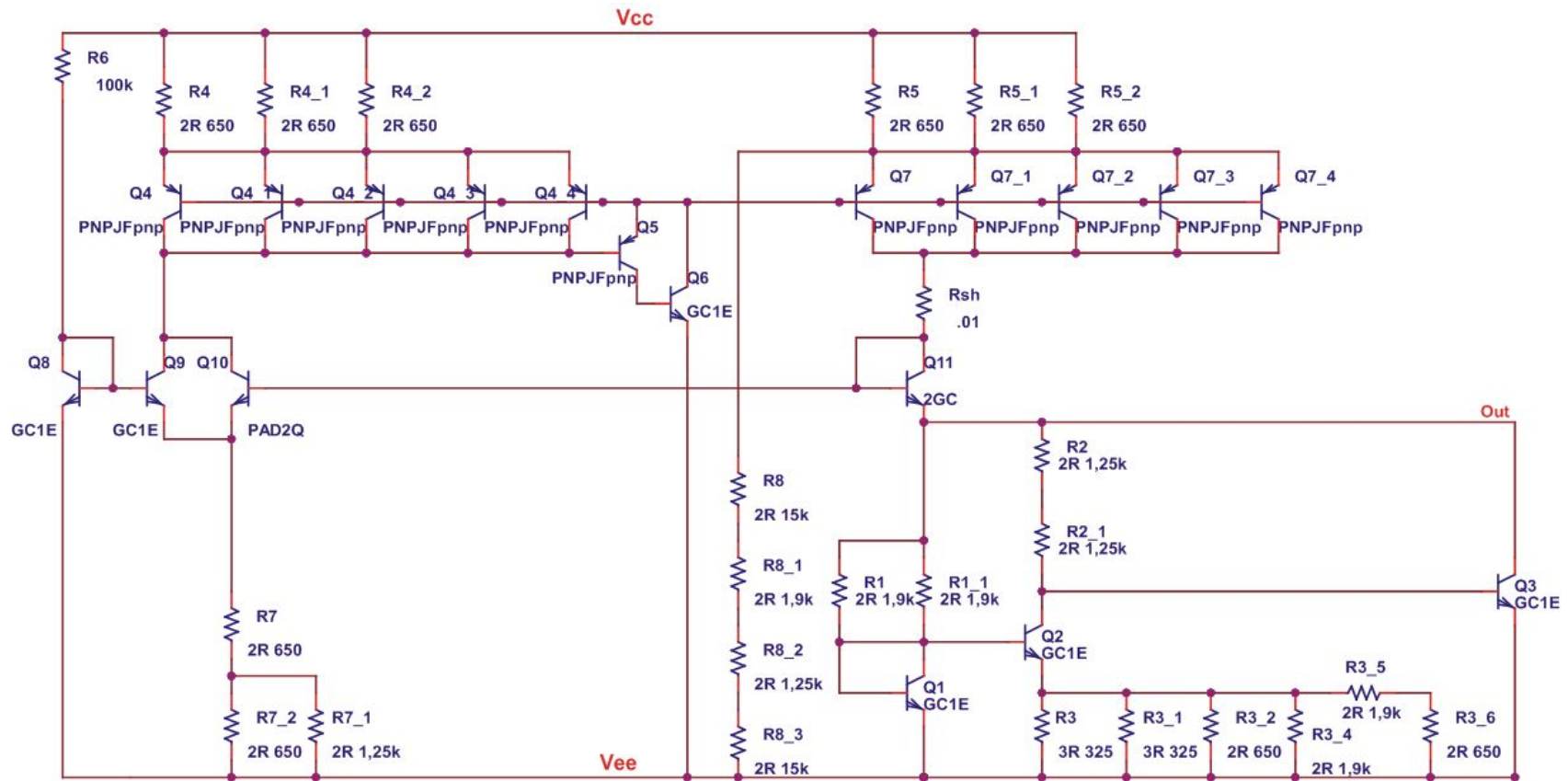
- $n$ - $p$ - $n$ -транзисторах, если дифференциальный каскад выполнен с использованием  $p$ -ПТП;
- симметричном "перегнутом каскаде" с использованием  $p$ -ПТП;
- на несимметричном "перегнутом каскаде" с использованием  $p$ -ПТП.

6. Выходной каскад должен быть выполнен по схеме двухтактного повторителя напряжения с использованием комбинации  $p$ -ПТП и  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторов.

7. При проектировании программируемого ОУ следует выбирать схемную конфигурацию с минимальным количеством источников тока, задающих статический режим, причем желательно, чтобы все источники тока были либо втекающего либо вытекающего тока. Программируемые источники вытекающего тока целесообразно сформировать на  $p$ -ПТП или  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторах, однако необходимо предусмотреть компенсацию деградации их усиления при радиационном воздействии, например, использовать отрицательные обратные связи для стабилизации тока коллектора  $p$ - $n$ - $p$ -транзистора.

# Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)

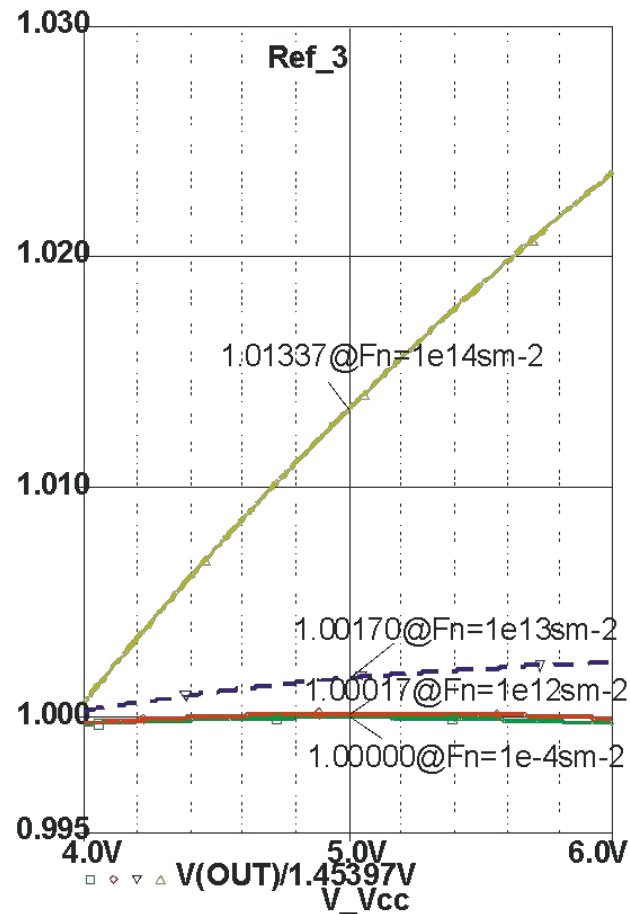
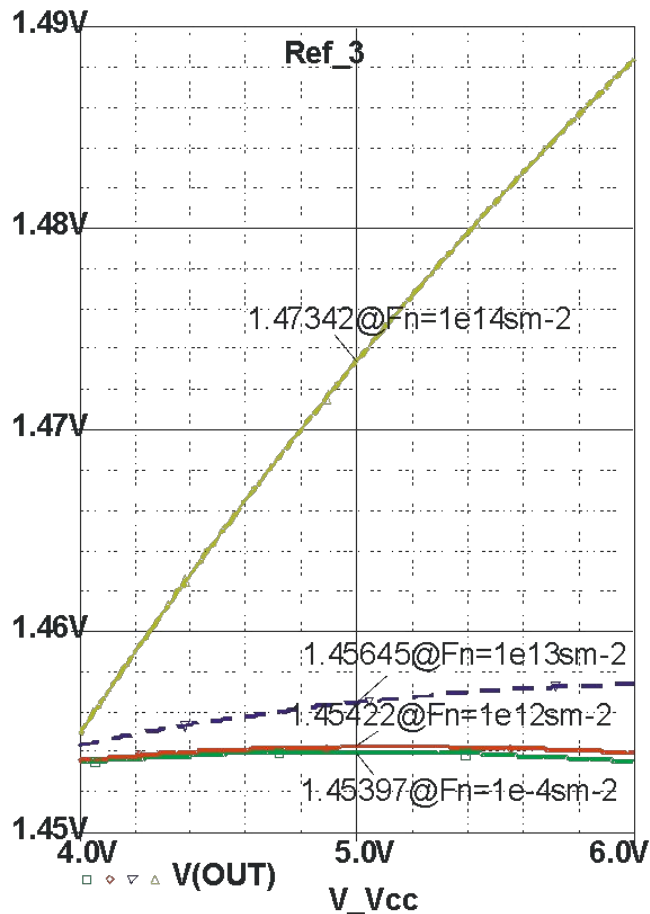


Электрическая схема источника опорного напряжения *ref\_3*



# Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

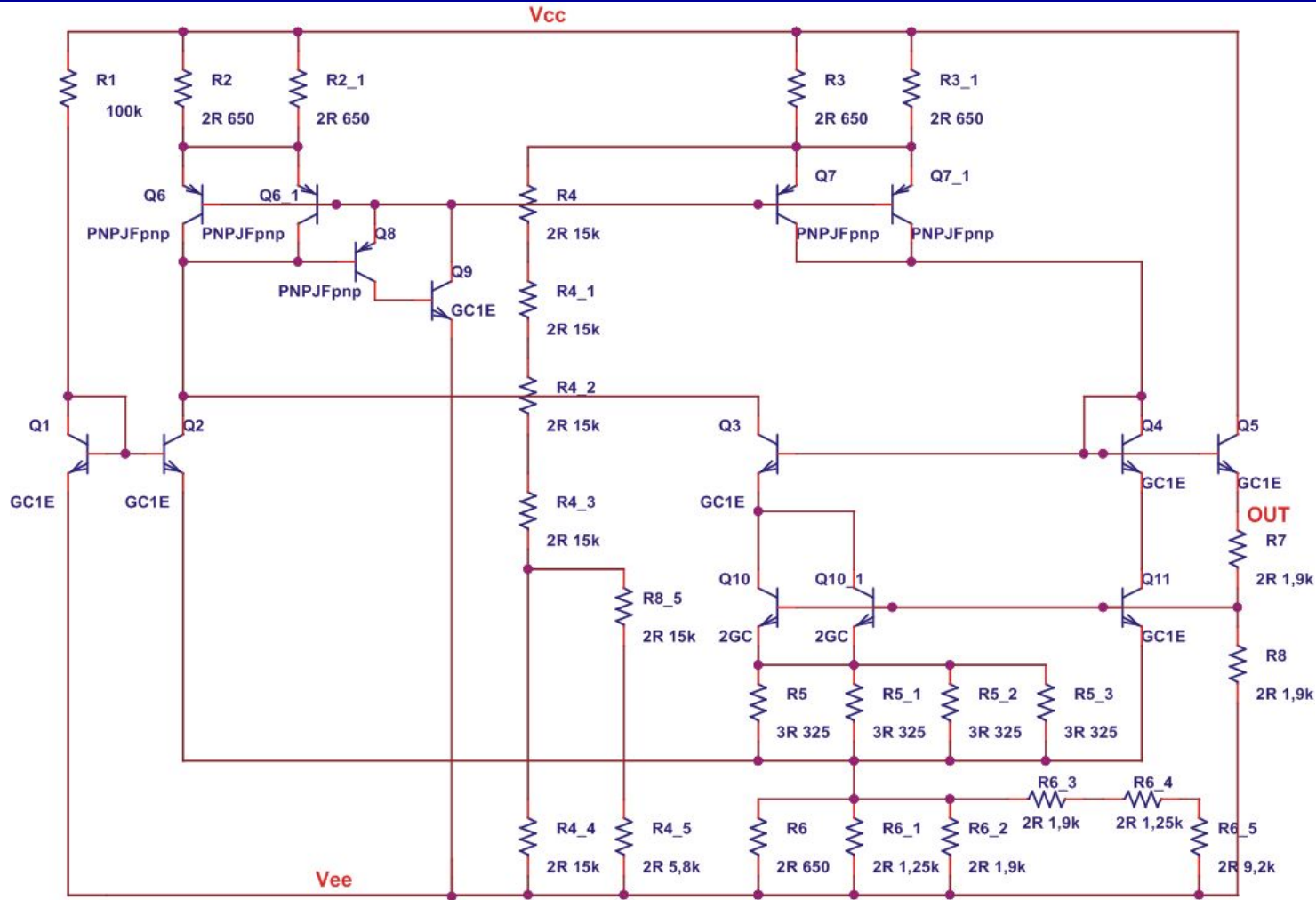
(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Выходное и нормированное выходное напряжение  $ref\_3$  до и после воздействия потока нейтронов

# Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)

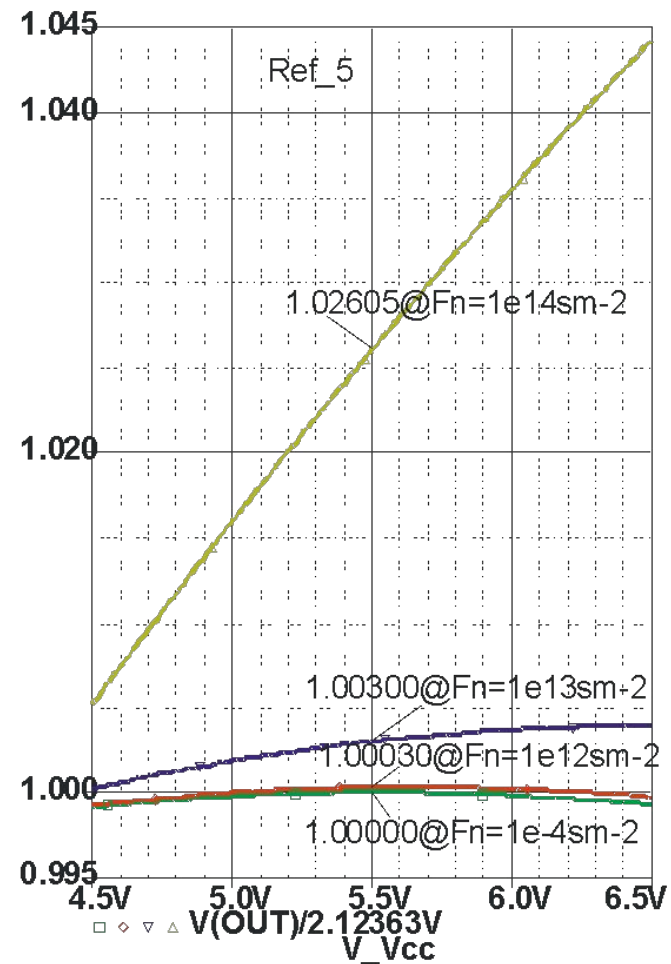
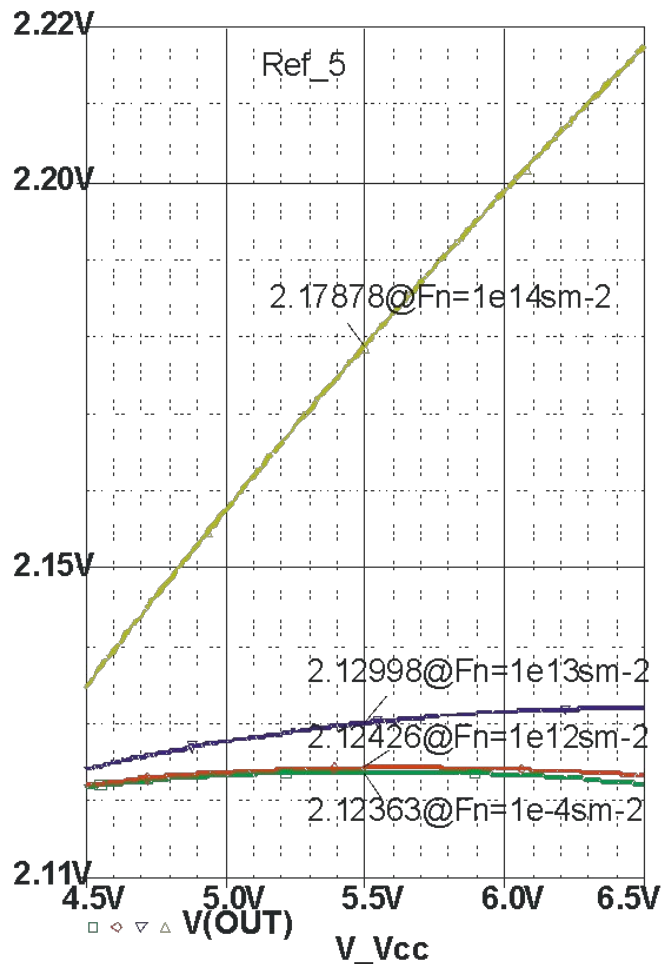


Электрическая схема источника опорного напряжения *ref\_5*



# Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

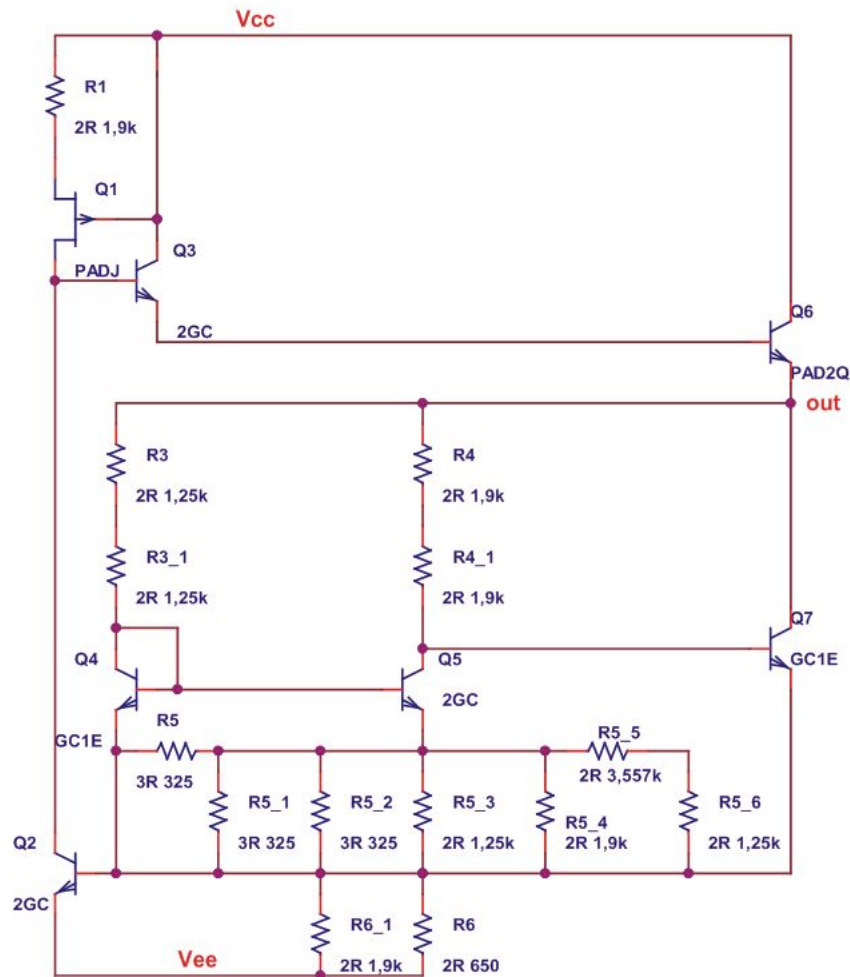
(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Выходное и нормированное выходное напряжение  $ref\_5$  до и после воздействия потока нейтронов

# Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

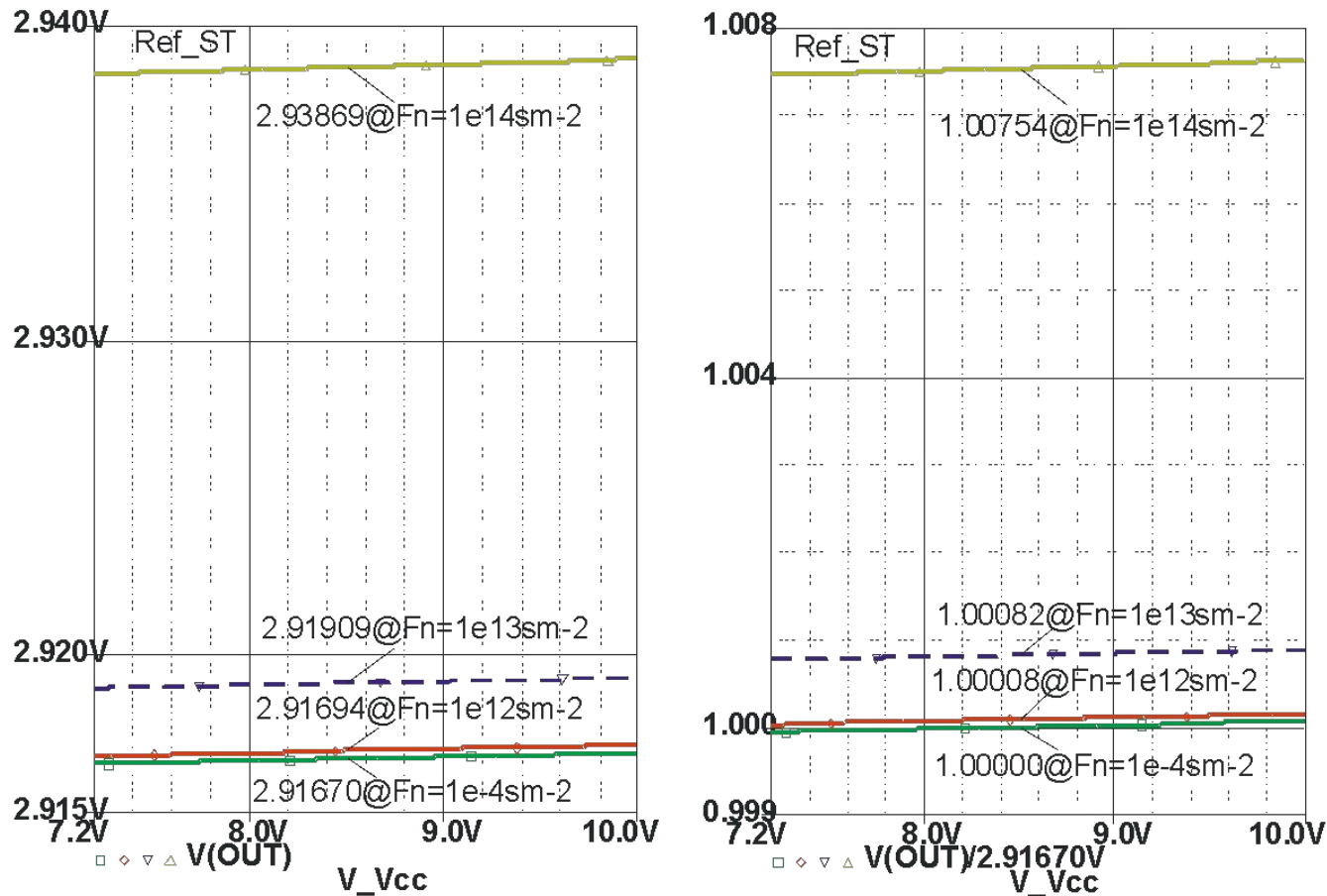
(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Электрическая схема источника опорного напряжения *ref\_ST*

# Особенности ИС с высоким уровнем радиационной стойкости

(раздел подготовлен совместно с Старченко Е.И.)



Выходное и нормированное выходное напряжение  $ref\_ST$  до и после воздействия потока нейтронов

# Заключение

1. Для обеспечения производства радиационно-стойких аналоговых микросхем выполнен ряд работ, в том числе:

- модернизирован технологический маршрут изготовления БиПТП ИС;
- создан базовый матричный кристалл «АБМК\_1\_3»;
- проведены радиационные испытания тестовых транзисторов, резисторов, микросхемы «Тетрод-Б», изготовленных по БиПТП-технологии, на установке ИБР-2, ОИЯИ (г. Дубна, РФ); ИС 8-ми канального усилителя-формирователя-дискриминатора «АНОД» - на установке IRRAD2, CERN (г. Женева, Швейцария).

2. Радиационные испытания позволили установить, что:

- *n-p-n*, *p*-ПТП сохраняют свою работоспособность при поглощенной дозе гамма-излучения 1 Мрад и потоке нейтронов  $2 \cdot 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>, а горизонтальные *p-n-p*- транзисторы - при потоке нейтронов до  $9 \cdot 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>;
- примененные конструктивно-схемотехнические решения обеспечили отсутствие в ИС «АНОД» эффекта «защелкивания», вплоть до интегрального потока нейтронов  $6 \cdot 10^{11}$  н/см<sup>2</sup> с энергией  $E_n > 20$  МэВ.

# Заключение

3. Сформулирован и реализован комплексный подход к проектированию радиационно-стойких микросхем:

- описано влияние проникающей радиации на характеристики интегральных элементов в “*Spice*-подобных” программах, которое проверено при моделировании ВАХ элементов «АБМК\_1\_3»;
- разработаны требования к синтезу аналоговых ИС со средним уровнем и ОУ с высоким уровнем радиационной стойкости;
- уточнены методики дистанционного контроля работоспособности аналоговых ИС, создана экспериментальная установка для измерений ИС при радиационном облучении и методика регистрации одиночных событий, позволяющая отдельно зафиксировать кратковременные сбои и «защелкивания».

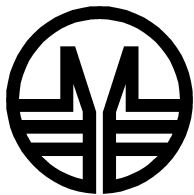
4. Для элементов «АБМК\_1\_3» спроектированы ИС трансрезистивного и операционного усилителей, компаратора, источников опорного напряжения малочувствительные к воздействию потока нейтронов величиной до  $10^{13}$  см<sup>-2</sup>.

# Особенности радиационных испытаний аналоговых микросхем

**О.В. Дворников**

**д.т.н., доц. (ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн",  
г. Минск, Беларусь)**

**[oleg\\_dvornikov@tut.by](mailto:oleg_dvornikov@tut.by)**



# Совершенствование методик радиационных испытаний

## Контроль функционирования ОУ при облучении

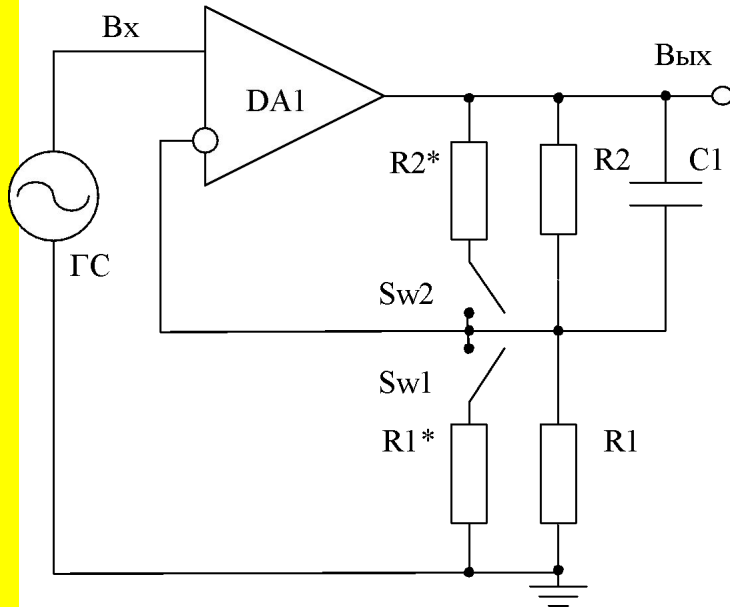
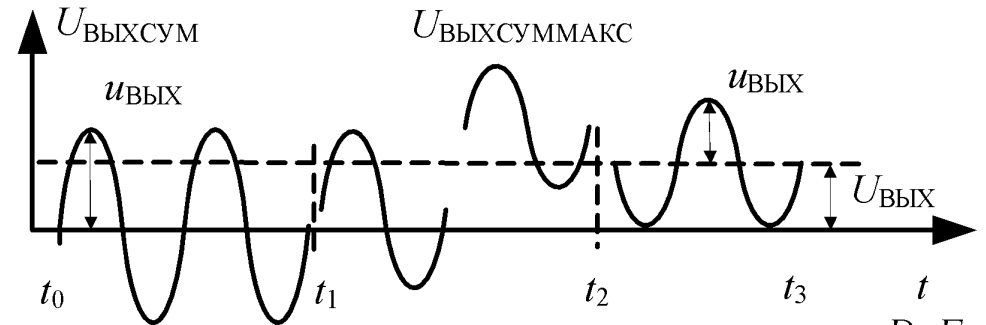


Схема включения ОУ в режиме усиления напряжения



Возможное изменение выходного сигнала ОУ при радиационном воздействии и  $U_{ВХ} = 0$ ,  $D, F$

$$u_{ВХ} = const$$

$$U_{ВЫХ} \approx U_{СМ} \frac{R_2}{R_1} + I_{ВХ} R_2,$$

$$u_{ВХ} \approx u_{ВЫХ} \left( \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{K_{ОУ}} \right),$$

$$\frac{R_1 K_{ОУ2}}{R_2} = \frac{1}{\frac{u_{ВЫХ1}}{u_{ВЫХ2}} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 K_{ОУ1}} \right) - 1}.$$



# Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

## Контроль функционирования компаратора при облучении

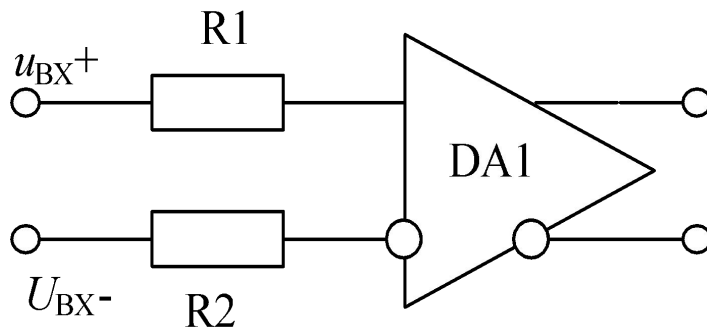
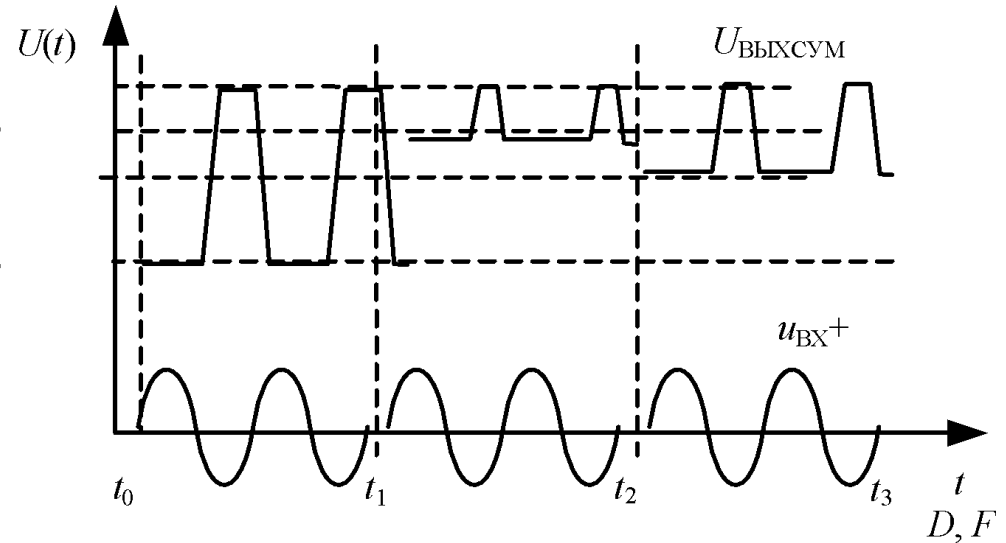


Схема включения компаратора напряжения



Возможное изменение выходного сигнала компаратора при радиационном воздействии

# Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

## Регистрация одиночных событий

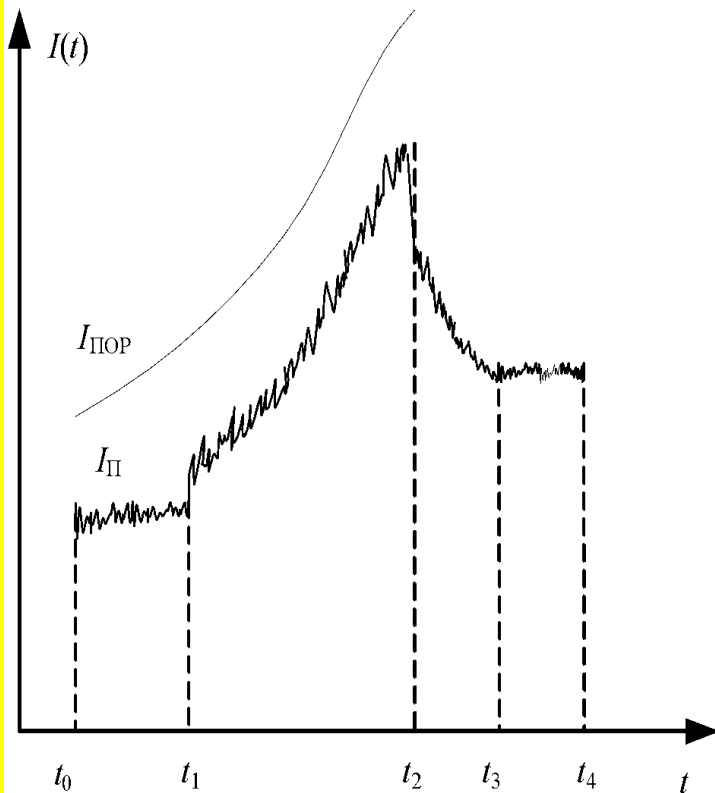
При регистрации одиночных событий (*SEE*-эффекты) необходимо различать тиристорный эффект (*SEL*) и кратковременные сбои (*SEU*).

При *SEU*-эффекте на выходе аналогового устройства появляется «ложный» кратковременный импульс напряжения и происходит изменение тока потребления, но ИС не теряет работоспособность. Для регистрации *SEU*-эффекта рекомендуется считать импульсы выходного напряжения аналогового устройства при постоянном напряжении на его входах.

Инженерный критерий *SEU*-эффекта: *SEU*-событие происходит, если при входном постоянном напряжении на выходе аналогового устройства появляется кратковременный импульс с размахом более 10% типового выходного сигнала.

# Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)



Предполагаемое изменение тока потребления  $I_{\text{П}}$  и следящего порога  $I_{\text{ПОР}}$  при радиационном воздействии

ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн"

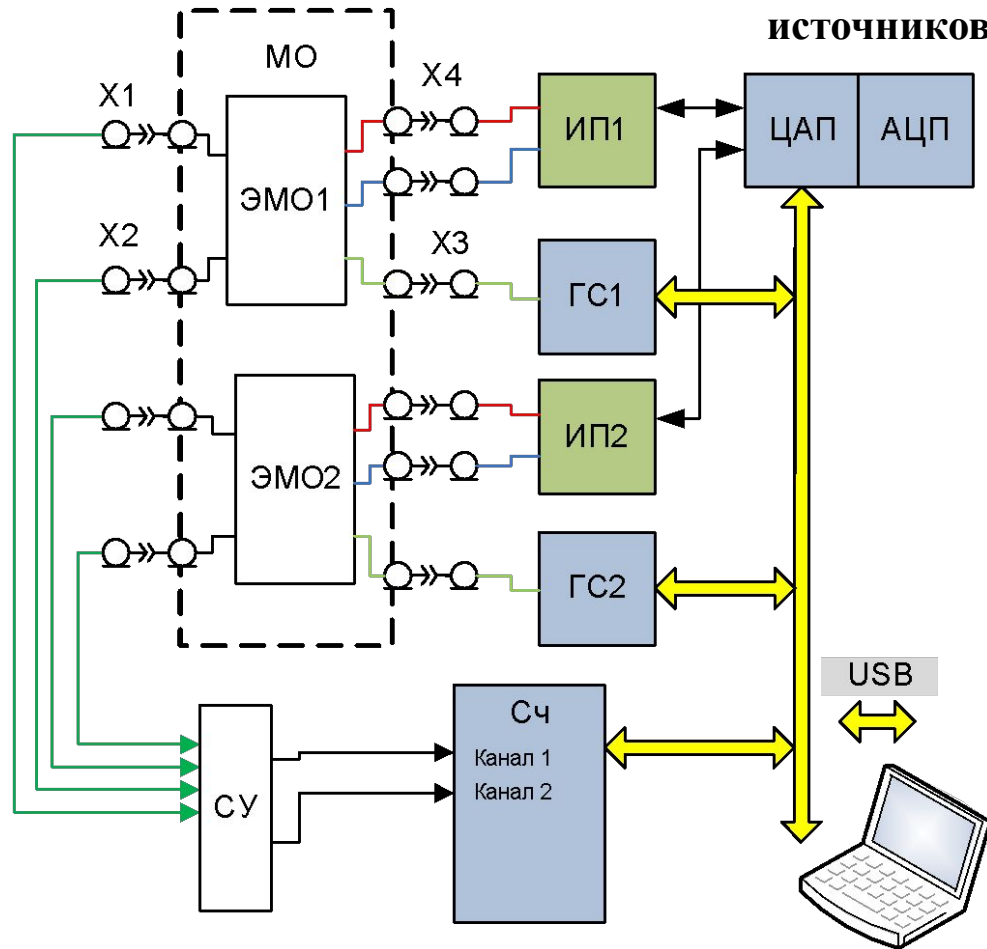
*SEL*-эффект вызывает значительное и продолжительное увеличение тока потребления и прекращение функционирования ИС, которое может быть устранено только при выключении и повторном включении источников напряжения питания.

При регистрации *SEL*-событий рекомендуется использовать следящий порог: за оговоренное количество периодов входного синусоидального напряжения определяется среднеквадратическое значение тока потребления ( $I_{\text{ПСКЗ}}$ ) и устанавливается величина порогового тока ( $I_{\text{ПОР}}$ ), при превышении которого источники напряжения питания автоматически отключаются и находятся в выключенном состоянии до повторного включения (перезапуска). Каждый перезапуск источников напряжения питания рассматривается как *SEL*-событие.  $I_{\text{ПОР}} = (1,5...2)I_{\text{ПСКЗ}}$ .

# Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Блок-схема установки для измерений во время облучения и регистрации одиночных событий при использовании радионуклидных (не импульсных)



МО - Модуль основной

ЭМО – электронный модуль с образцом

СУ - согласующее устройство

ГС – генератор сигналов произвольной формы

ИП – источник питающих уровней

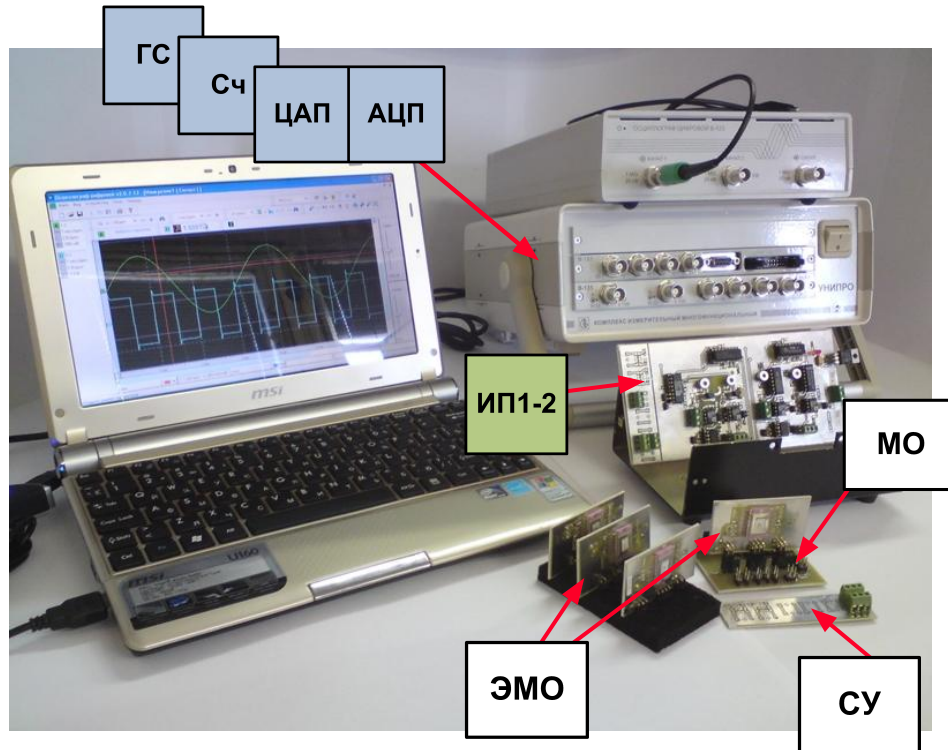
Сч – счетчик импульсов

X – электрические разъемы

# Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Установка для измерений во время облучения и регистрации одиночных событий



*Стандартное оборудование:*

Осциллограф В-423.

Генератор сигналов произвольной формы В-332 и аналого-цифровой порт В-381 в составе измерительного многофункционального комплекса «УНИПРО»

*Специализированное оборудование:*

ИП – источник питающих уровней

МО - модуль основной

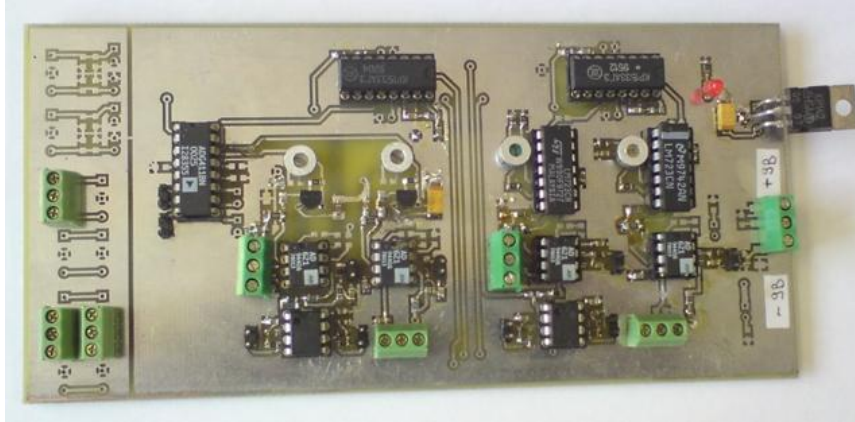
ЭМО – электронный модуль с образцом

СУ - согласующее устройство

# Совершенствование методик радиационных испытаний

(раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Специализированное оборудование в составе установки для измерений во время облучения и регистрации одиночных событий

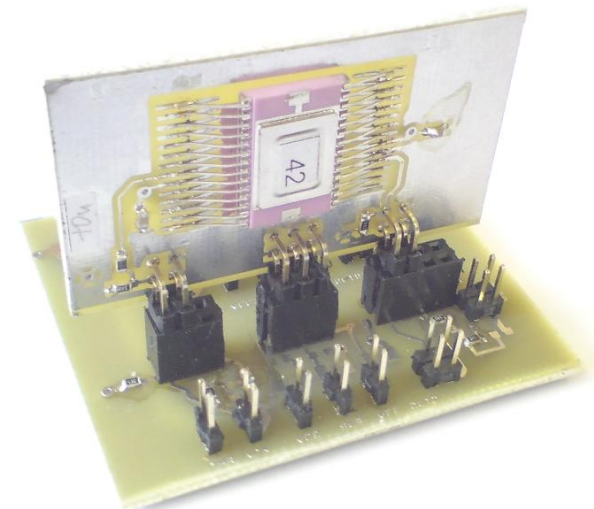


## МО + ЭМО:

- Монтаж образца в зоне облучения
- Подключение кабелей для подачи/съема сигналов и уровней питания
- Быстрая замена образцов в зоне облучения
- Унифицированная схема подключения ИС для паспортизации параметров до/во время/после облучения

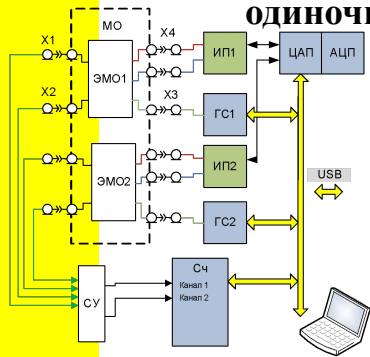
## ИЦ:

- Четыре канала (по два положительных и отрицательных уровня)
- Линейный выход в каждом канале для независимого измерения тока потребления
- Регулировка выходного уровня напряжения
- Регулировка уровня срабатывания схемы защиты от «зашелкивания»
- TTL -выход для регистрации момента «зашелкивания»



# Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)

Основные параметры установки для измерений во время облучения и регистрации  
одиночных событий при использовании радионуклидных (не импульсных) источников



Количество образцов ИС, находящихся в зоне облучения: **2 шт.**

Максимальная частота регистрации SEE событий: **10 кГц**

Входные сигналы ЭМО:

**импульсное и синусоидальное напряжение  
ток потребления образцов (по 4 каналам),  
амплитуда (размах), частота и**

Измеряемые параметры:

**коэффициент заполнения выходного  
сигнала ЭМО**

Диапазон регулировки выходных уровней питания: **3.5 ÷ 7.0 В (-3.5 ÷ -7.0 В)**

Максимальный выходной ток :

**до 100мА/канал**

Минимальный порог срабатывания

схемы защиты от «зашелкивания» :

**<2мА**

Средняя задержка срабатывания схемы защиты :

**<2мкс\***

Интервал времени между моментом срабатыванием защиты и

повторным включением канала ИП :

**40 – 120 мкс (регулируется)**

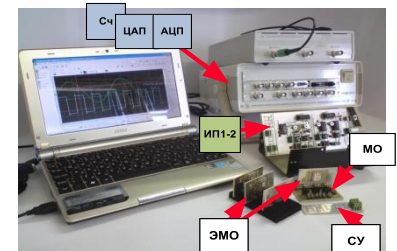
Точность измерения тока потребления, не хуже:

**25 мкА**

Емкость нагрузки (на канал):

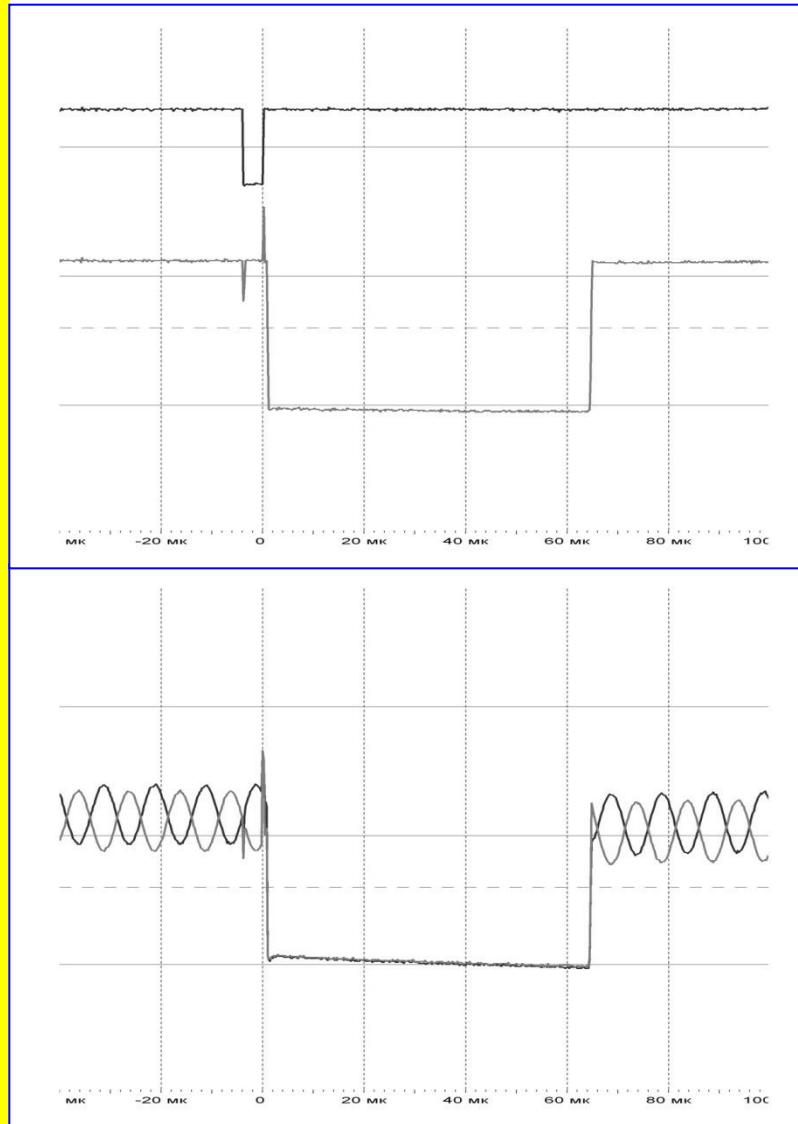
**от 10 до 200 нФ**

\*) при среднем токе потребления 20 мА/канал и емкости нагрузки <20 нФ





# Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)



## Осциллограммы в основных узлах ИП и ЭМО (с ТИУ Ampl-1.14) (тестовый режим)

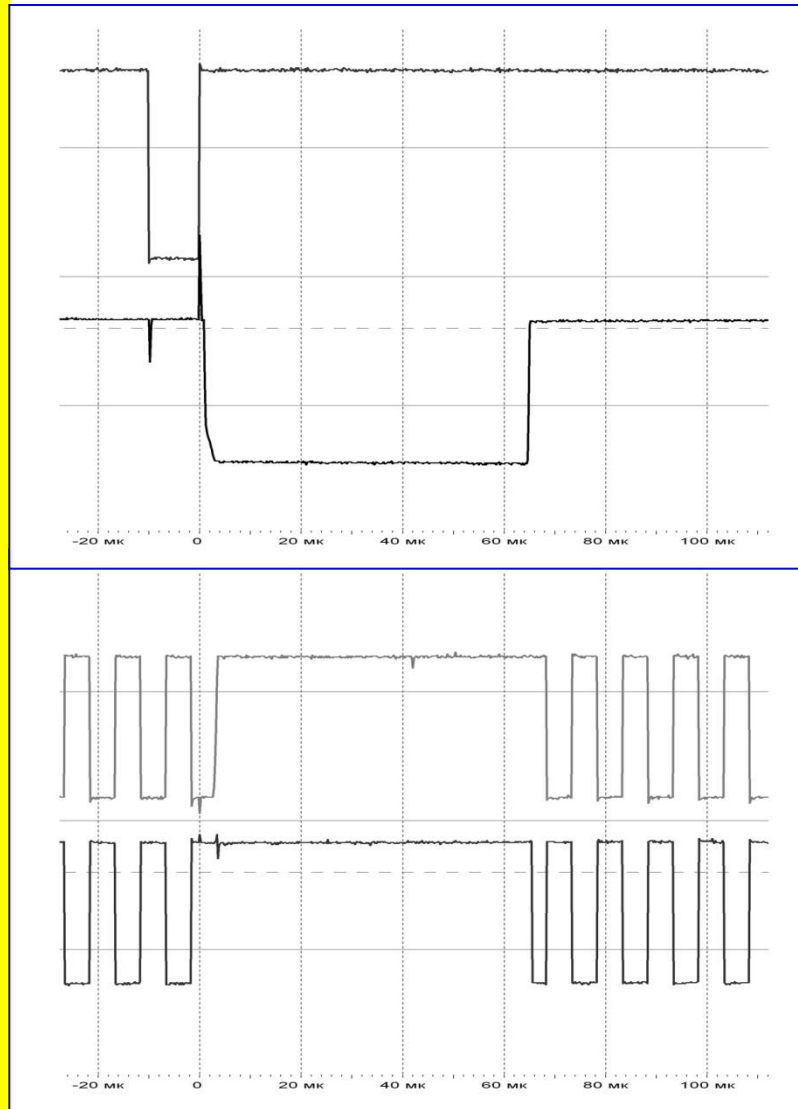
Сверху вниз:

- Импульс тока нагрузки при имитации «защелкивания» (масштаб по вертикали 20мА/дел.)
- Напряжение на шине уровня питания  $V_{cc}$  (масштаб по вертикали 5В/дел.)
- Форма сигнала на дифференциальном выходе ТИУ Ampl-1.14. (масштаб по вертикали 5В/дел.).

Входной сигнал: синусоидальный



# Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)

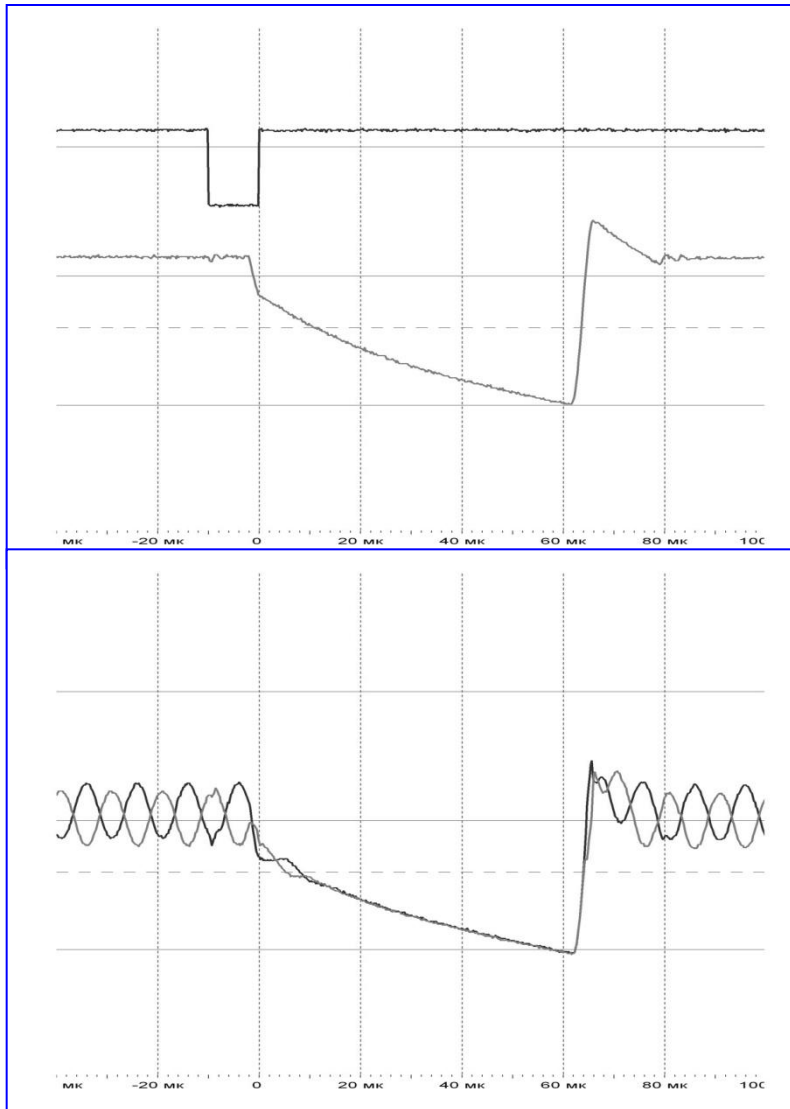


## Осциллограммы в основных узлах ИП и ЭМО (с компаратором напряжения Cmp-1.17) (тестовый режим)

Сверху вниз:

- Импульс тока нагрузки при имитации «защелкивания» (масштаб по вертикали 10мА/дел.)
  - Напряжение на шине уровня питания  $V_{cc}$  (масштаб по вертикали 5В/дел.)
  - Форма сигнала на дифференциальном выходе компаратора напряжения Cmp-1.17. (масштаб по вертикали 1В/дел.).
- Входной сигнал: синусоидальный

# Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)



## Осциллограммы в основных узлах ИП и ЭМО (с ТИУ Ampl-1.14) (тестовый режим)

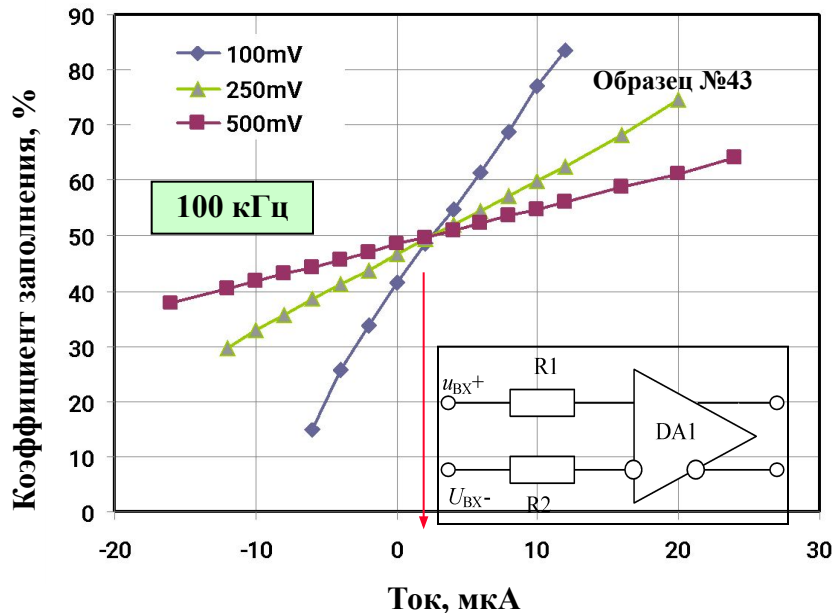
Влияние емкости нагрузки: шина  $V_{cc}$  ЭМО  
шунтирована конденсатором  $>200\text{нФ}$

Сверху вниз:

- Импульс тока нагрузки при имитации «защелкивания» (масштаб по вертикали 20мА/дел.)
  - Напряжение на шине питания  $V_{cc}$  (+5В) (масштаб по вертикали 5В/дел.)
  - Форма сигнала на дифференциальном выходе ТИУ Ampl-1.14. (масштаб по вертикали 5В/дел.).
- Входной сигнал: синусоидальный

# Совершенствование методик радиационных испытаний (раздел подготовлен Чеховским В.А.)

## Предварительные измерения параметров образцов



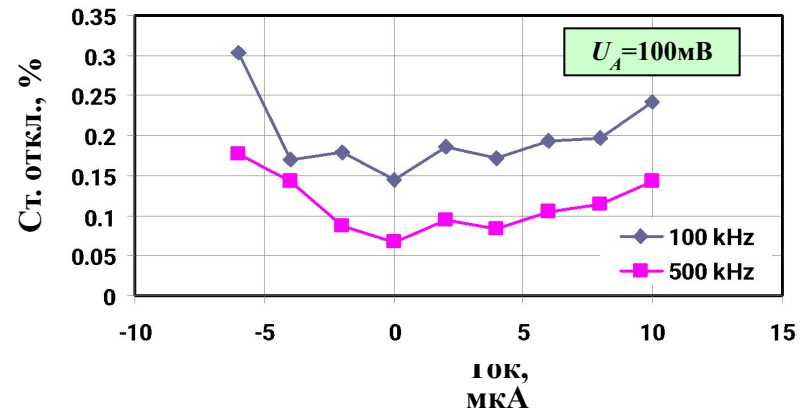
Входной ток смещения (покоя) инвертирующего входа:  $\sim 2.5$  мкА

**Оценка точности измерений в зависимости от амплитуды и частоты входного сигнала.**

## ИС компаратора Стр-1.17

Коэффициент заполнения выходного сигнала в зависимости от входного тока инвертирующего входа ( $InInv$ ) при различных амплитудах входного синусоидального напряжения.

$R1=10$  Ом,  $R2=10$  кОм



# Учет влияния проникающей радиации в «Spice-подобных» программах

**О.В. Дворников**

**д.т.н., доц. (ОАО "МНИПИ", МНТЦ "МикАн",  
г. Минск, Беларусь)**

**[oleg\\_dvornikov@tut.by](mailto:oleg_dvornikov@tut.by)**



# Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение «SPICE-параметров» *n-p-n* БТ

$$\frac{1}{BF_F} = \frac{1}{BF_0} + TF \cdot K_{\tau NB} F_N \approx \frac{1}{BF_0} + TF \cdot K_B F_N,$$

$$BF \approx \frac{N_{DE} x_E D_{NB}}{N_{AB} W_{BA} D_{PE}} \sim \frac{\mu_{NB} N_{DE}}{\mu_{PE} N_{AB}} \sim \frac{N_{DE}}{N_{AB}},$$

$$VAF = \frac{Q_{B0}}{C_{JC0}} \sim N_{AB} d_C \sim N_{AB} \sqrt{\frac{1}{N_{AB}} + \frac{1}{N_{DC}}},$$

$$IS \approx \frac{q D_{NB} n_I^2 S_E}{N_{AB} W_{BA}} \sim \frac{\mu_{NB}}{N_{AB}} \sim \frac{1}{N_{AB}},$$

# Учет влияния проникающей радиации

## Радиационное изменение «SPICE-параметров»

$$TF \approx \frac{W_{BA}^2}{2D_{NB}} \sim \frac{1}{\mu_{NB}},$$

$$ISE_F = ISE_0 \frac{d_{EF}}{d_E} + qn_I v_{SF} K_{SURF} \frac{n_I}{N_{AB}} P_E (d_{EF} + d_{SURF}),$$

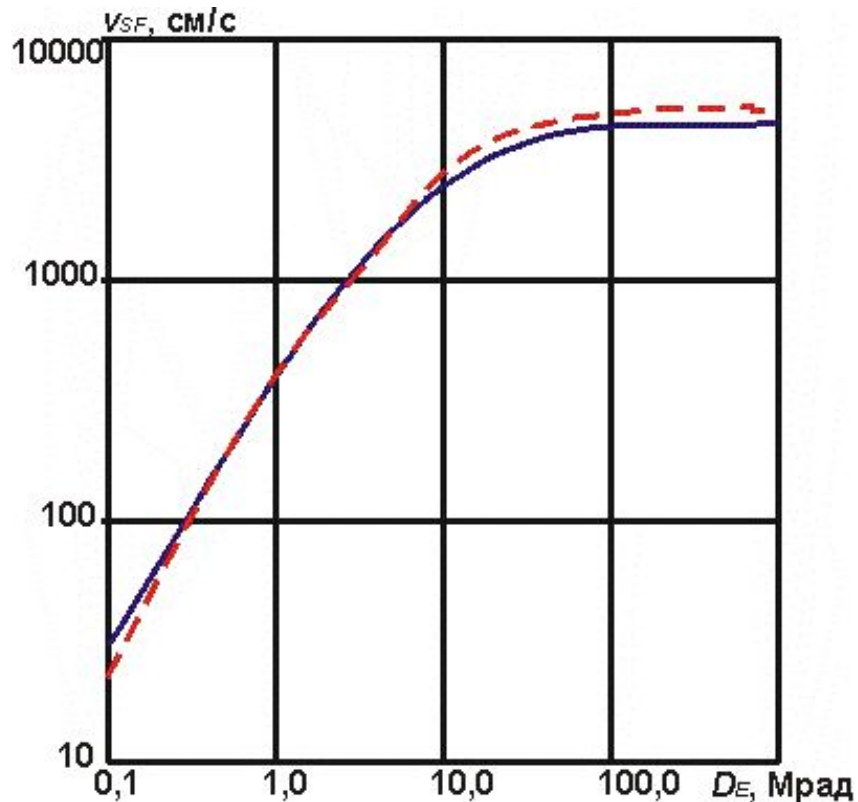
для  $n - p - n$

$$ISE_F = ISE_0 \frac{d_{EF}}{d_E} + qn_I v_{SF} K_{SURF} \frac{n_I}{N_{DB}} P_E W_{BA},$$

для  $Lp - n - p$

# Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение «SPICE-параметров» *n-p-n* БТ



Зависимость скорости поверхностной рекомбинации  $v_{SF}$  от дозы поглощенного излучения  $D_E$  быстрых электронов. Штриховая линия – известные экспериментальные данные, сплошная линия – примененная аппроксимация

# Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение «*SPICE*-параметров» *n-p-n* БТ

$$IKF = \frac{Q_{B0} S_E}{TF} \approx \frac{q N_{AB} W_{BA} S_E}{TF} \sim N_{AB} \mu_{NB} \sim N_{AB},$$

$$RC \sim N_{DC}^{-1}, RE \sim N_{DE}^{-1}, RB \sim N_{AB}^{-1},$$

$$V_{BR} \cong 60 \left( \frac{E_G}{1,1} \right)^{1,5} \left( \frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-0.75} \sim N_B^{-0.75}.$$



# Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение «*SPICE*-параметров» ПТП

$$BETA = \frac{4\varepsilon\varepsilon_0\mu_{CH}W}{3aL} \sim \mu_{CH},$$

$$VTO = \frac{qN_{CH}a^2}{2\varepsilon\varepsilon_0} \sim N_{CH},$$

$$LAMBDA \sim N_{CH}^{-0,5}, RD \sim N_D^{-1}, RS \sim N_S^{-1}.$$

# Учет влияния проникающей радиации

Радиационное изменение основных параметров полупроводников

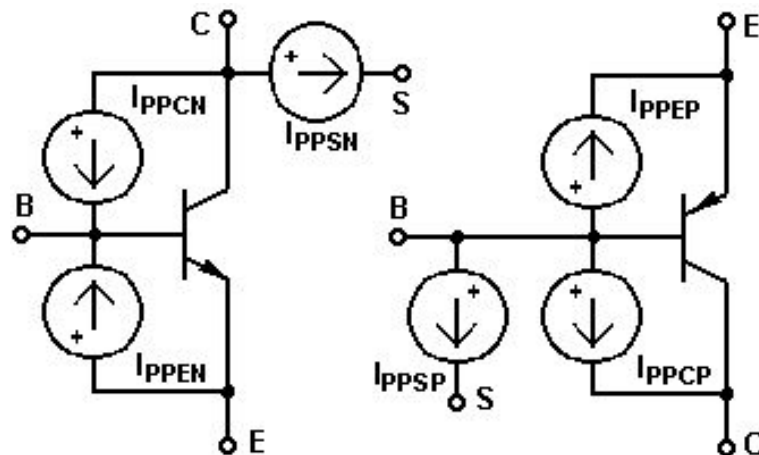
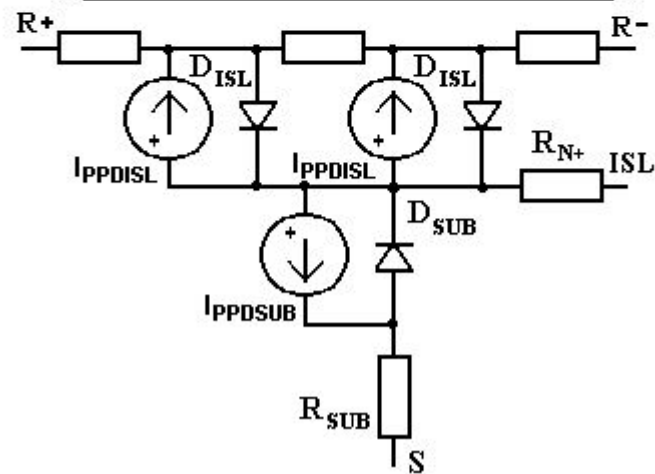
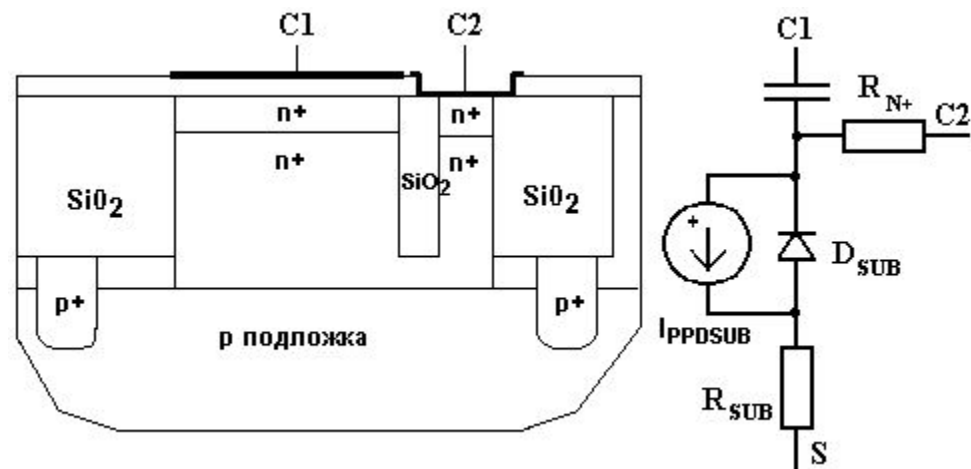
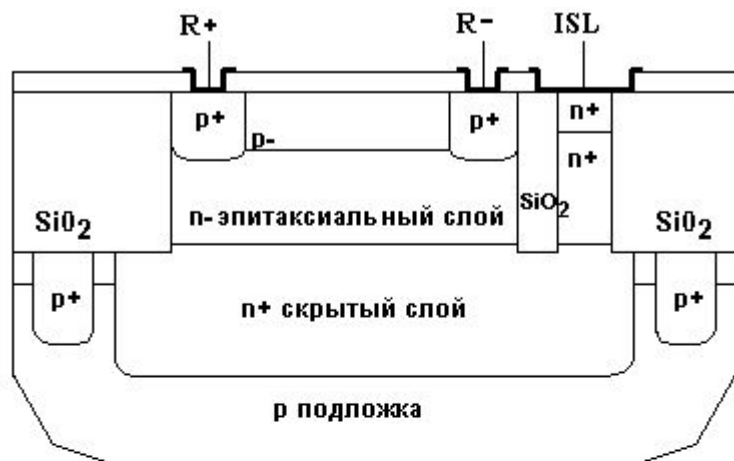
$$\frac{n_F}{n_0} = \exp(-K_N F),$$

$$K_N = \frac{1}{c n_0^\gamma},$$

$$\frac{1}{\mu_F} = \frac{1}{\mu_0} + K_\mu F.$$

# Учет влияния проникающей радиации

## Учет фототоков в интегральных элементах



# Учет влияния проникающей радиации

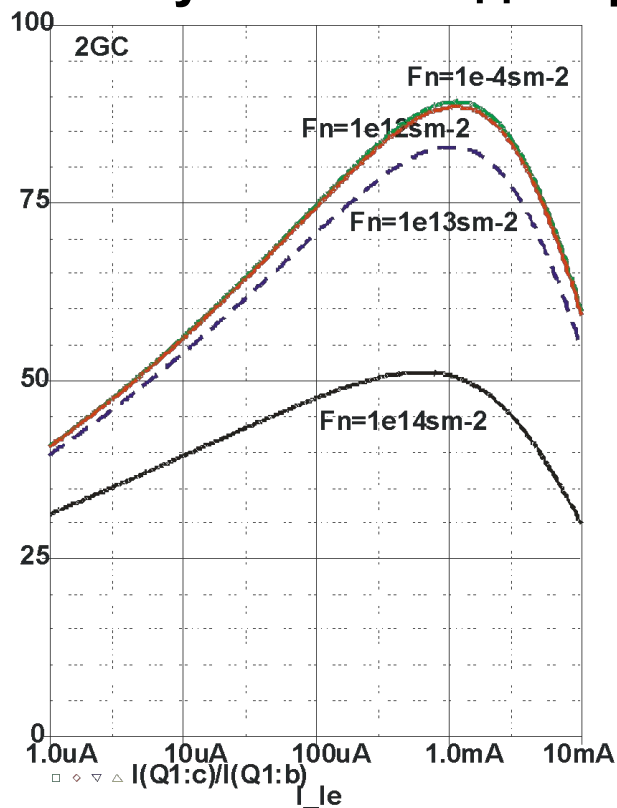
Работоспособность моделей проверена при моделировании ВАХ элементов «АБМК\_1\_3».

Кроме деградации  $\beta$  при воздействии потока нейтронов и гамма-излучения, выявлено:

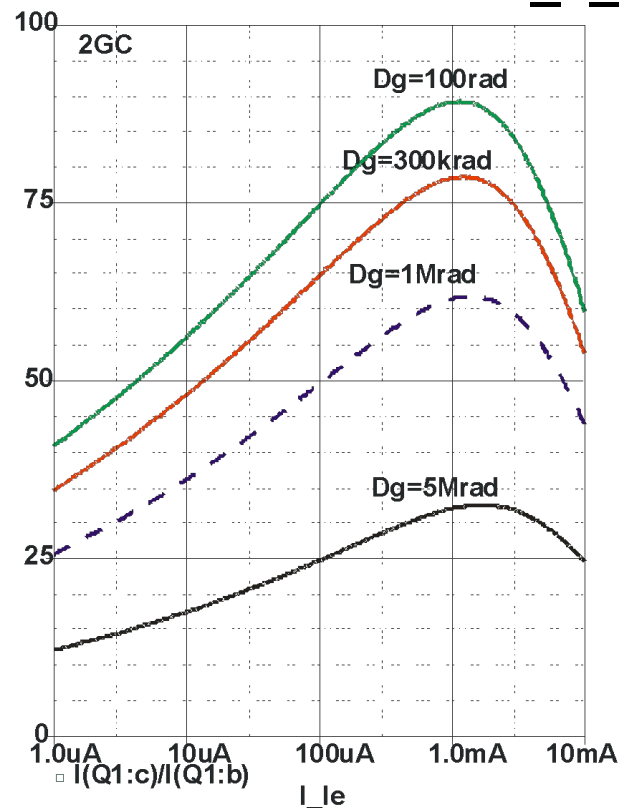
- отсутствие изменения выходного малосигнального сопротивления  $n-p-n$ - транзисторов и уменьшение выходного малосигнального сопротивления горизонтальных  $p-n-p$ -транзисторов при воздействии потока нейтронов, что может быть объяснено существенно большей концентрацией примеси в базе  $n-p-n$ , по сравнению с  $p-n-p$ ;
- отсутствие изменения характеристик  $p$ -ПТП при гамма-облучении и небольшое уменьшение напряжения отсечки при воздействии потока нейтронов, что может быть объяснено незначительным изменением подвижности и уменьшением концентрации основных носителей заряда в канале  $p$ -ПТП.

# Учет влияния проникающей радиации

## Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК\_1\_3»



а) при различной величине интегрального потока нейтронов  $F_n$

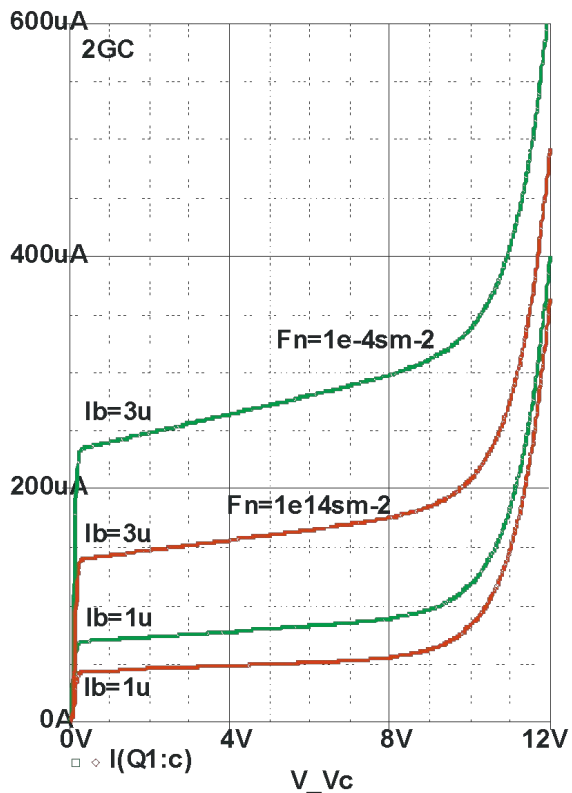


б) при различной величине поглощенной дозы гамма-излучения  $D_g$

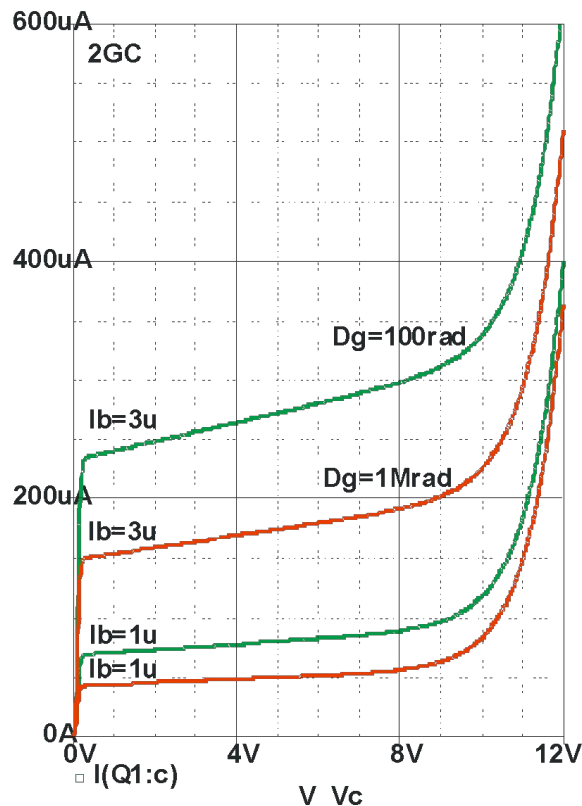
Зависимость  $\beta$  от эмиттерного тока  $n-p-n$ - транзистора типа 2GC

# Учет влияния проникающей радиации

## Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК\_1\_3»



а) при различной величине интегрального потока нейтронов  $F_n$

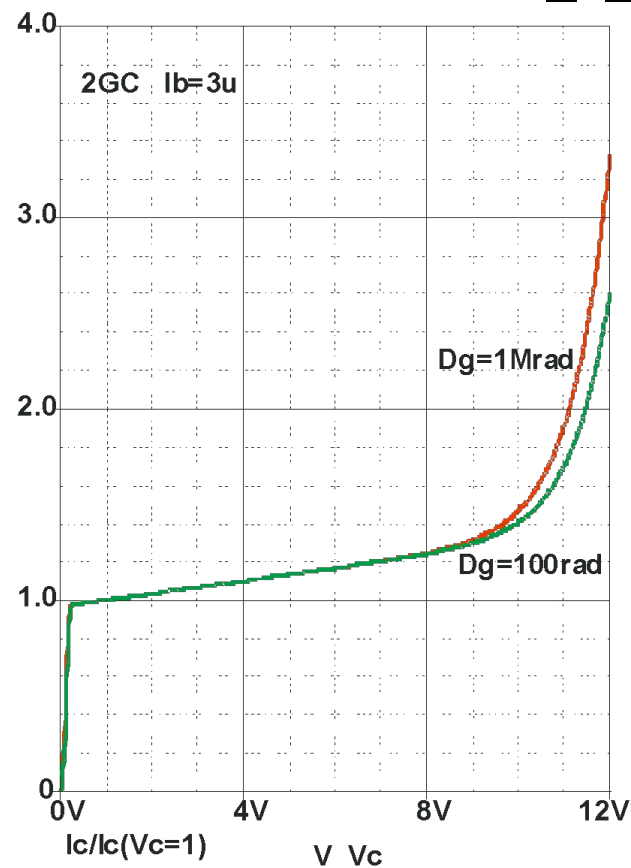
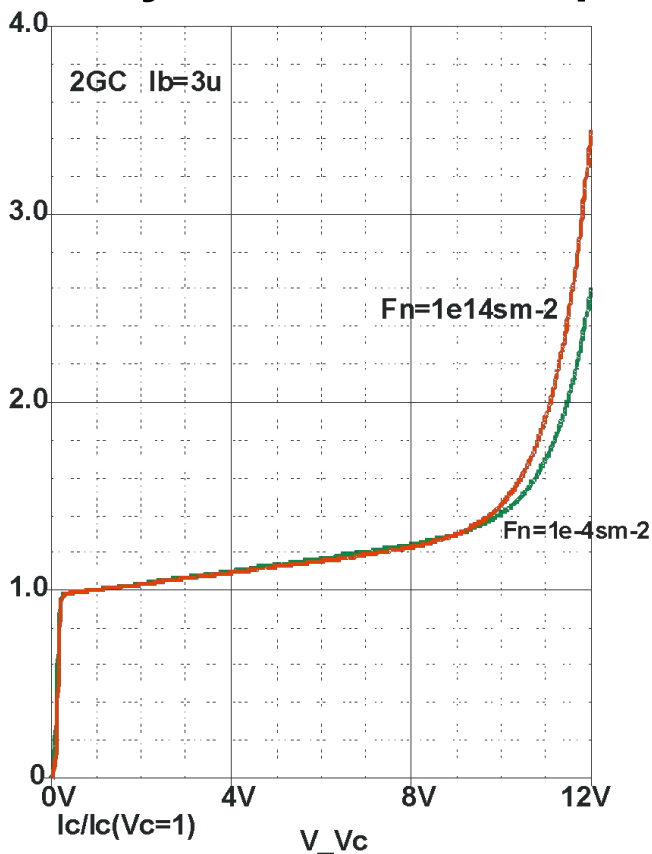


б) при различной величине поглощенной дозы гамма-излучения  $D_g$

**ВАХ в схеме с ОЭ *n-p-n*- транзистора типа 2GC**

# Учет влияния проникающей радиации

## Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК\_1\_3»



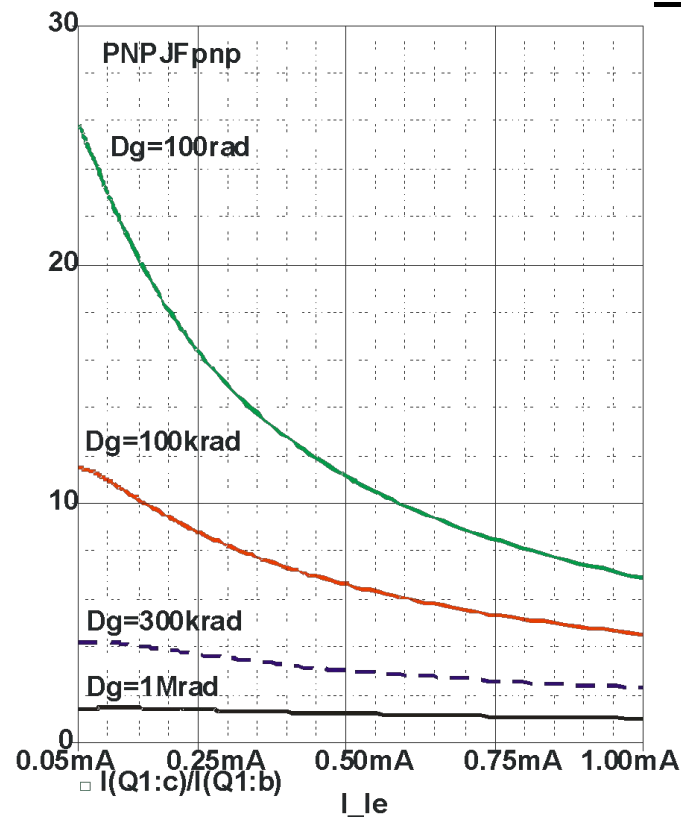
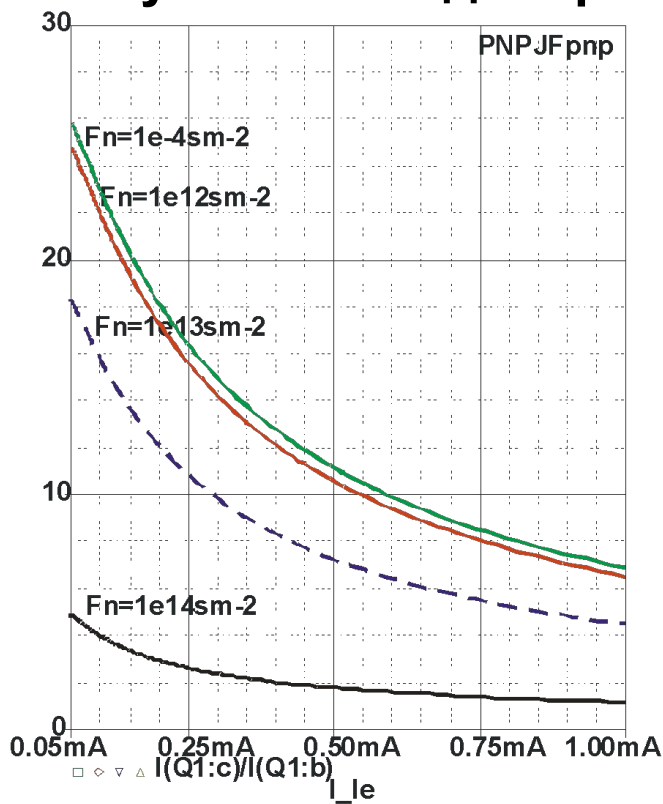
а) при потоке нейтронов  $F_n = 10^{14} \text{ см}^{-2}$       б) при поглощенной дозе  $D_g = 1 \text{ Mrad}$

Нормированная ВАХ в схеме с ОЭ *n-p-n*-транзистора типа 2GC



# Учет влияния проникающей радиации

## Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК\_1\_3»



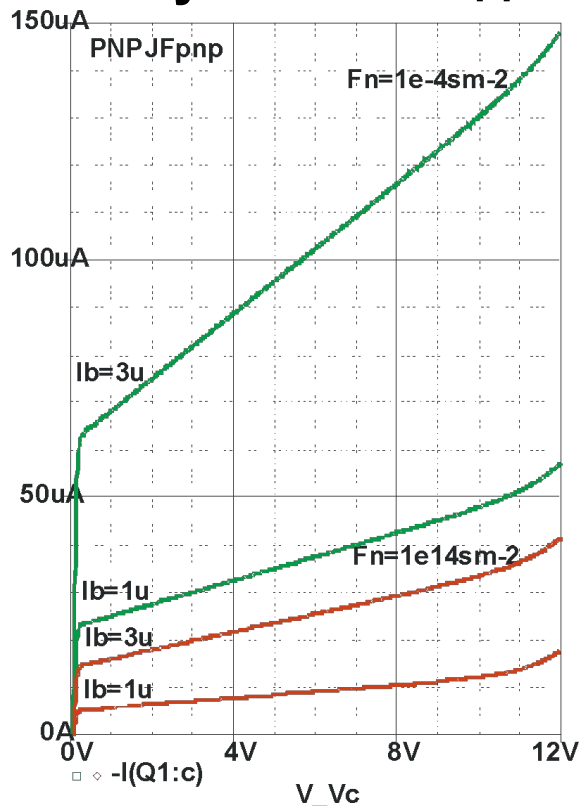
а) при различной величине интегрального потока нейтронов  $F_n$

б) при различной величине поглощенной дозы гамма-излучения  $D_g$

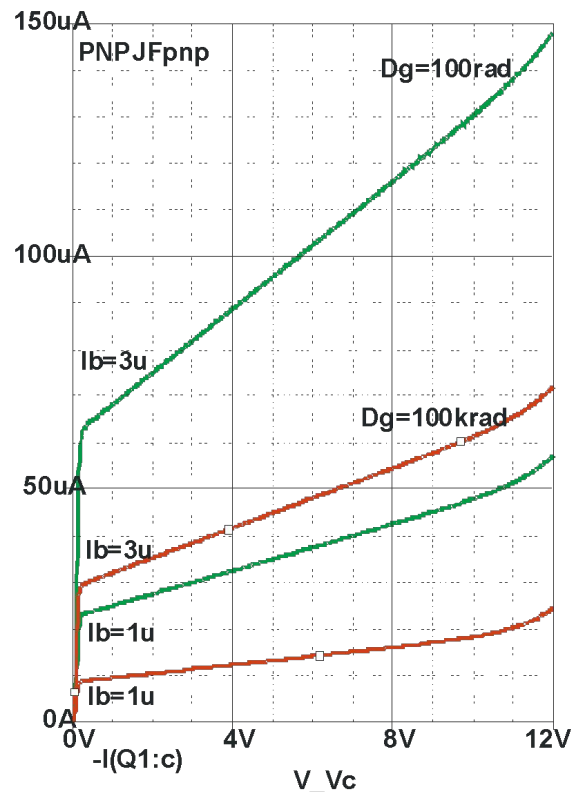
Зависимость  $\beta$  от эмиттерного тока  $p-n-p$  транзистора типа *PNPJFpnp*

# Учет влияния проникающей радиации

## Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК\_1\_3»



а) при различной величине интегрального потока нейтронов  $F_n$

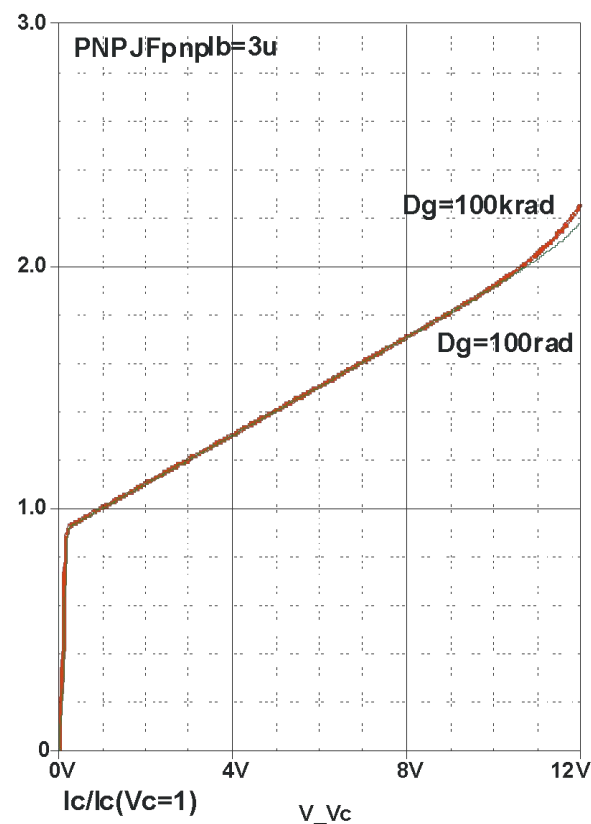
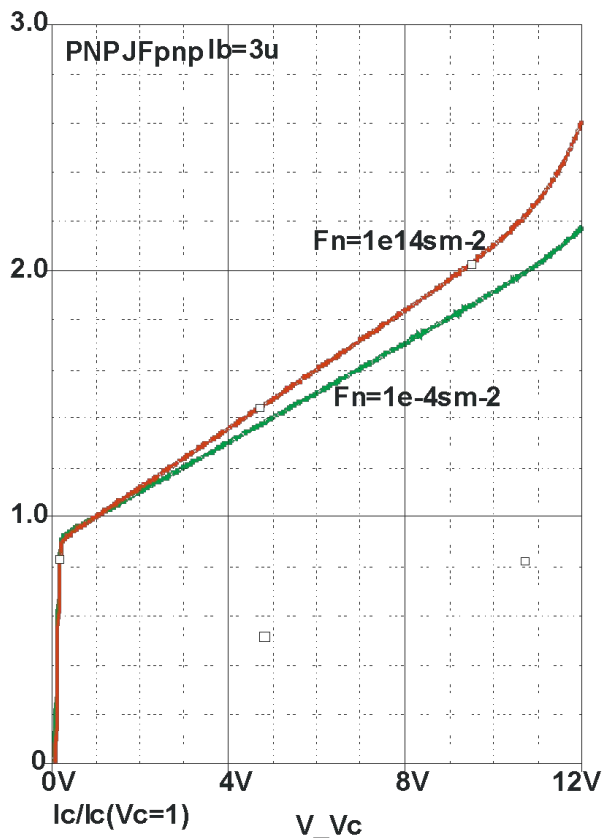


б) при различной величине поглощенной дозы гамма-излучения  $D_g$

ВАХ в схеме с ОЭ *p-n-p* транзистора типа *PNPJFnp*

# Учет влияния проникающей радиации

## Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК\_1\_3»

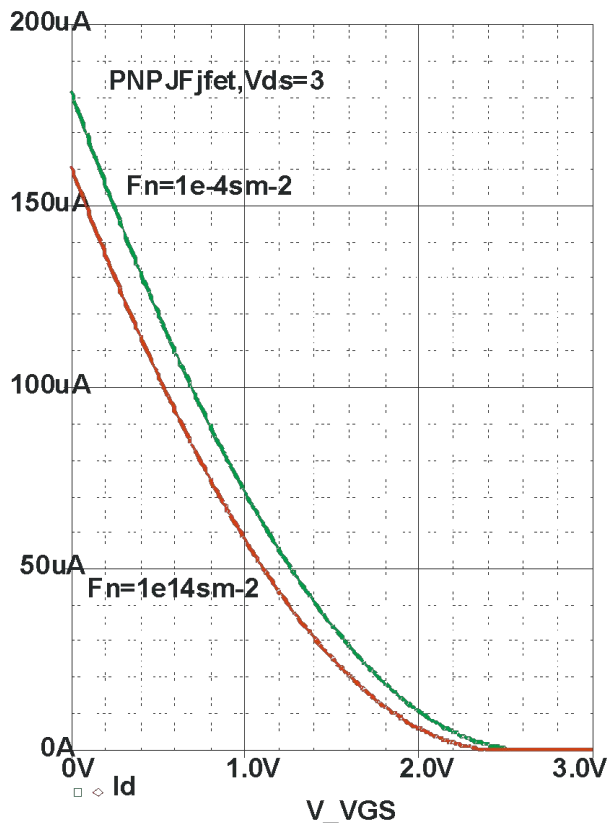


а) при потоке нейтронов  $F_n=10^{14}cm^{-2}$  б) при поглощенной дозе  $D_g=100krad$

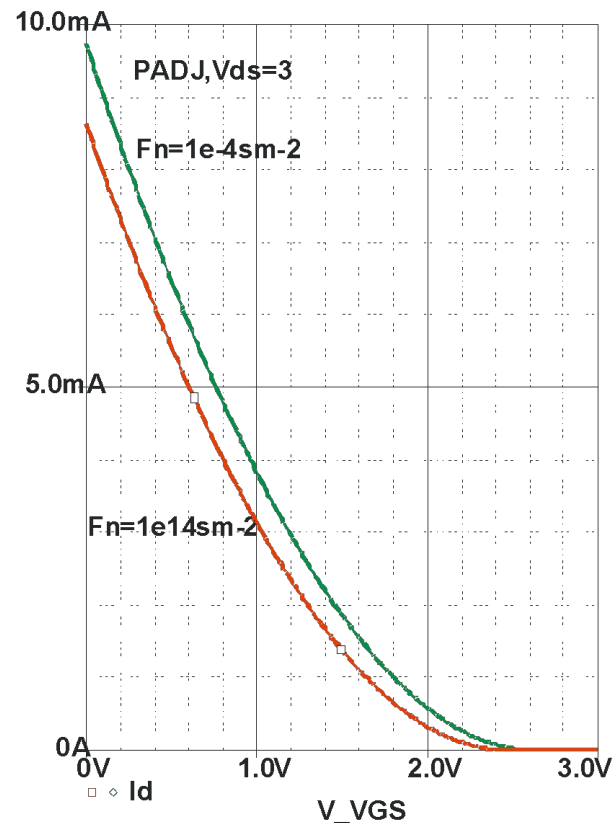
Нормированная ВАХ в схеме с ОЭ *p-n-p* транзистора типа *PNPJFnpn*

# Учет влияния проникающей радиации

## Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК\_1\_3»



а) *p*-ПТП типа *PNPJfet*

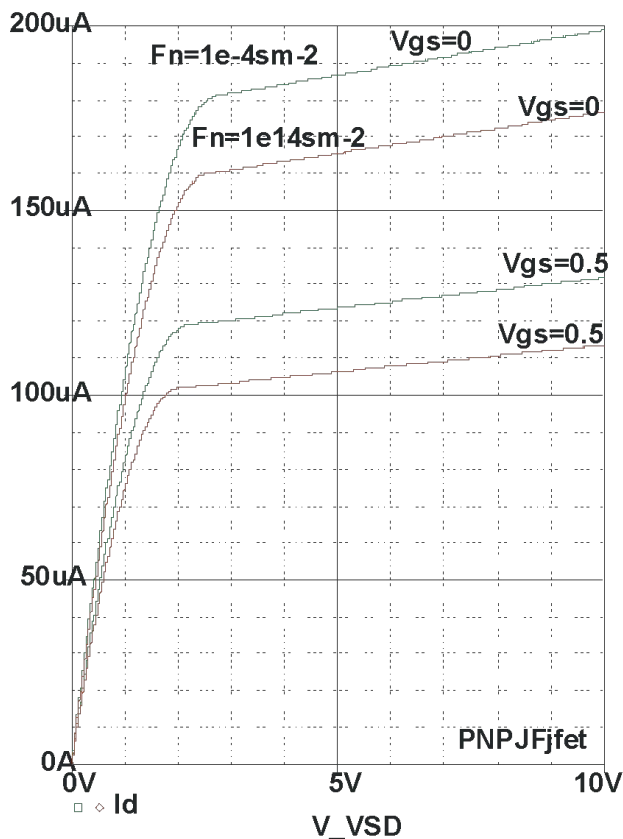


б) *p*-ПТП типа *PADJ*

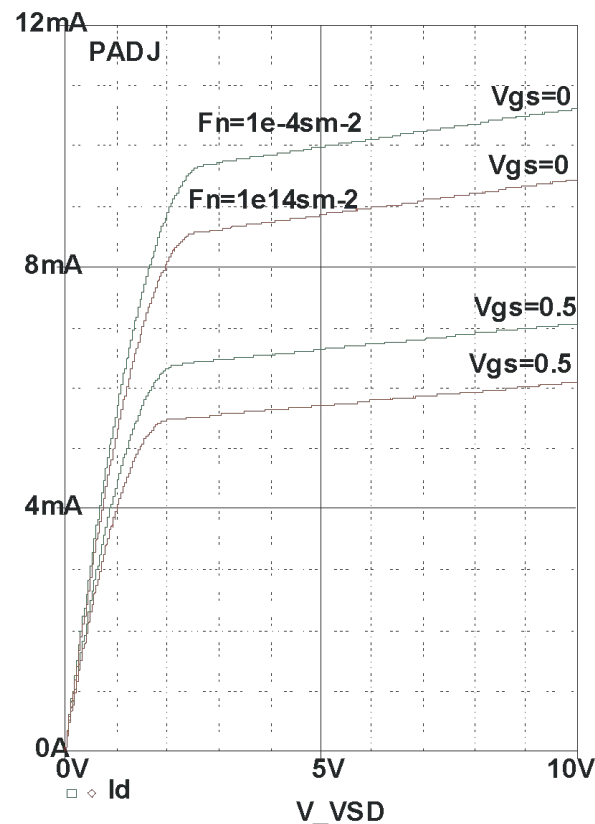
Зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при различной величине интегрального потока нейтронов  $F_n$

# Учет влияния проникающей радиации

Результаты моделирования ВАХ элементов «АБМК\_1\_3»



а) р-ПТП типа *PNPJFfet*



б) р-ПТП типа *PADJ*

ВАХ в схеме с ОИ при различной величине интегрального потока нейтронов  $F_n$