

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ АНАЛОГОВЫХ МИКРОСХЕМ**

**д.т.н. О.В. Дворников  
oleg\_dvornikov@tut.by**

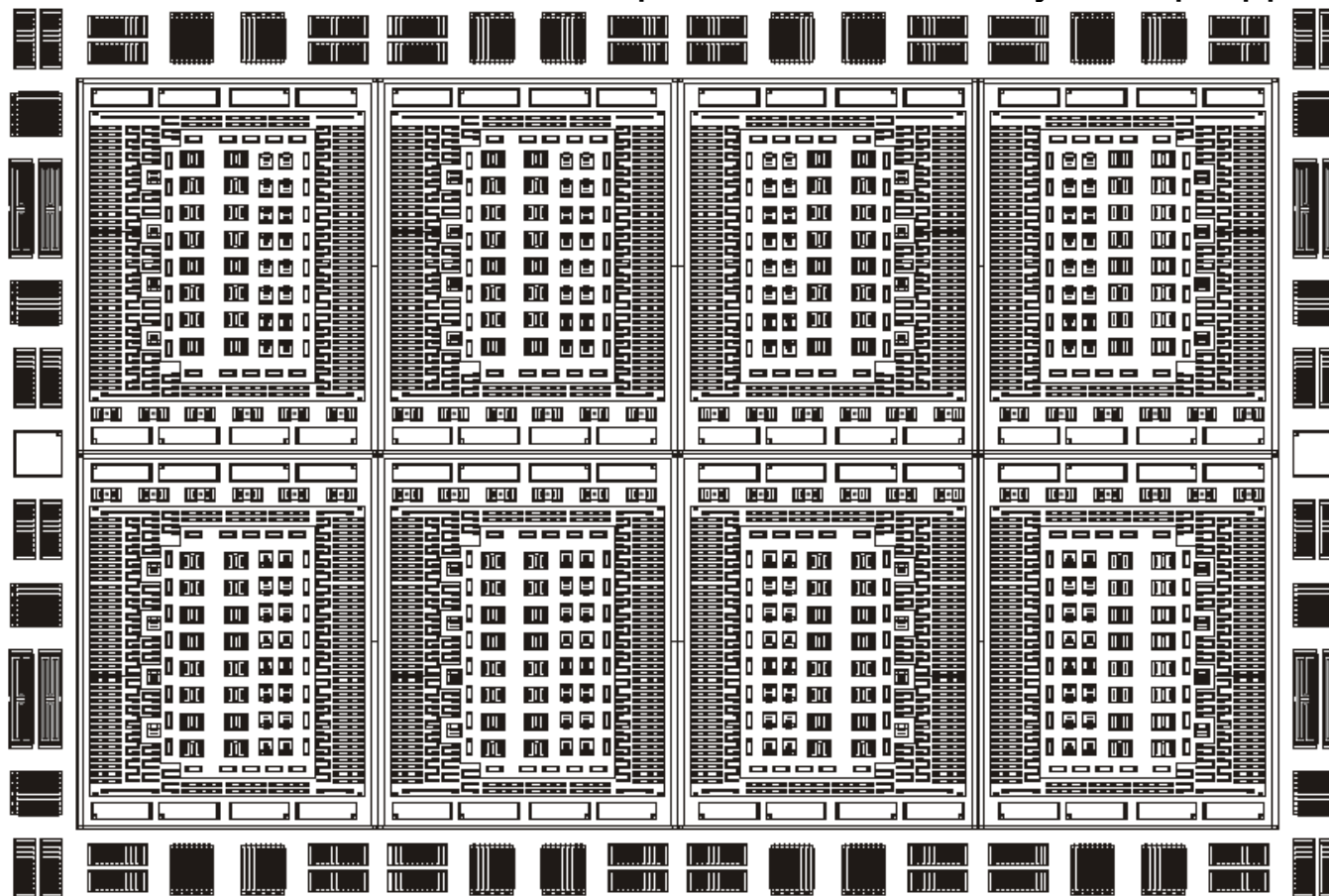
**(+375 17) 262-27-57**

**(+375 29) 616-45-87**

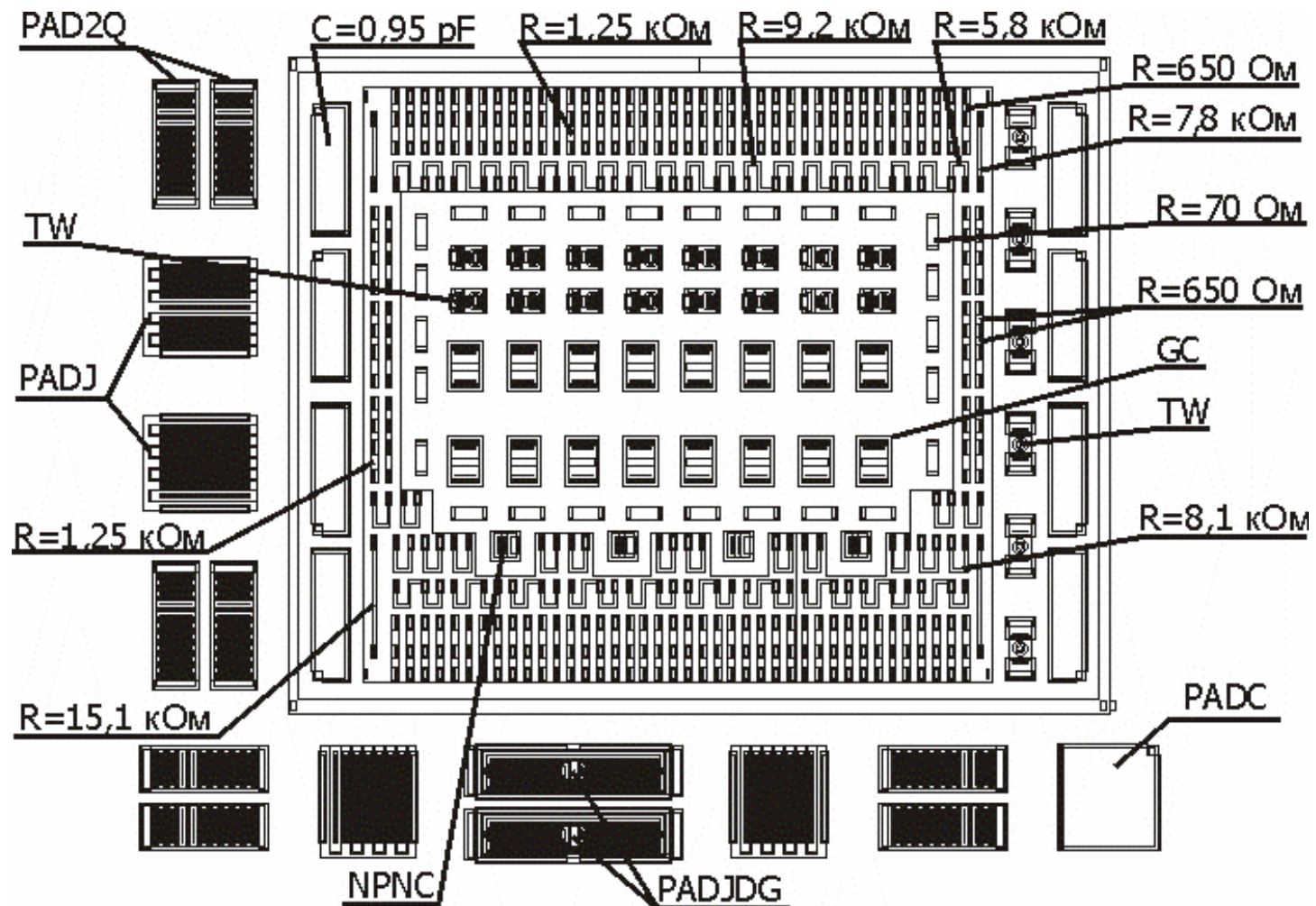
**В.А. Чеховский**

# 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 0,91 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 (*TI*), позволяющие с помощью различного выполнения межсоединений областей получить два *n-p-n*- или *p-n-p*-транзистор.

# Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК-1.3»

Размер кристалла, мм		3,6x2,7
Технология изготовления		БиПТП
Корпус		H16.48-1В
Количество элементов	PNPJF (каскадное соединение p-n-p и p-ПТП)	128
	GC (два n-p-n с объединенными коллекторами)	128
	NPNC (n-p-n)	32
	TW (двухэмиттерный n-p-n- или p-n-p)	48
	PAD2Q (два малошумящих n-p-n)	24
	PADJDG (два двухзатворных p-ПТП)	4
	PADJ (малошумящий p-ПТП)	24
Суммарное сопротивление всех резисторов (БМК/макроячейка)		5,264 МОм/ 0,658 МОм
Суммарная емкость всех конденсаторов (БМК/макроячейка)		62,24 пФ/ 7,28 пФ

Общие характеристики «АБМК-1.3»

# Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК-1.3»

Наименование работ	Исполнитель	
	Вариант 1	Вариант 2
1 Заключение договора	ОАО «МНИПИ» и Заказчик	
2 Передача Заказчику библиотек элементов и схемотехнических решений «АБМК-1.3», результатов радиационных испытаний	ОАО «МНИПИ»	
3 Разработка технического задания	ОАО «МНИПИ» и Заказчик	
4 Разработка электрической схемы	ОАО «МНИПИ»	Заказчик
5 Сопровождение разработки электрической схемы	Заказчик	ОАО «МНИПИ»
6 Разработка конструкторской документации	ОАО «МНИПИ»	
7 Разработка топологии межсоединений	ОАО «МНИПИ»	
8 Разработка методик измерений	ОАО «МНИПИ»	Заказчик
9 Сопровождение разработки методик измерений	Заказчик	ОАО «МНИПИ»

Этапы разработки ИС на «АБМК-1.3»

# Радиационно-стойкий базовый матричный кристалл «АБМК-1.3»

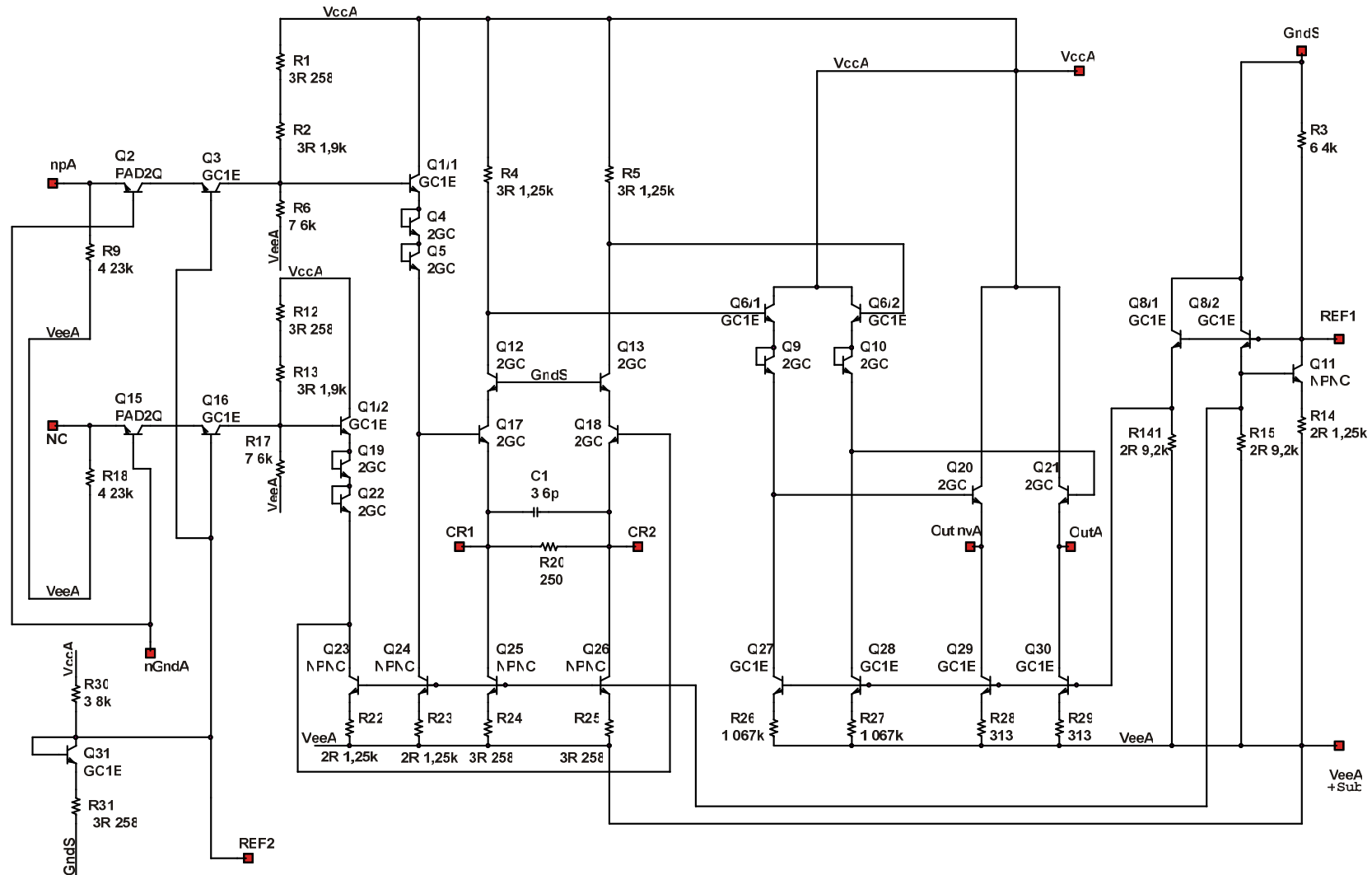
Наименование работ	Исполнитель	
	Вариант 1	Вариант 2
10 Изготовление полупроводниковых пластин	ОАО «Интеграл»	
11 Сборка кристаллов в корпус и измерения	ОАО «МНИПИ»	
12 Исследования ИС в аппаратуре и выработка предложений по корректировке (при необходимости)	Заказчик	
13 Повторное выполнение этапов 4 – 11 (при необходимости)	ОАО «МНИПИ» и Заказчик	
14 Проведение испытаний на устойчивость и прочность при механических и климатических воздействиях	ОАО «МНИПИ»	
15 Исследования радиационной стойкости	ОАО «МНИПИ», «НПЦ по материаловедению»	

Примечание. «НПЦ по материаловедению» - Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»

Этапы разработки ИС на «АБМК-1.3»

# Типовые схемотехнические решения

Серия транзистивных усилителей (Ampl 1-3, Ampl 1-14, Ampl 1-15, Ampl 1-17)



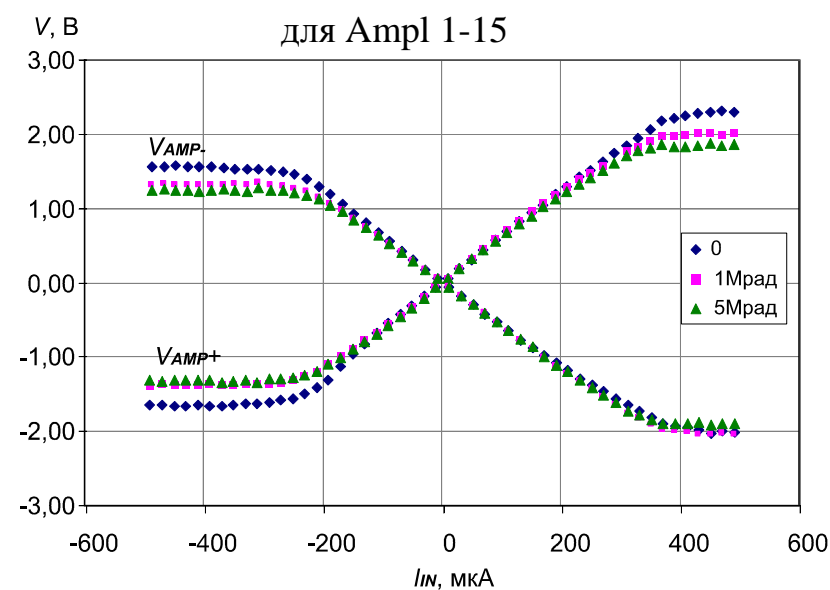
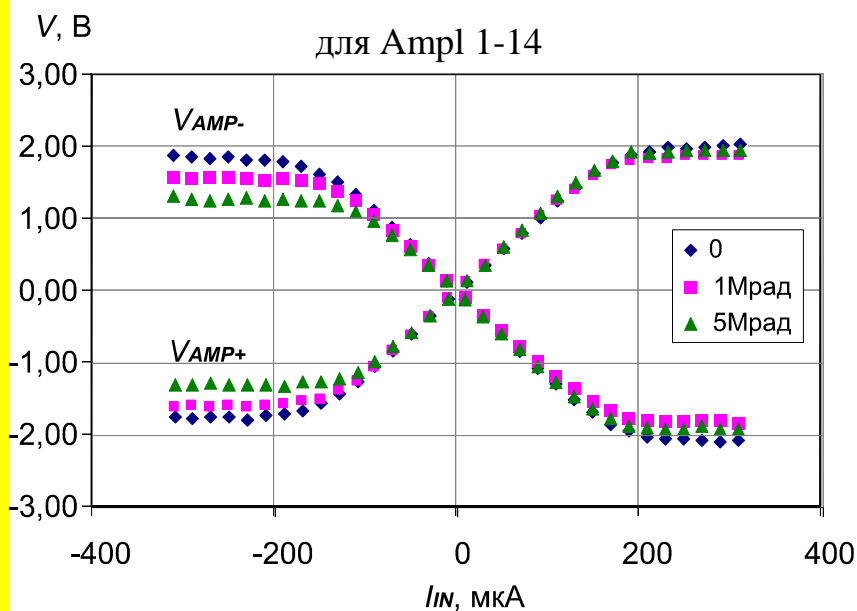
Электрическая схема транзистивного усилителя Ampl 1-15



# Типовые схемотехнические решения

Серия транзистивных усилителей (Ampl 1-3, Ampl 1-14, Ampl 1-15, Ampl 1-17)

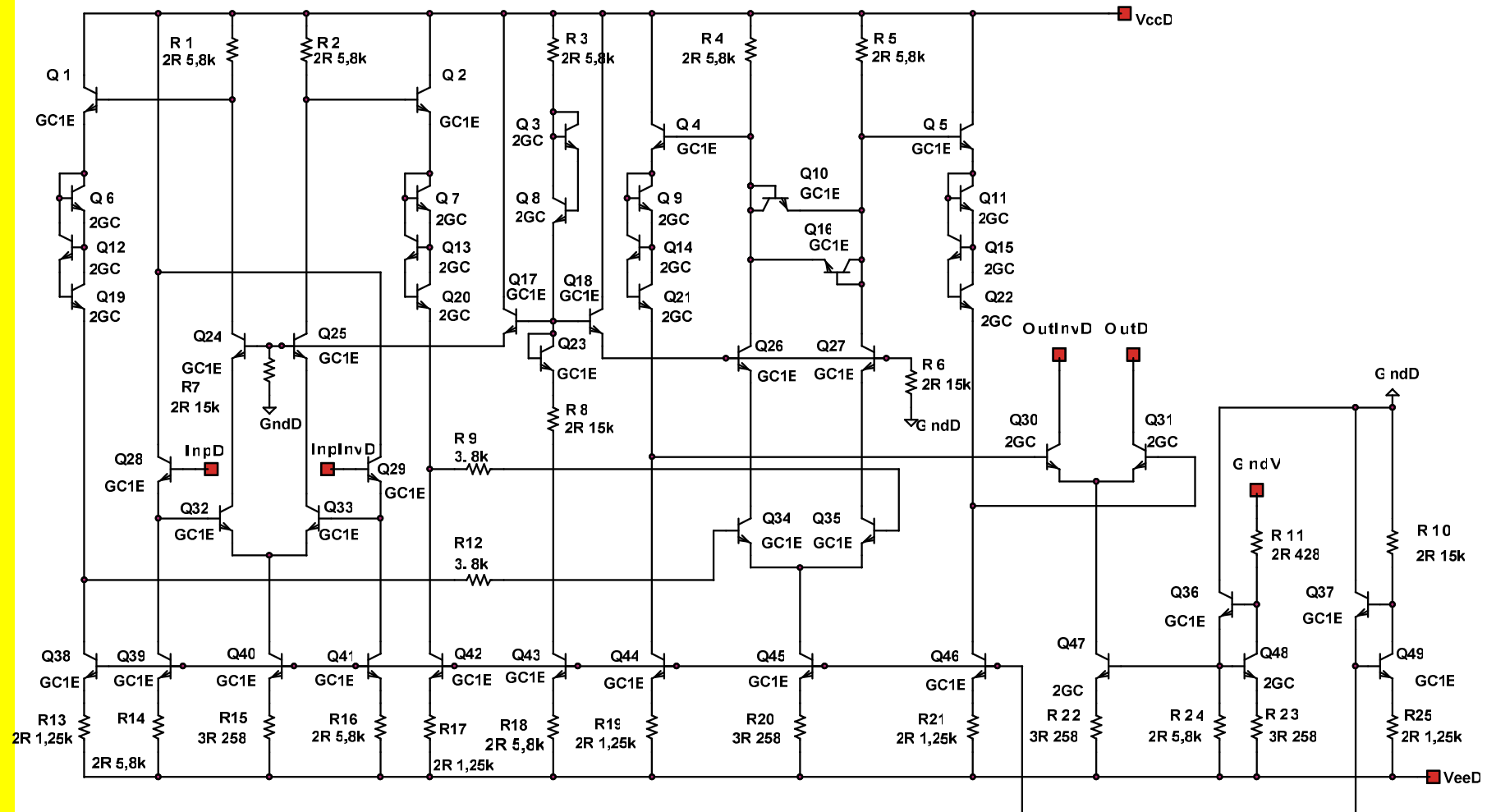
Параметр	Тип усилителя			
	Ampl 1-3	Ampl 1-14	Ampl 1-15	Ampl 1-17
Напряжение питания, В	$\pm 3 \dots \pm 5$	$\pm 3 \dots \pm 5$	$\pm 3 \dots \pm 5$	$\pm 3 \dots \pm 5$
Входное сопротивление, Ом	50,0	50,0	50,0	50,0
Коэффициент преобразования, мВ/мкА	50,0	10,0	5,0	0,5
Полоса пропускания по уровню -3 дБ, МГц	5	150	170	250
Среднеквадратическое значение шумового тока, приведенного к входу, при емкости источника сигнала 10 пФ, нА	60	110	80	170



Зависимость амплитуды напряжения на выходах усилителей от входного тока при различной величине поглощенной дозы

# Типовые схемотехнические решения

## Серия компараторов (Comp 1-3, Comp 1-4, Comp 1-5, Comp 2)



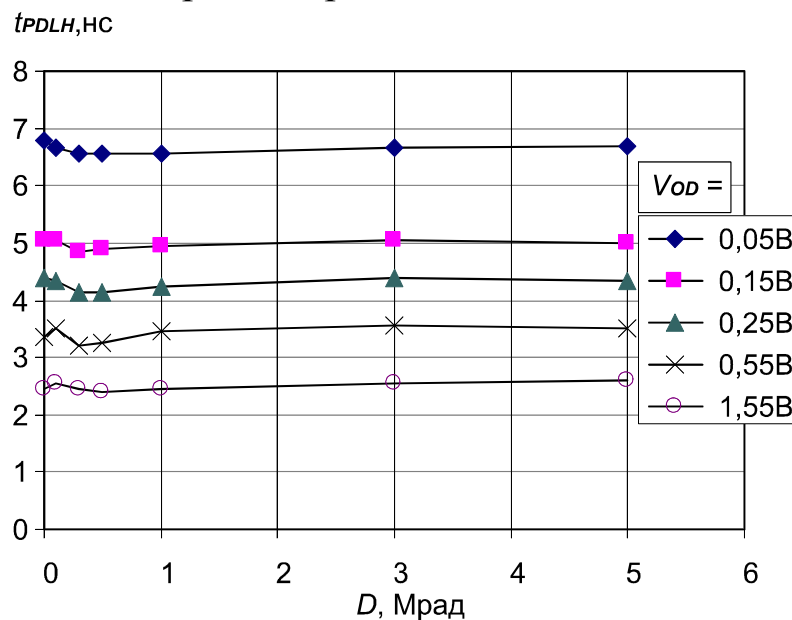
Электрическая схема компаратора Comp 1-5

# Типовые схемотехнические решения

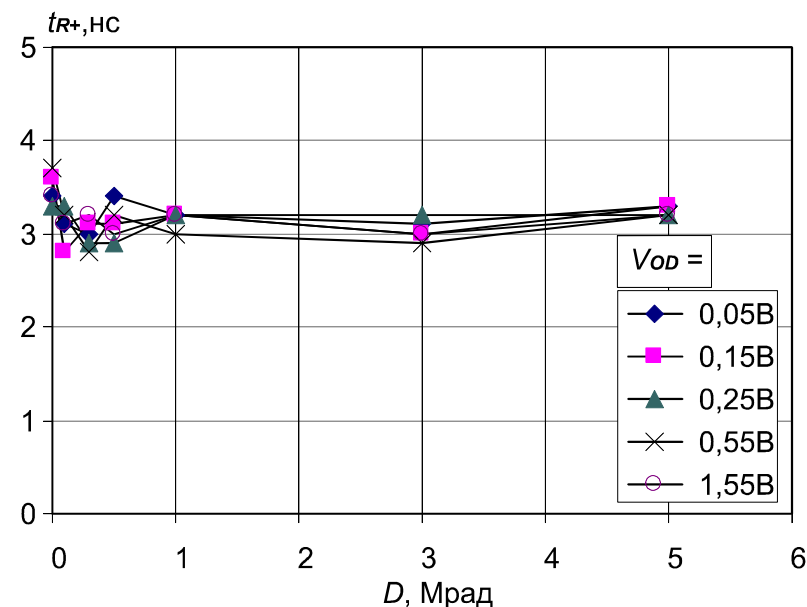
## Серия компараторов (Comp 1-3, Comp 1-4, Comp 1-5, Comp 2)

Параметр	Тип компаратора	
	Comp 1-3	Comp 2
Напряжение питания, В	+5	+5
Ток потребления, мА	12,0	30,0
Входной ток, мкА	5,0	15,0
Выходной ток, мА	4,5	ПЭСЛ - выход
Задержка включения/выключения, нс	6,0	1,5
Длительность фронта нарастания/спада, нс	3,0	1,0

задержка переключения



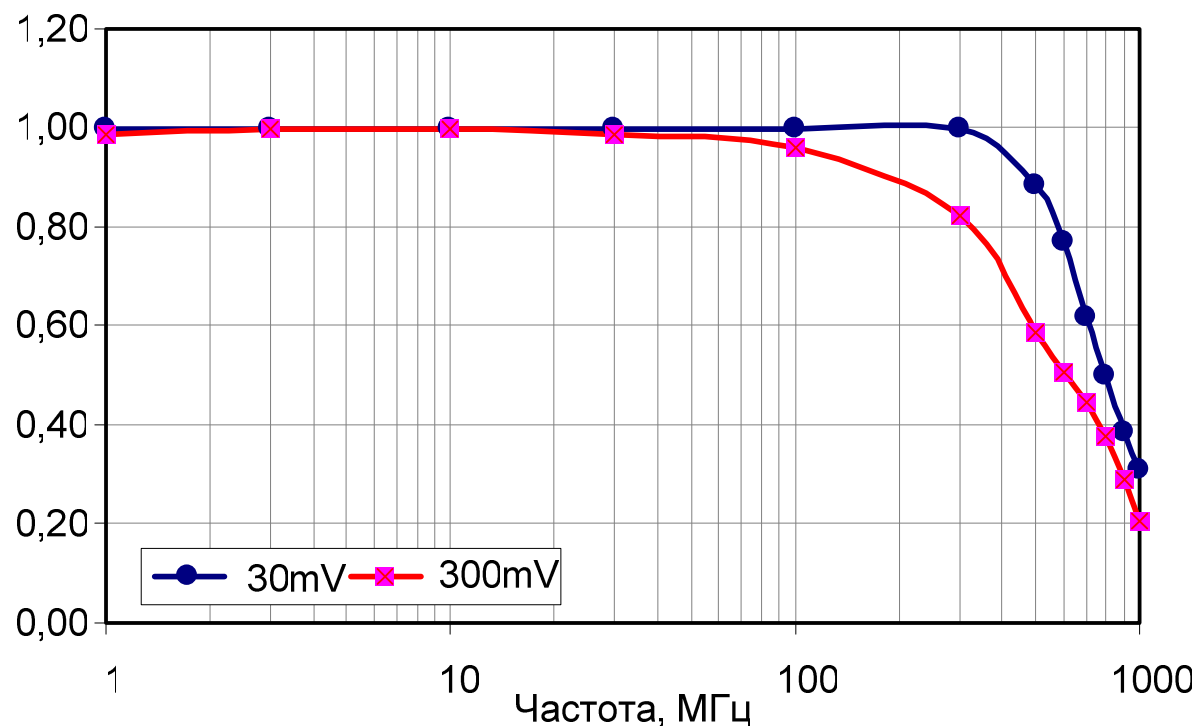
длительность фронта нарастания



Зависимость параметров компаратора Comp 1-3 от поглощенной дозы гамма-излучения

# Типовые схемотехнические решения

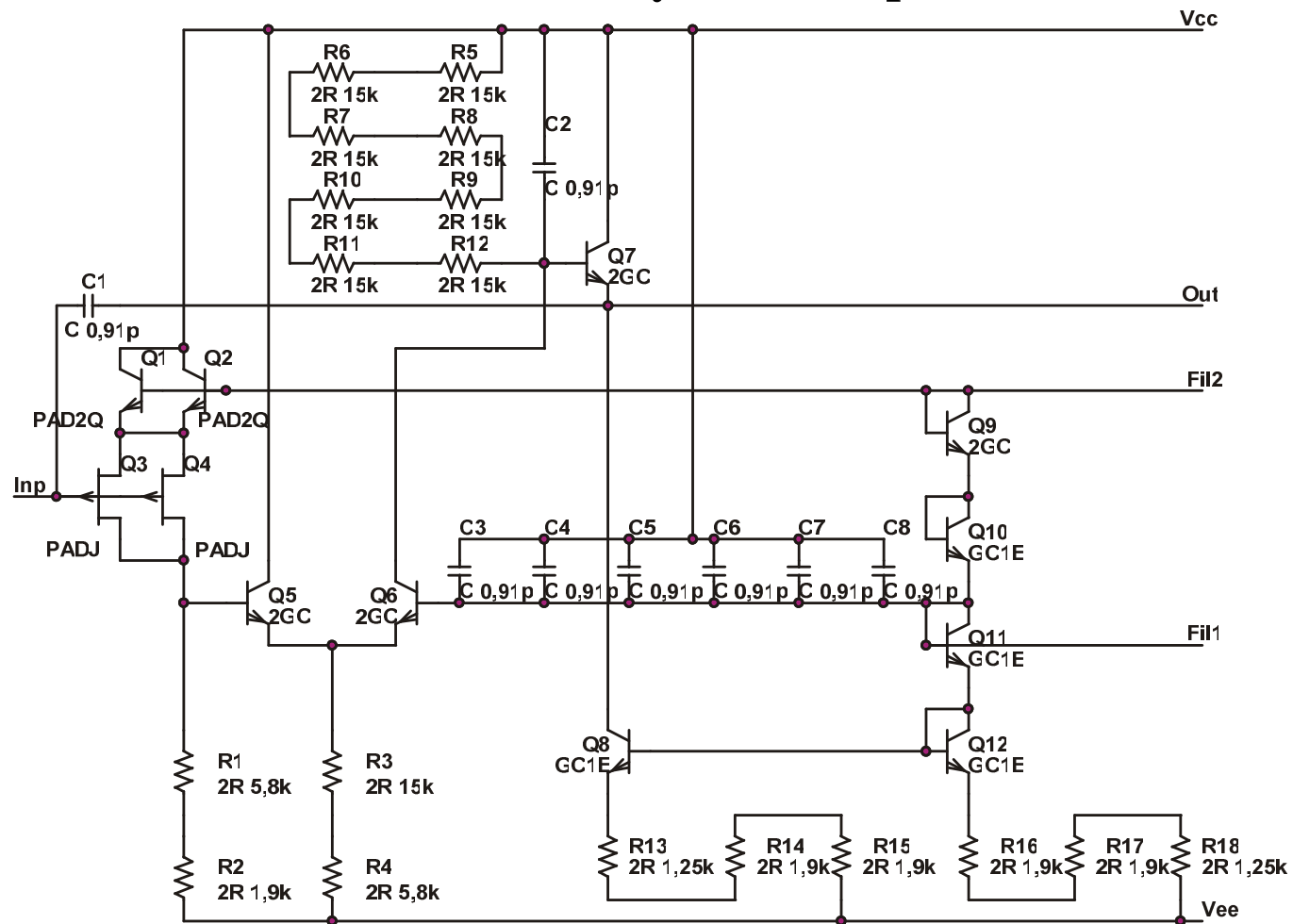
Двухканальный суммирующий аналоговый коммутатор (Comm 9) с полосой пропускания более 400 МГц и двухканальный коммутатор ПЭСЛ- сигналов (Comm 1)



Нормированная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коммутатора Comm 9 при входном синусоидальном сигнале с размахом (от пика до пика) 30 и 300 мВ

# Типовые схемотехнические решения

## Однокаскадные предварительные усилители (Ampl 2, Ampl 3) с головными малошумящими р-ПТП



Электрическая схема усилителя Ampl 2

# Типовые схемотехнические решения

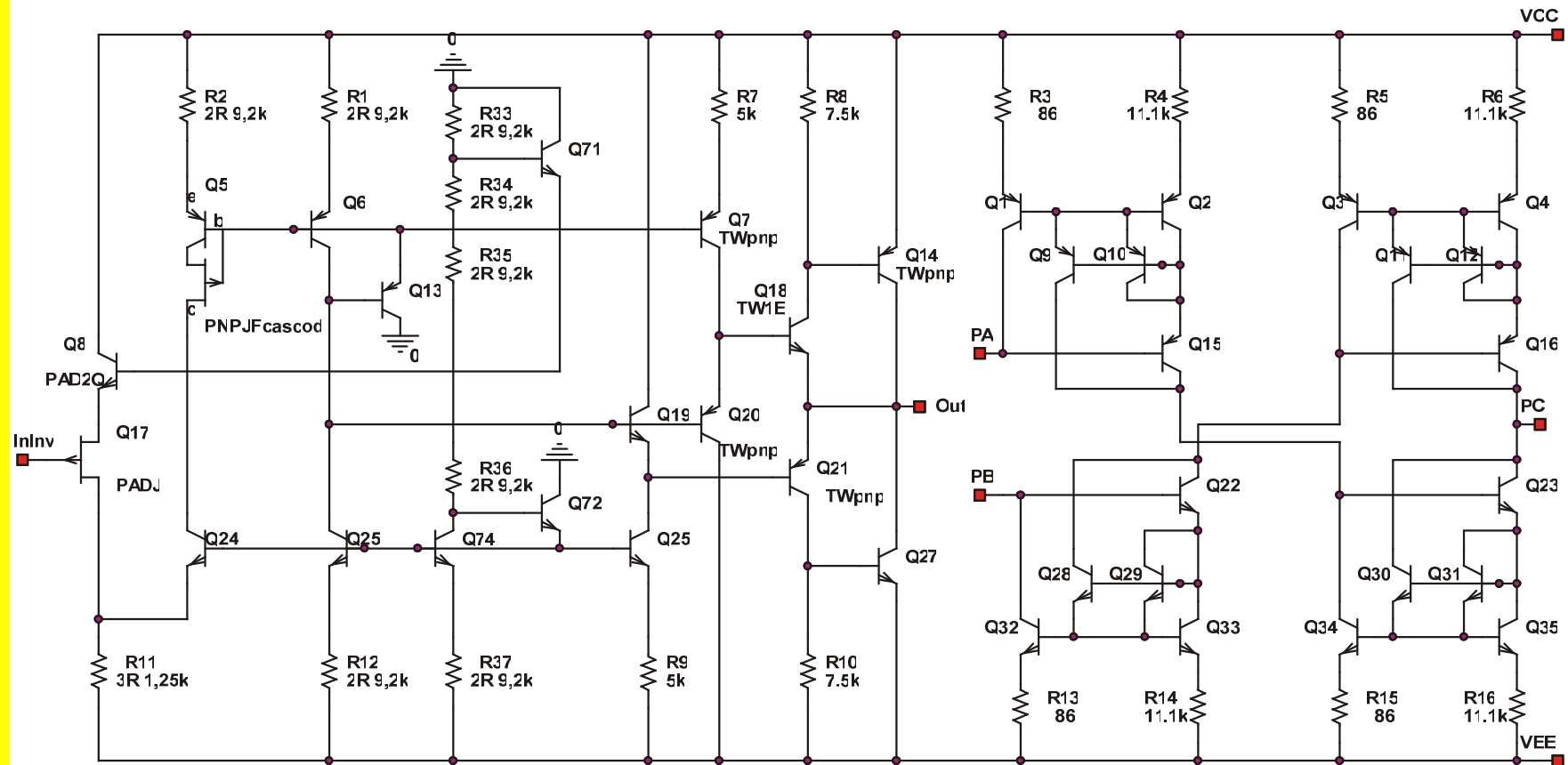
## Однокаскадные предварительные усилители (Ampl 2, Ampl 3) с головными малошумящими p-ПТП

Основные параметры предварительных усилителей

Параметр	Тип усилителя	
	Ampl 2	Ampl 3
Напряжение питания, В	6...8	6...8
Ток потребления, мА	0,35	0,25
Коэффициент усиления напряжения	> 300	> 100
В режиме зарядочувствительного усилителя		
Коэффициент преобразования, мВ/фКл	0,7	0,7
Длительность фронта нарастания, нс	500	200
Входной эквивалентный шумовой заряд, электронов	250+16 пФ <sup>-1</sup>	290+8 пФ <sup>-1</sup>

# Типовые схемотехнические решения

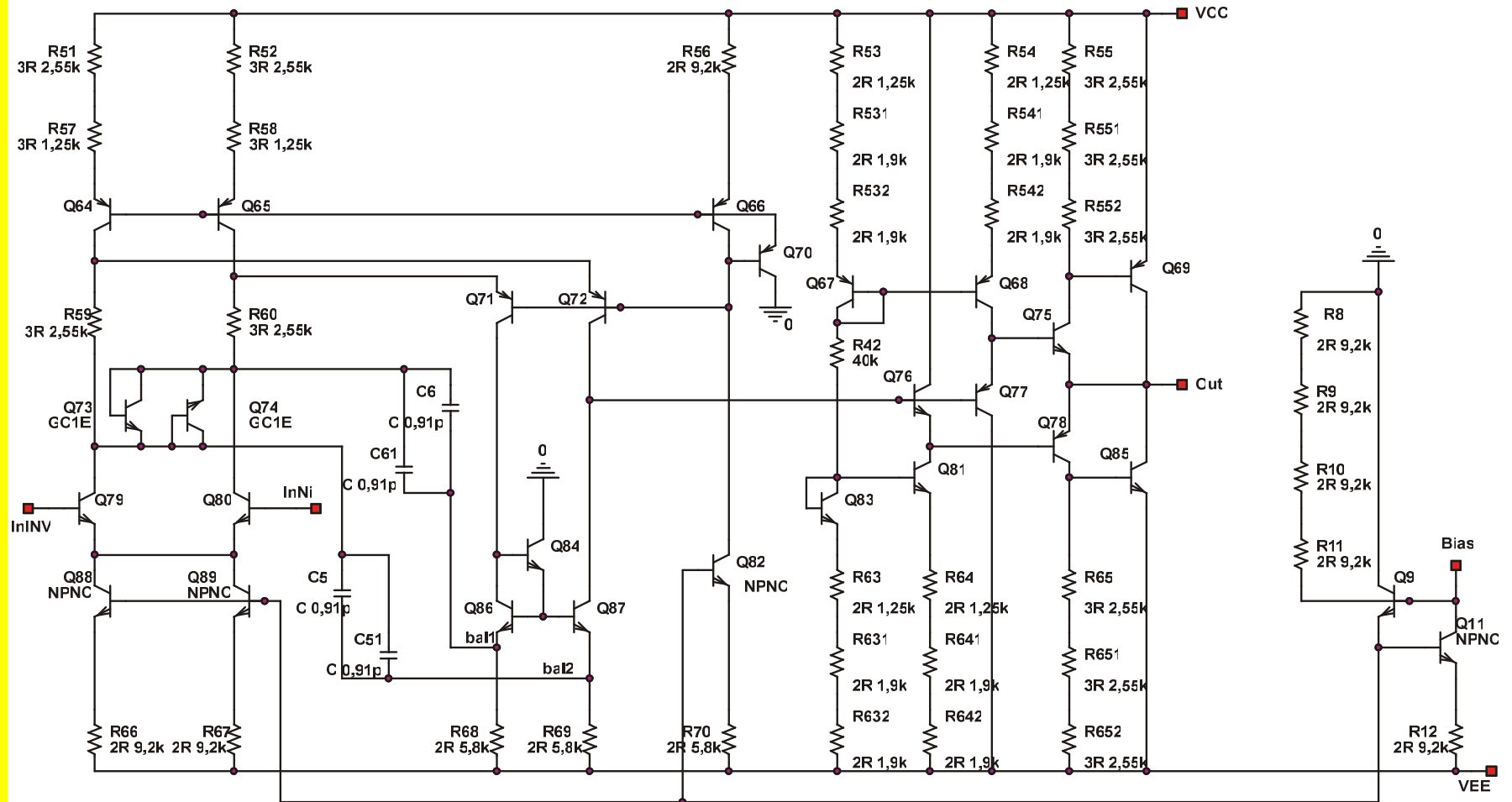
Компоненты аналоговых интерфейсов датчиков: ОУ (AmplU1) с компенсацией входного тока, ОУ без компенсации входного тока (AmplU2), инвертирующий усилитель напряжения (AmplU4) с головным малошумящим р-ПТТ, токовый аттенюатор (СМ)



Электрическая схема усилителя AmplU4 и токового аттенюатора СМ

# Типовые схемотехнические решения

## Компоненты аналоговых интерфейсов датчиков

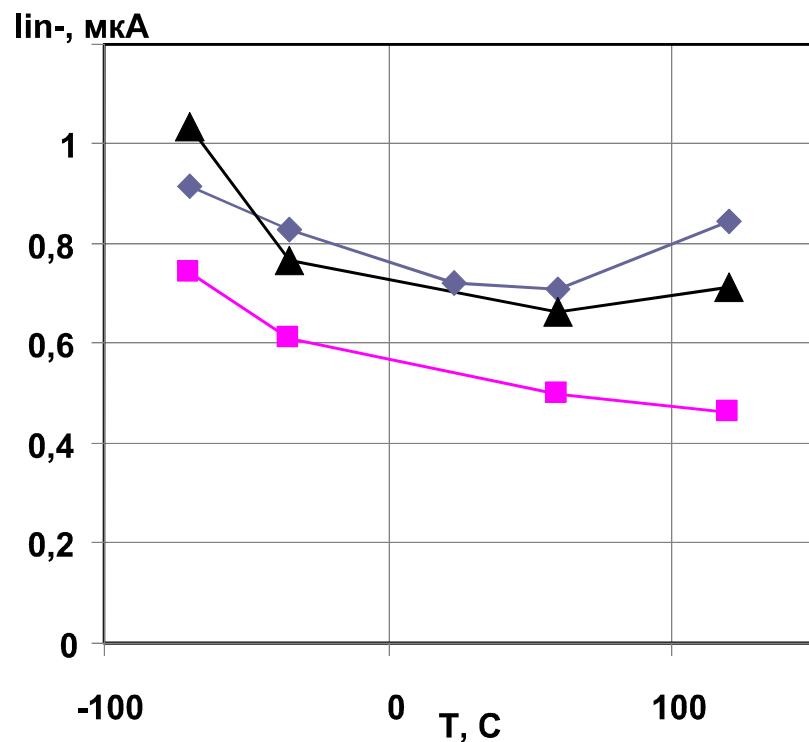


Электрическая схема усилителя Ампл U2

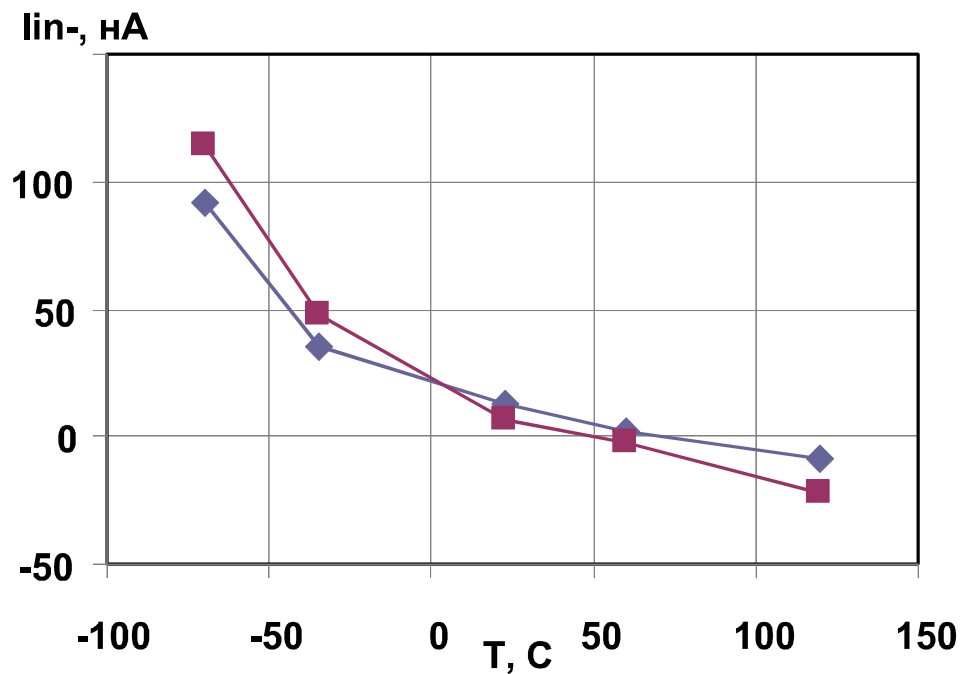


# Типовые схемотехнические решения

## Компоненты аналоговых интерфейсов датчиков



для ОУ AmplU2

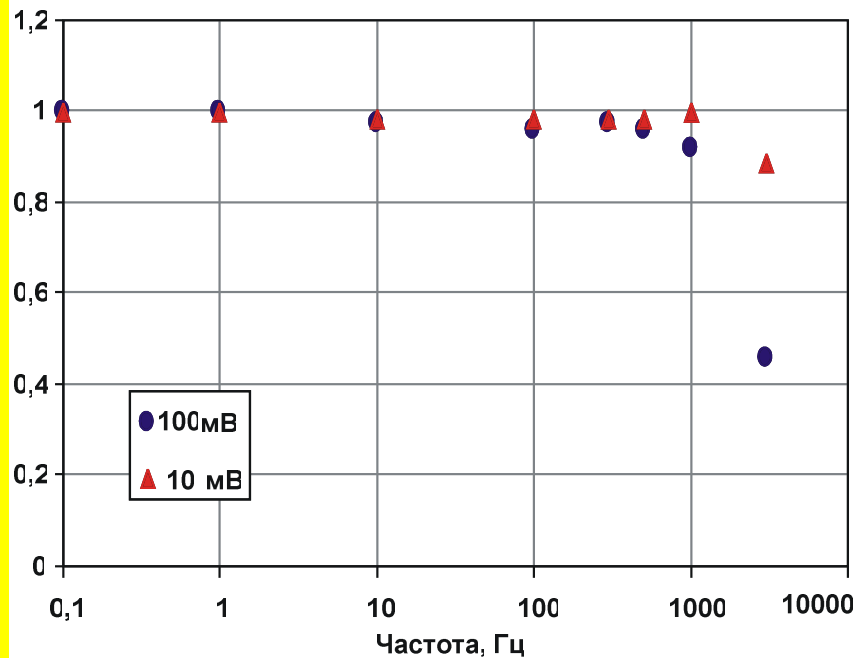


для ОУ AmplU1

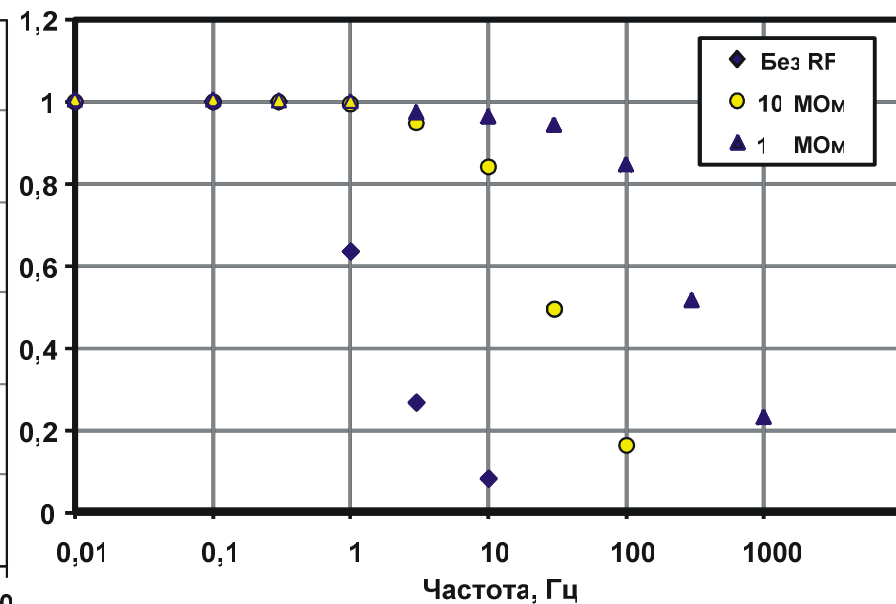
Зависимость входного тока от температуры

# Типовые схемотехнические решения

## Компоненты аналоговых интерфейсов датчиков



инструментального усилителя на ОУ AmplU2  
при коэффициенте усиления, равном 17, и  
разном входном напряжении

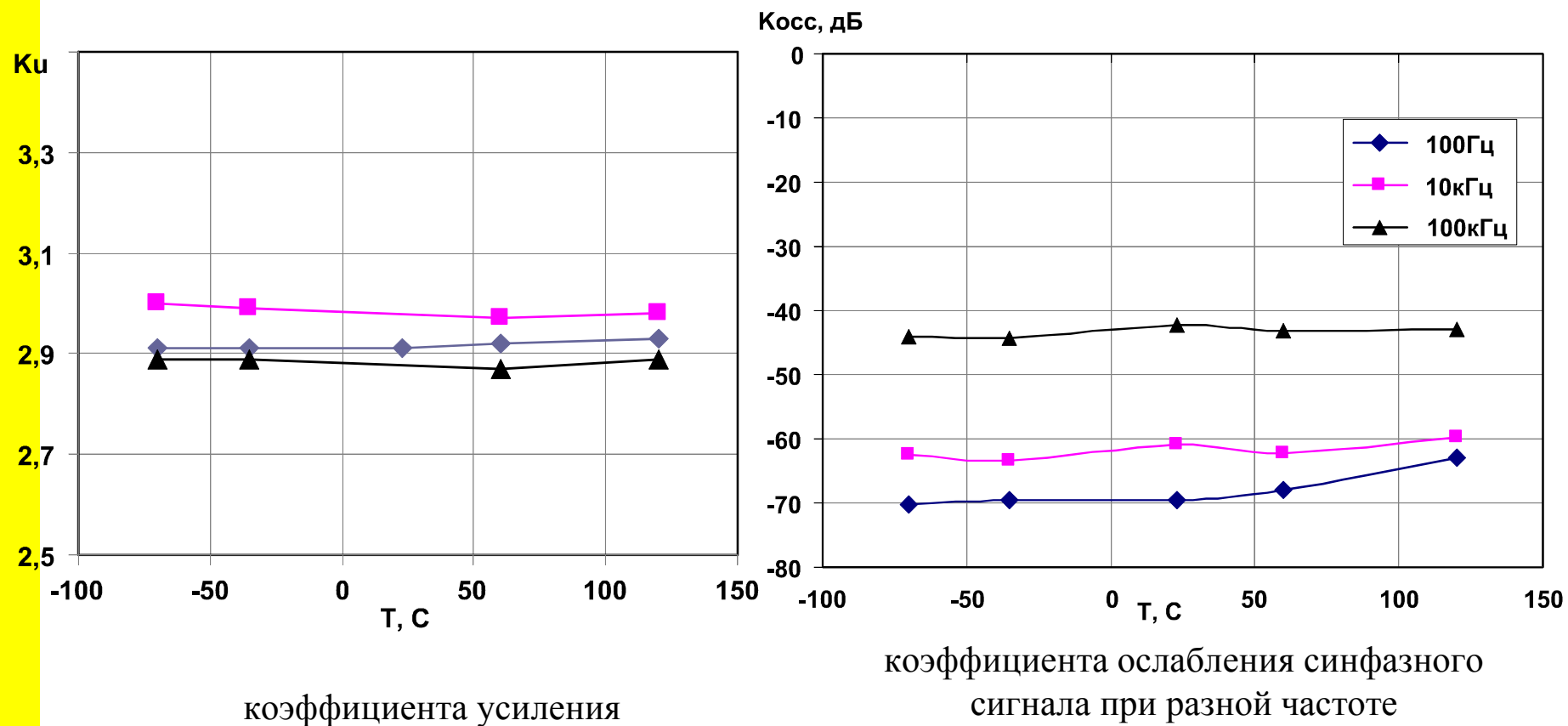


ОУ AmplU1 с разной величиной  
резистора обратной связи RF

Нормированная АЧХ аналоговых устройств

# Типовые схемотехнические решения

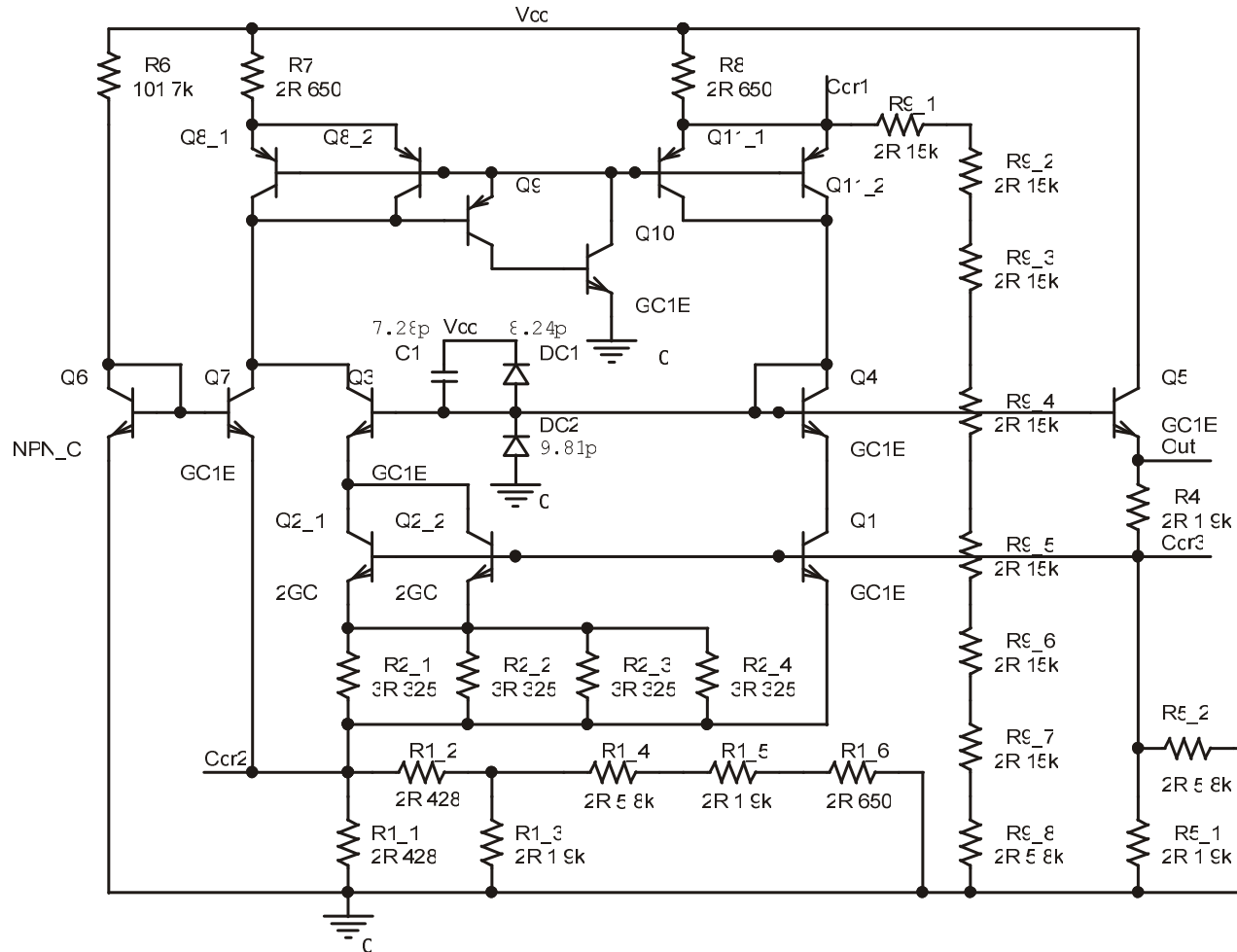
## Компоненты аналоговых интерфейсов датчиков



Зависимость параметров инструментального усилителя на ОУ AmplU2 от температуры

# Типовые схемотехнические решения

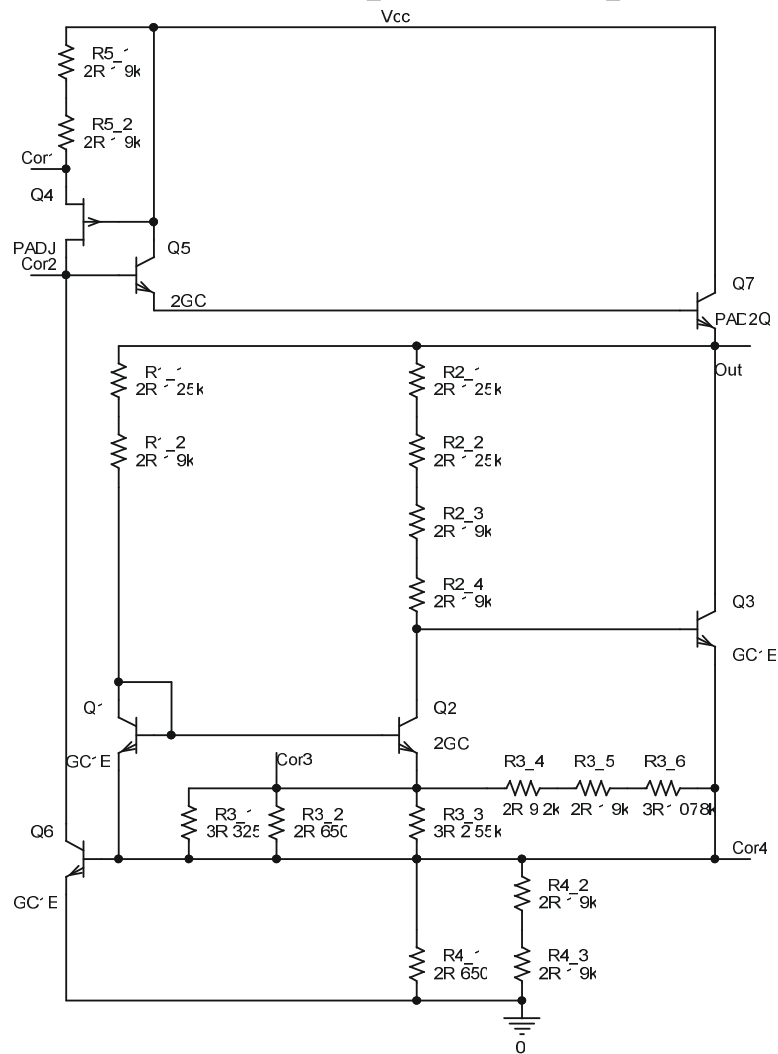
## Источники опорного напряжения



Электрическая схема источника опорного напряжения *ref\_5*

# Типовые схемотехнические решения

## Источники опорного напряжения



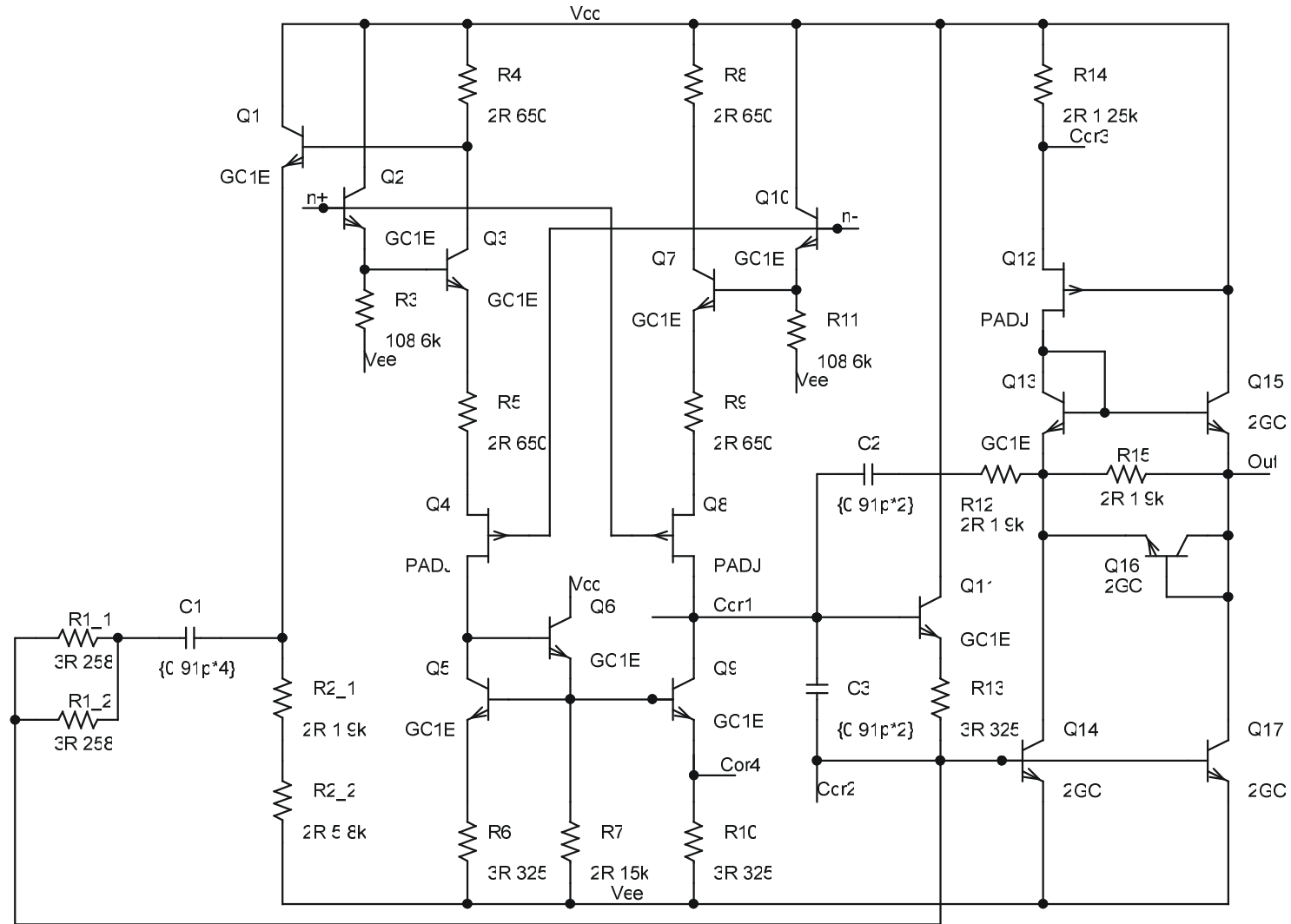
Электрическая схема источника опорного напряжения  $ref\_St$

# Типовые схемотехнические решения

Наименование параметра	Результаты моделирования	
	RefSt <sup>1</sup>	Ref5 <sup>2</sup>
Номинальное выходное напряжение при температуре, равной 27°C, В	2,955	2,506
Разность выходных напряжений при температурах, равных минус 60 и 125°C, мВ	0,318	-0,091
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения в температурном диапазоне от минус 60 до 125°C, мВ	-3,559 +11,185	-15,427 +0,268
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при изменении напряжения питания в диапазоне ±0,5 В, мВ	±0,046	-0,751
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при допустимом разбросе параметров n-p-n-транзисторов, мВ	-20,102 +31,173	-7,800 +8,608
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при допустимом разбросе сопротивлений резисторов, мВ	-19,517 +23,392	-20,005 +16,808
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при воздействии потока нейтронов 10 <sup>13</sup> н/см <sup>2</sup> (10 <sup>14</sup> н/см <sup>2</sup> ), мВ	5,099 (47,586)	6,424 (48,361)
Максимальное отклонение выходного напряжения от номинального значения при поглощенной дозе гамма облучения 500 кРад (1 Мрад), мВ	8,080 (25,264)	30,337 (40,329)
Среднеквадратическое значение выходного шума, мВ	1,277	0,420
Примечание		
<sup>1</sup> при напряжении питания, равном 8 В, и сопротивлении нагрузки 150 Ом		
<sup>2</sup> при напряжении питания, равном 5 В, в режиме холостого хода		

# Типовые схемотехнические решения

## Радиационно-стойкий ОУ типа RHAmpI



Электрическая схема ОУ типа RHAmpI

# Типовые схемотехнические решения

## Радиационно-стойкий ОУ типа RHAmp1

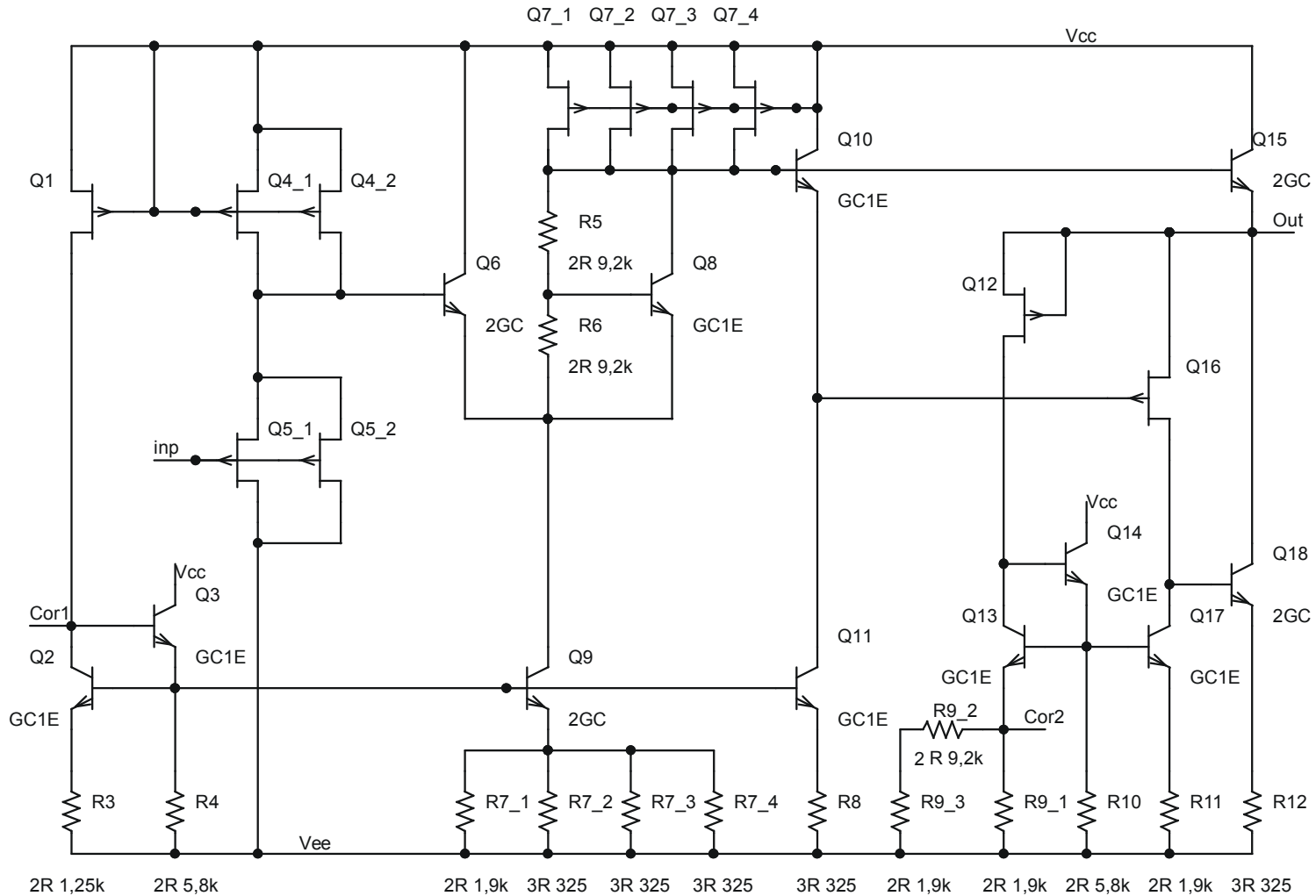
Параметр	Результаты моделирования	
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	5,3	
Допустимое выходное напряжение, В	от -4,7 до 3,3	
Полоса пропускания при единичном усилении, МГц	259,4	
Запас фазы при единичном усилении, градусов	51,5	
Скорость нарастания (спада) выходного напряжения, В/мкс	252 (339)	
Среднеквадратическое значение шума, приведенное к входу, мкВ	7,48	
в полосе частот до 1 МГц	24,22	
в полосе частот до 10 МГц	188,22	
в полосе частот до 100 МГц		
Входной ток, мкА	в нормальных условиях	0,55
	при воздействии потока нейтронов $10^{14}$ н/см <sup>2</sup>	0,91
Напряжение смещения нуля, мВ	в нормальных условиях	-1,466
	при воздействии потока нейтронов $10^{14}$ н/см <sup>2</sup>	-1,235
Коэффициент усиления	в нормальных условиях	46480
	при воздействии потока нейтронов $10^{14}$ н/см <sup>2</sup>	28890

Основные параметры ОУ (RHAmp1) при сопротивлении нагрузки 2 кОм и напряжении питания, равном  $\pm 5,0$  В



# Типовые схемотехнические решения

## Повторитель напряжения типа Follower



Электрическая схема Follower

# Типовые схемотехнические решения

## Повторитель напряжения типа Follower

Параметр	Результаты моделирования	
Ток потребления в режиме холостого хода, мА	5,2	
Максимальное входное напряжение для коэффициента передачи более 0,9, В	$\pm 2,4$	
Максимальное входное напряжение для коэффициента передачи более 0,5, В	от минус 3,4 до 4,1	
Скорость нарастания (спада) выходного напряжения, В/мкс	358 (521)	
Среднеквадратическое значение выходного шума, мВ	0,258	
Максимальный входной ток в нормальных условиях, пА	1,000	
Напряжение смещения нуля, мВ	в нормальных условиях	-0,191
	при воздействии потока нейтронов $10^{17}$ н/см <sup>2</sup>	17,050
Коэффициент передачи	в нормальных условиях	0,950
	при воздействии потока нейтронов $10^{17}$ н/см <sup>2</sup>	0,945

Основные параметры повторителя при сопротивлении нагрузки 2 кОм и напряжении питания, равном  $\pm 5,0$  В

# Выводы

**1. Для проектирования и производства радиационно-стойких аналоговых микросхем созданы:**

- базовый матричный кристалл «АБМК-1.3» с универсальными конструкциями активных элементов, номенклатурой и количеством активных и пассивных элементов, ориентированными на создание быстродействующих и малошумящих аналоговых микросхем;**
- «Spice-модели», учитывающие существующий технологический разброс параметров и влияние проникающей радиации разных видов;**
- библиотека стандартных решений аналоговых компонентов трех различных уровней радиационной стойкости;**
- модернизированный маршрут проектирования радиационно-стойких микросхем.**

# Выводы

**2. Проектирование микросхем на «АБМК-1.3» возможно как на уровне интегральных элементов, так и компонентов библиотеки. Последний случай предпочтителен при создании радиационно-стойких специализированных микросхем, так как уменьшает «риск» проектирования, материальные и временные затраты на сертификацию микроэлектронного устройства.**

**3. Если компоненты библиотеки «АБМК-1.3» не обеспечивают требуемые параметры изделия, то рекомендуется выполнение их модернизации в соответствии с разработанными правилами синтеза и/или применение отдельных фрагментов из рассмотренных схемотехнических решений, моделирование радиационного изменения параметров и дополнительные сертификационные испытания микроэлектронного устройства.**