

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем проектирования в микроэлектронике
Российской академии наук (ИППМ РАН)**

Библиотека схемотехнических решений

**Низкотемпературный усилитель тока с коэффициентом передачи больше
единицы для задач проектирования активных RC-фильтров**

Денисенко Д.Ю., d.u.denisenko@gmail.com,
Бугакова А.В., annabugakova.1992@mail.ru,
Пахомов И.В., ilyavpakhomov@gmail.com,
Клейменкин Д.В., k-dima-01@mail.ru,
Овсепян Е.В., ovsepyan.elenka@bk.ru

**Научно-исследовательская лаборатория проблем проектирования в
экстремальной микроэлектронике ИППМ РАН и Донского
государственного технического университета (г. Ростов-на-Дону)**

1. Области применения низкотемпературных усилителей тока

Низкотемпературный усилитель тока (УТ) может быть использован в качестве функционального узла активных RC-фильтров (АРСФ) ВЧ и СВЧ диапазонов, в т.ч. работающих при низких температурах и в условиях воздействия проникающей радиации.

УТ и так называемые токовые зеркала [1-2] начинают широко применяться в качестве активных элементов при построении СВЧ устройств частотной селекции [см., например, патент фирмы National Semiconductor (США) US 6606001, патентную заявку фирмы Qualcomm (США) US2011/0090824 и др.]. Архитектуры АРСФ на усилителях тока оказываются более высокочастотными, чем традиционные АРСФ на усилителях напряжения. Это связано с тем, что такие структуры имеют при небольшом усилении по току ($K_i=1-5$) более широкий частотный диапазон.

На рис. 1 представлена схема классического CMOS УТ в структуре СВЧ фильтра нижних частот.

Существенный недостаток УТ рис. 1 состоит в том, что он оказывается неработоспособным при реализации на JFet полевых транзисторах, обеспечивающих экстремально малый уровень шумов, высокую радиационную стойкость и стабильную работу в диапазоне криогенных температур [3]. Это связано с несовпадающей полярностью напряжений затвор-исток и сток-исток полевых транзисторов данного класса. Кроме этого, классические схемы CMOS УТ имеют только инвертирующий токовый выход. В тоже время для многих задач аналого-цифрового усиления и фильтрации сигналов крайне необходимы сверхширокополосные УТ, имеющие также неинвертирующий токовый выход, для которого коэффициент передачи по входному току (K_i) лежит в диапазоне 1-5 единиц.

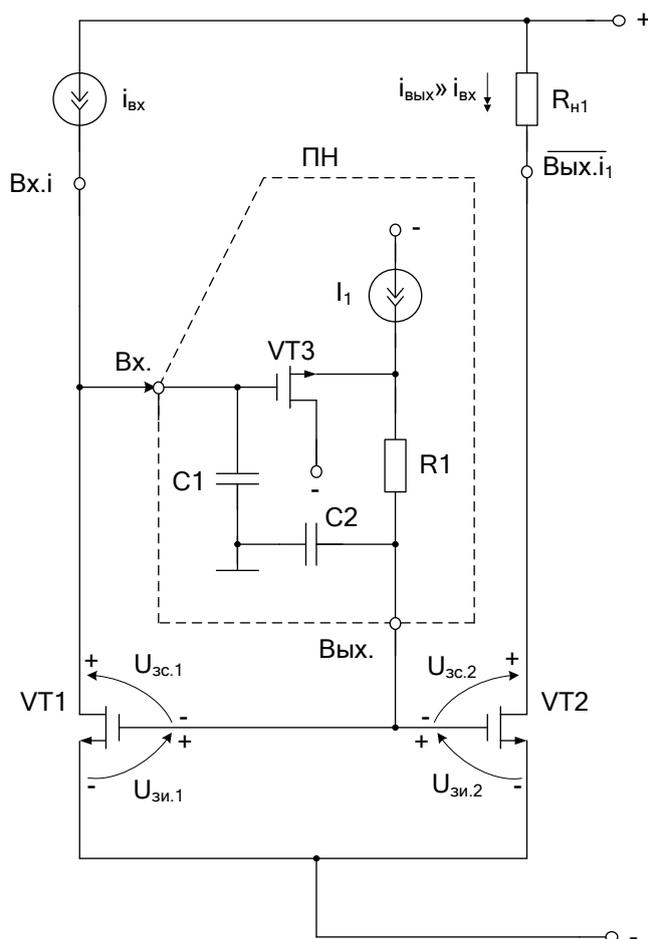


Рисунок 1 - Схема классического CMOS УТ в структуре СВЧ фильтра нижних частот

2. Текстовое описание схемы фильтра рис.2

На рис. 2 показана предлагаемая схема низкотемпературного УТ [1]. Задача данного технического решения - создание как инвертирующего, так и неинвертирующего широкополосного УТ на комплементарных полевых транзисторах с управляющим р n-переходом для работы при низких температурах, обеспечивающего для разных выходов инвертирующее и неинвертирующее преобразование входного токового сигнала с коэффициентом передачи по току больше единицы ($K_i=1-5$).

В частном случае, на рис. 2 неинвертирующий повторитель напряжения (ПН) реализован, так же как и в УТ рис. 1, на полевом транзисторе VT3, статический режим которого устанавливается двухполюсником П1. Кроме этого, данный неинвертирующий ПН содержит частотозадающие элементы C1, C2 и R1, которые обеспечивают формирование на базе схемы рис. 2 амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) фильтра нижних частот.

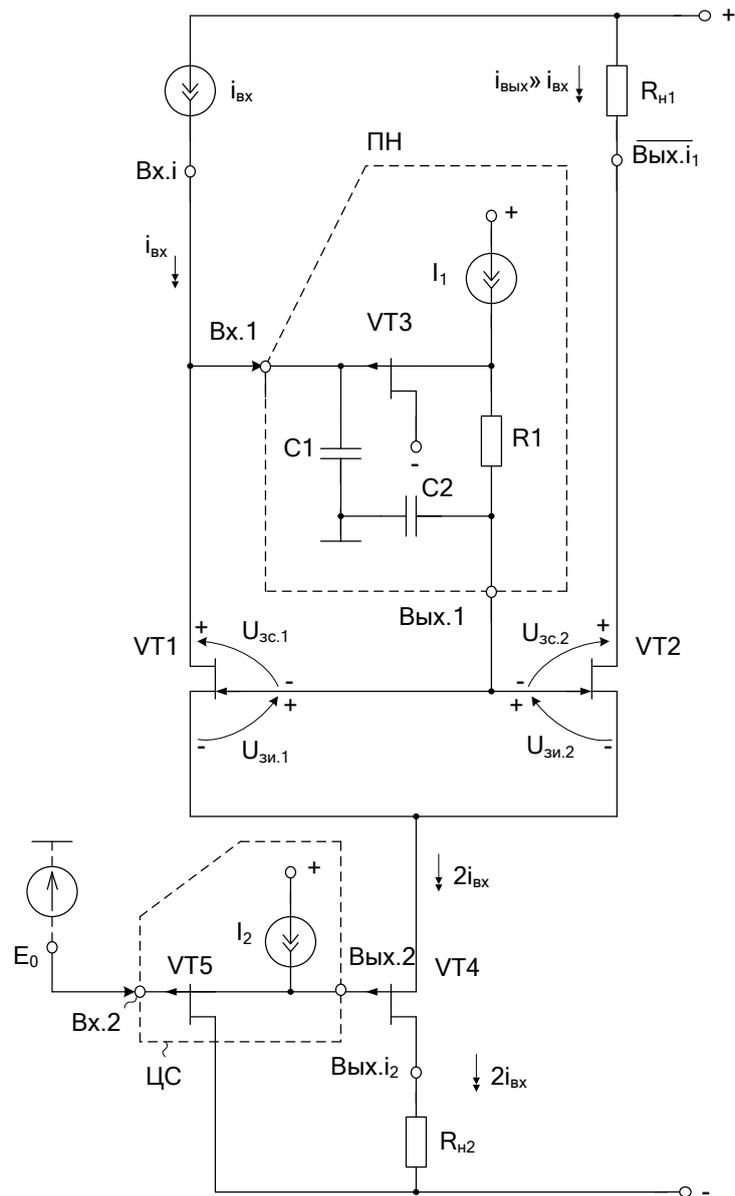


Рисунок 2 - Схема низкотемпературного УТ [1]

На рис. 3 в качестве полевого транзистора VT2 используется составной полевой транзистор, содержащий N элементарных полевых транзисторов с управляющим p-n переходом (VT2.1...VT2.N), включенных параллельно друг другу по цепям затвора, стока и истока.

Приращение входного тока УТ на величину $i_{вх}$ приводит к изменению потенциала на входе неинвертирующего ПН, которое передается на затворы полевых транзисторов VT1, VT2. Как следствие, ток стока полевого транзистора VT1 $i_{с1}=i_{вх}$. Учитывая, что полевые транзисторы VT1, VT2 включены параллельно, и они имеют высокую идентичность стоко-затворных характеристик, это приводит к изменению тока стока полевого транзистора VT2 на величину $i_{вх}$. Так как полевой транзистор VT2 может выполняться в виде нескольких (N) параллельно включенных полевых транзисторов, то ток по инвертирующему выходу $\overline{\text{Вых.}}i_1$ принимает значение $N \cdot i_{вх}$. Этой же величине будет равна и сумма токов истоков транзисторов VT2.1...VT2.N. В результате ток истока полевого транзистора VT4 с управляющим p-n переходом и, следовательно, выходной ток УТ по неинвертирующему токовому выходу Вых.i2,

принимает значение $(1+N)i_{вх}$. Таким образом, коэффициент усиления по току K_i для неинвертирующего токового выхода $Вых.i2$ определяется числом N параллельно включенных элементарных транзисторов в структуре полевого составного транзистора $VT2$: $K_i=(1+N)$.

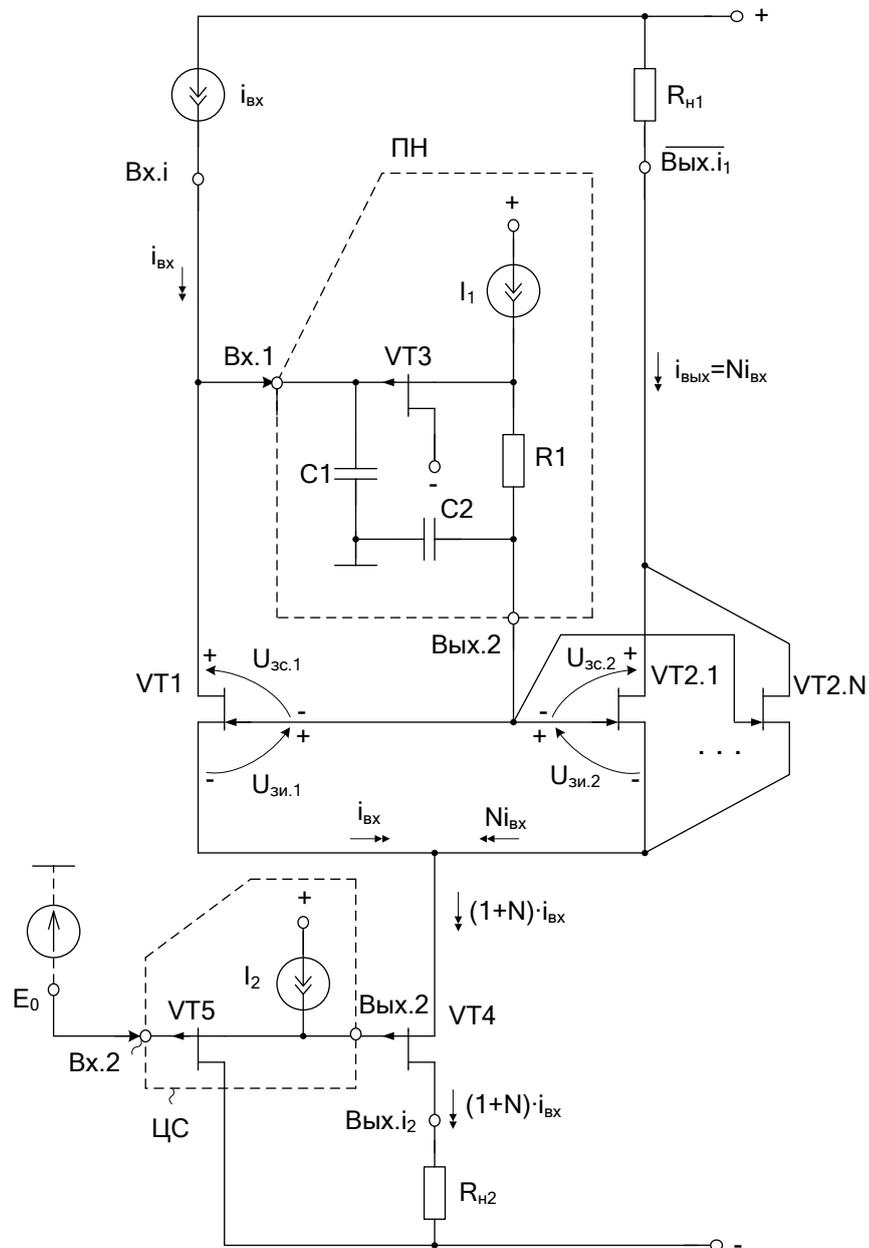


Рисунок 3 - Схема низкотемпературного УТ на составном JFet транзисторе

Необходимый статический режим схемы УТ рис. 3 по напряжениям в ее базовых узлах устанавливается цепью согласования потенциалов ЦС, а при необходимости - дополнительным источником напряжения E_0 . В частных случаях в качестве дополнительного источника E_0 может использоваться напряжение на положительной шине источника питания или напряжение на общей шине источников питания.

Таким образом, схема УТ рис. 3 по неинвертирующему токовому выходу $Вых.i2$ обеспечивает широкополосное неинвертирующее усиление входного тока с $K_i=(1+N)$. Это позволяет выполнять на ее основе разнообразные СВЧ устройства частотной селекции с цепью положительной обратной связи. Кроме этого, схема рис. 3 имеет также инвертирующий токовый выход $\overline{Вых.i1}$, по которому усиление по току равно

$K_i=N$.

В ряде случаев непосредственное формирование селективных свойств УТ рис. 3, например, как фильтра нижних частот, возможно за счет включения в структуру неинвертирующего повторителя напряжения ПН дополнительных частотоподающих элементов. На схемах рис.2 и рис. 3 это конденсаторы $C1, C2$ и резистор $R1$, а также полевой транзистор $VT3$ с управляющим р-п переходом, статический режим которого устанавливается двухполюсником П.

В тех случаях, когда по условиям применения предлагаемого УТ необходимо иметь идентичные коэффициенты передачи по инвертирующему и неинвертирующему токовым выходам, следует применять схему УТ рис. 4, в которой за счет полевого транзистора $VT3$ с управляющим р-п переходом обеспечивается равенство $i_{\text{Вых.2}}=i_{\text{Вх}}$.

На рис. 4 показана схема УТ с предельно широким диапазоном рабочих частот.

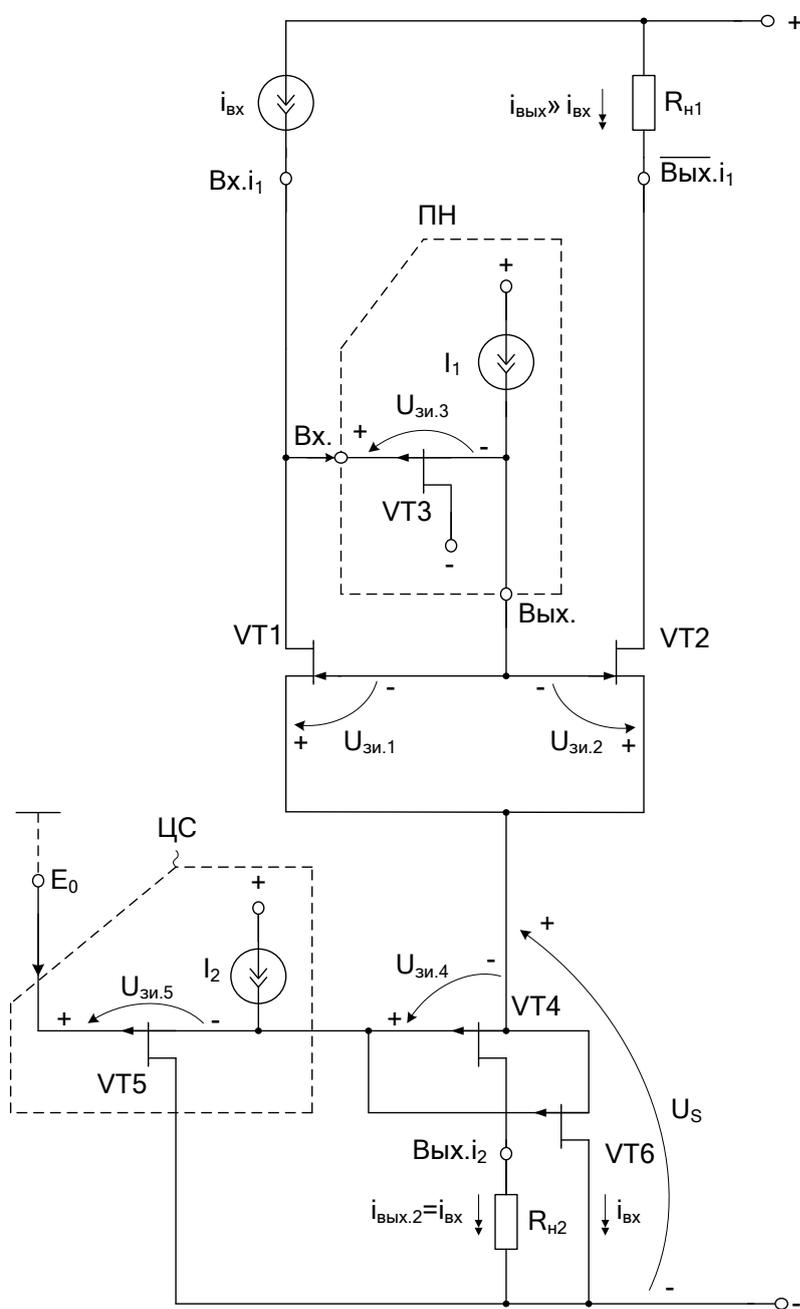


Рисунок 4 - Схема УТ с широким диапазоном рабочих частот

3. Результаты компьютерного моделирования предлагаемого низкотемпературного усилителя тока

На рис. 5 показан статический режим схемы УТ рис. 2 с при $t=27^{\circ}\text{C}$, $I_3=100\text{ мкА}$ для случая, когда в качестве источника напряжения смещения (E_0) используется напряжение на положительной шине источника питания. Моделирование УТ рис.2 проводилось в среде LTspice.

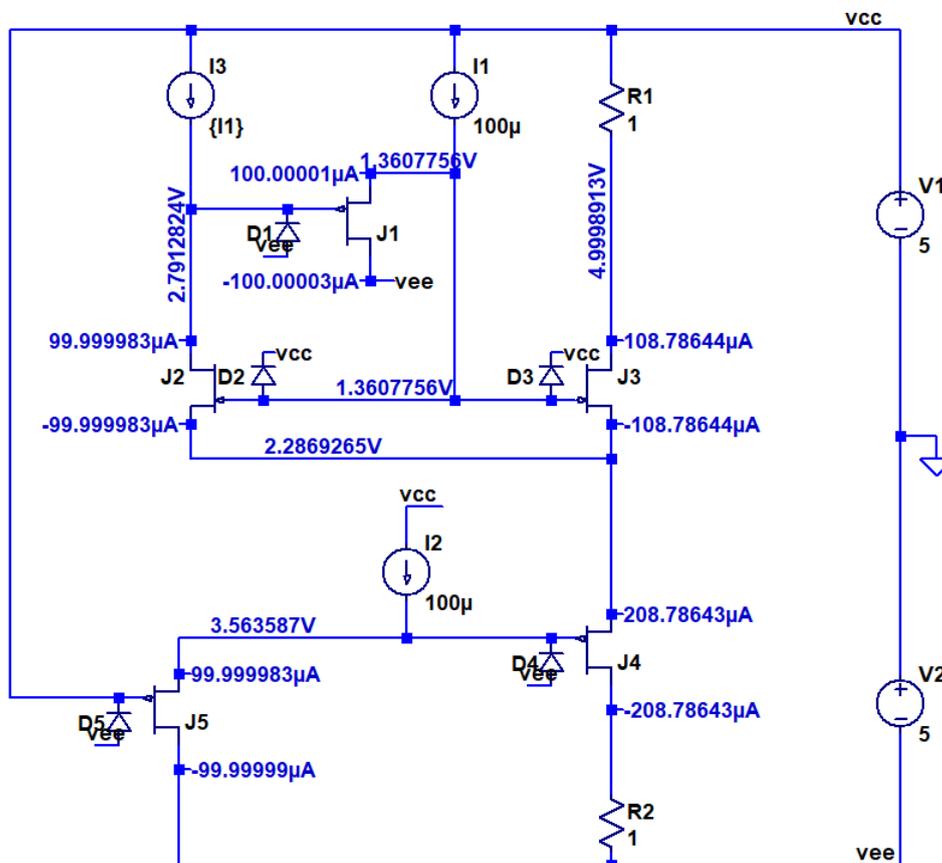


Рисунок 5 - Статический режим схемы УТ рис. 2

На рис. 6 представлены зависимости выходных токов УТ рис. 5 от входного тока при $t=27^{\circ}\text{C}$.

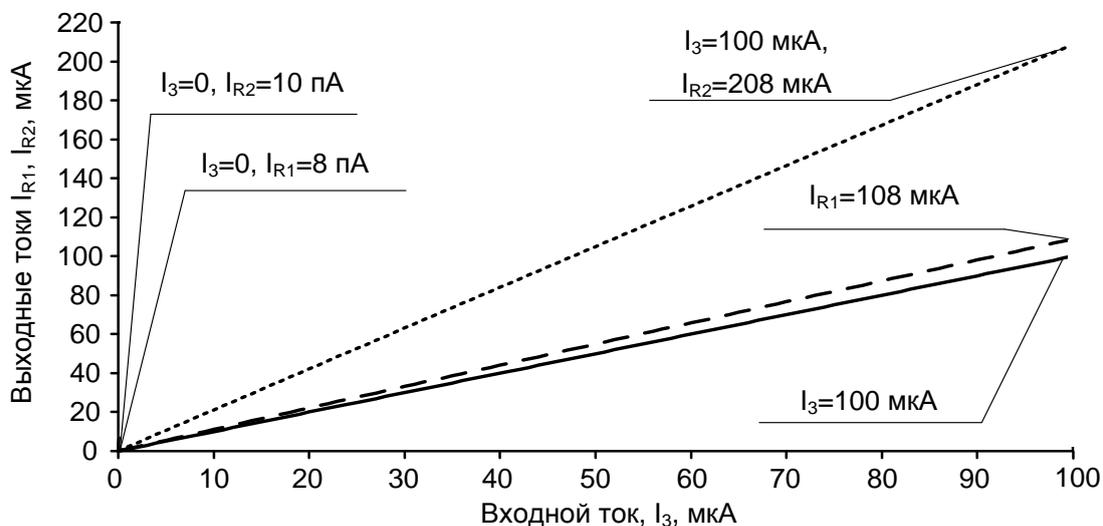


Рисунок 6 - Зависимости выходных токов УТ рис. 5 от входного тока

На рис. 7 приведен статический режим схемы УТ рис. 2 с при $t=-197^{\circ}\text{C}$, $I_3=100\text{ мкА}$ для случая, когда в качестве источника напряжения смещения (E_0) используется напряжение на положительной шине источника питания.

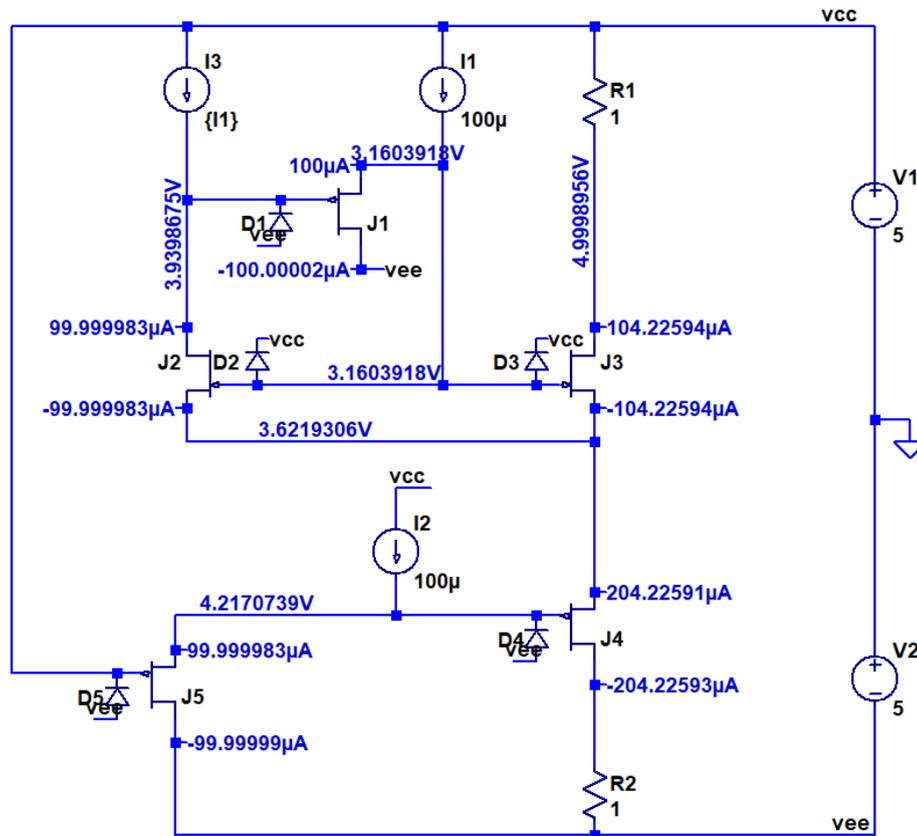


Рисунок 7 - Статический режим схемы УТ рис. 2 с при $t=-197^{\circ}\text{C}$, $I_3=100\text{ мкА}$

На рис. 8 показаны зависимости выходных токов УТ рис. 7 от входного тока I_3 при $t=-197^{\circ}\text{C}$.

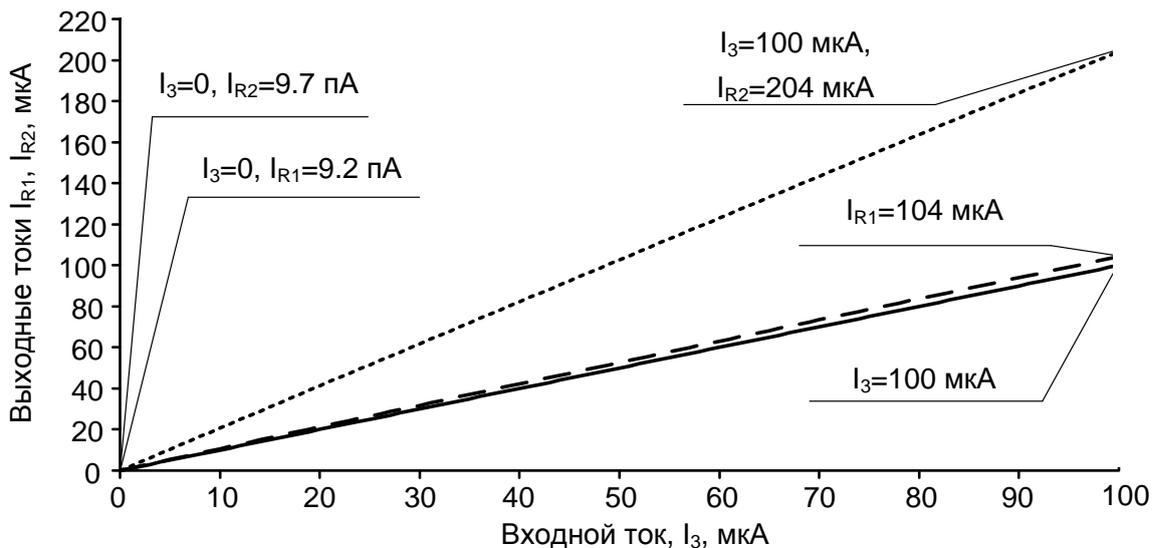


Рисунок 8 - Зависимости выходных токов УТ рис. 7 от входного тока

На рис. 9 представлен статический режим схемы УТ рис. 2 при $t=27^{\circ}\text{C}$, $I_3=100\text{ мкА}$ для случая, когда в качестве источника напряжения смещения (E_0) используется напряжение на общей шине источников питания.

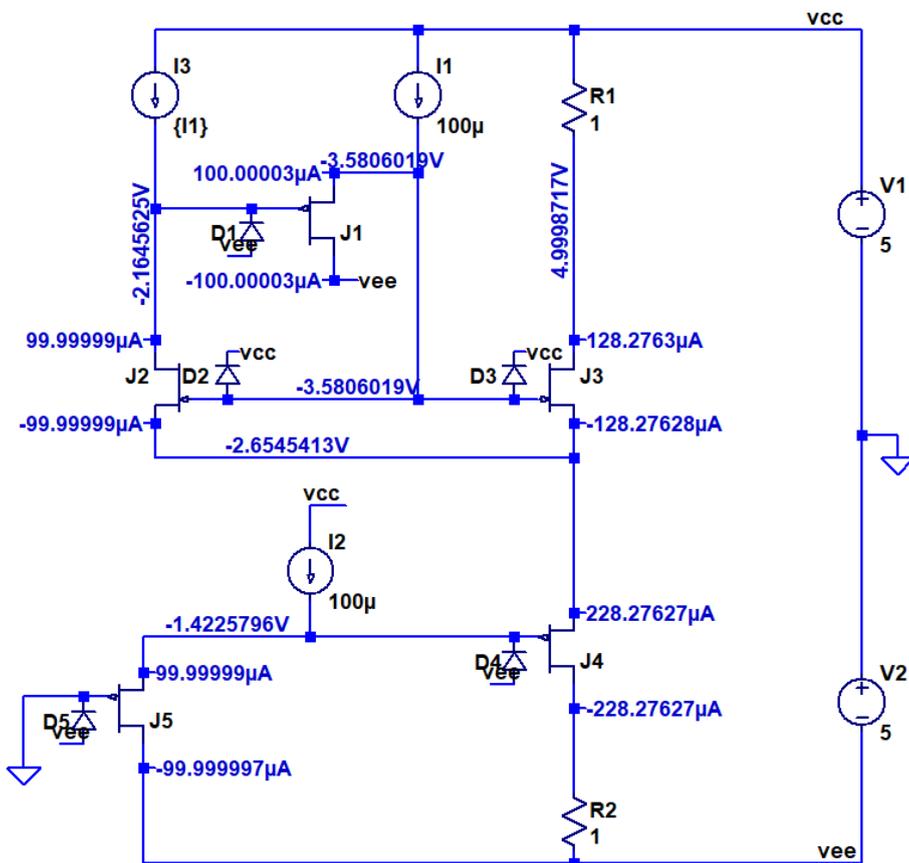


Рисунок 9 - Статический режим схемы УТ рис. 2 при $t=27^{\circ}C$, $I_3=100$ мкА

На рис. 10 приведены зависимости выходных токов УТ рис. 9 от входного тока I_3 при $t=27^{\circ}C$.

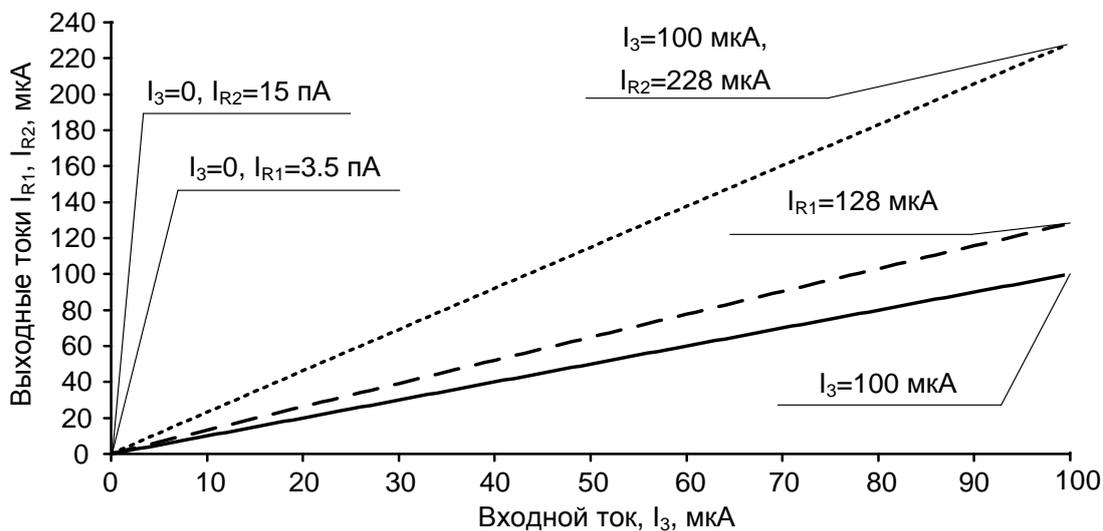


Рисунок 10 - Зависимости выходных токов УТ рис. 9 от входного тока I_3 при $t=27^{\circ}C$

На рис. 11 показан статический режим схемы УТ рис. 2 с при $t=-197^{\circ}C$, $I_3=100$ мкА для случая, когда в качестве источника напряжения смещения (E_0) используется напряжение на общей шине источников питания.

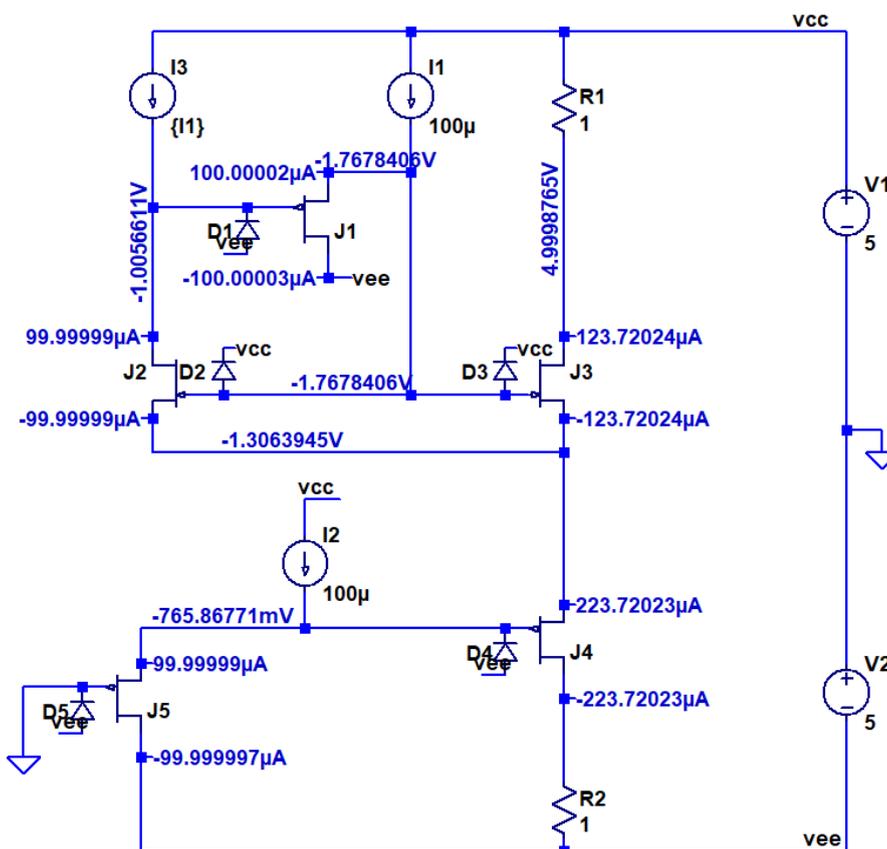


Рисунок 11 - Статический режим схемы УТ рис. 2 с при $t=-197^{\circ}\text{C}$, $I_3=100\text{ мкА}$

На рис. 12 представлены зависимости выходных токов УТ рис. 11 от входного тока I_3 при $t=-197^{\circ}\text{C}$.

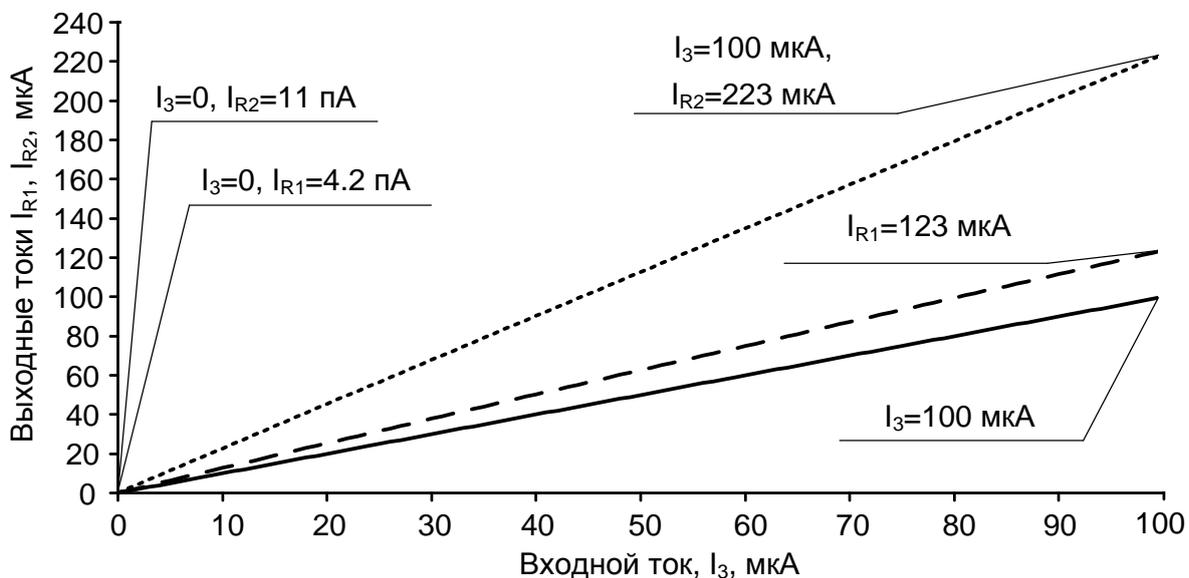


Рисунок 12 - Зависимости выходных токов УТ рис. 11 от входного тока I_3 при $t=-197^{\circ}\text{C}$

Разработка выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект 18-79-10109)

4. Netlist в среде Microcap

```
* D:\simulation\LTSpice\Scheme_194(токовые зеркала)\П8999.asc
V1 vcc 0 5 Rser=0.00001
I1 vcc N001 100μ
V2 0 vee 5
J3 N003 N001 N004 JN260_2 {JNV}
J2 N002 N001 N004 JN260_2 {JNV}
D4 vee N005 DJP50_2 {JPV}
J4 N006 N005 N004 JP50_2 {JPV}
I2 vcc N005 100μ
R1 vcc N003 1
R2 N006 vee 1
J1 vee N002 N001 JP50_2 {JPV}
D1 vee N002 DJP50_2 {JPV}
D3 N001 vcc DJN260_2 {JNV}
D2 N001 vcc DJN260_2 {JNV}
I3 vcc N002 {I1}
D5 vee vcc DJP50_2 {JPV}
J5 vee vcc N005 JP50_2 {JPV}
.model D D
.lib C:\Users\Elija\OneDrive\Documents\LTSpiceXVII\lib\cmp\standard.dio
.model NJF NJF
.model PJF PJF
.lib C:\Users\Elija\OneDrive\Documents\LTSpiceXVII\lib\cmp\standard.jft
.op
.param LT=27
.temp={LT}
* .ac dec 100 1 100Meg
* .tran 0 1m 0 1u
* .step param LT -197 27 2
* .step param Dg 1 1Meg 300
* .step dec param fn 1e12 1e18 1e2
.param fn=1
.param Dg=1
.param V1=1.8
.lib C:\LT\CJFET_5.lib
.param weight=250
.param JNV={weight/260}
.param JPV={weight/50}
.param I1=100u
* .step param I2 10u 100u 5u
* .step param I1 0 100u 1u
.param fit=1
* .step param V1 0 5 10m
```

```
* .param R1=100k
* .param R2=100k
.backanno
.end
```

Список литературы

1. Бугакова А.В., Прокопенко Н.Н., Титов А.Е., Клейменкин Д.В. Низкотемпературный усилитель тока для задач проектирования активных RC-фильтров, № 2020104620/08; заявл. 03.02.2020 (з. 943)
2. Токовые зеркала для проектирования КМОП аналоговых микросхем: основные модификации (ТЗ №1-№ 36) / Прокопенко Н.Н., Титов А.Е., Бутырлагин Н.В. // Библиотека схемотехнических решений. ИППИМ РАН, 2019, С. 1-29. URL: <http://www.ippm.ru/data/eljrnal/paper/J4.pdf> (режим доступа свободный)
3. O. V. Dvornikov, V. L. Dziatlau, N. N. Prokopenko, K. O. Petrosiants, N. V. Kozhukhov and V. A. Tchekhovski, "The accounting of the simultaneous exposure of the low temperatures and the penetrating radiation at the circuit simulation of the BiJFET analog interfaces of the sensors," 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Astana, 2017, pp. 1-6. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998507