

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

**Библиотека схемотехнических решений**

**Токовые зеркала для проектирования КМОП аналоговых микросхем:  
основные модификации (ТЗ №1-№ 36)**

**Прокопенко Н.Н., [prokopenko@sssu.ru](mailto:prokopenko@sssu.ru), Титов А.Е., Бутырлагин Н.В.  
Научно-исследовательская лаборатория проблем проектирования в  
экстремальной микроэлектронике ИППМ РАН и Донского государственного  
технического университета (г. Ростов-на-Дону)**

**1. Область применения**

КМОП токовые зеркала предназначены для работы в качестве управляемых и неуправляемых активных нагрузок в КМОП аналоговых и аналого-цифровых устройствах (операционные и буферные усилители, стабилизаторы напряжения, элементы токовой логики и др.), в т.ч. реализуемых в составе «систем на кристалле».

Практическая реализация токовых зеркал (ТЗ) в рамках типовых схем включения может быть осуществлена по различным технологиям: tsmc (BiCMOS), SiGe (ИНР, Германия), NHGRACE SoI (кремний на изоляторе), H10-CMOS090\_LP (АО «Микрон», г. Зеленоград), ЗКБТ (BiJFet-биполярно-полевой техпроцесс, АО «Интеграл», г. Минск), комплементарный биполярный техпроцесс (АО «НПП Пульсар», г. Москва), XFab, ams, on semi, UMS и др.

**2. Текстовое описание**

Токовые зеркала (ТЗ) (рис. 1) относятся к числу базовых элементов аналоговых КМОП микросхем.

Типовые ТЗ имеют низкоомный токовый вход (Вх.і)  $r_{вх} \approx 0$ , на который подается входной ток  $I_{in}$ , и высокоомный токовый выход (Вых.і)  $r_{вых} \approx \infty$ , для которого  $I_{out} = K_i I_{in} \approx I_{in}$  в широком диапазоне изменений выходного напряжения  $U_{out}$ .

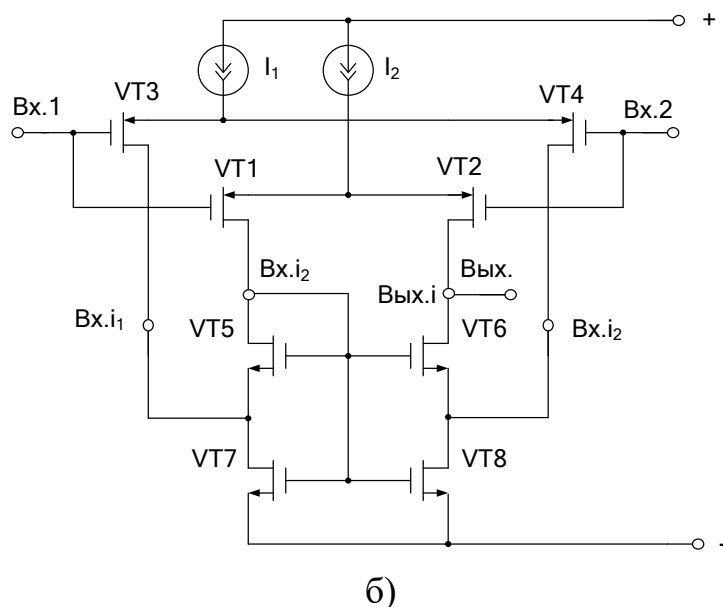
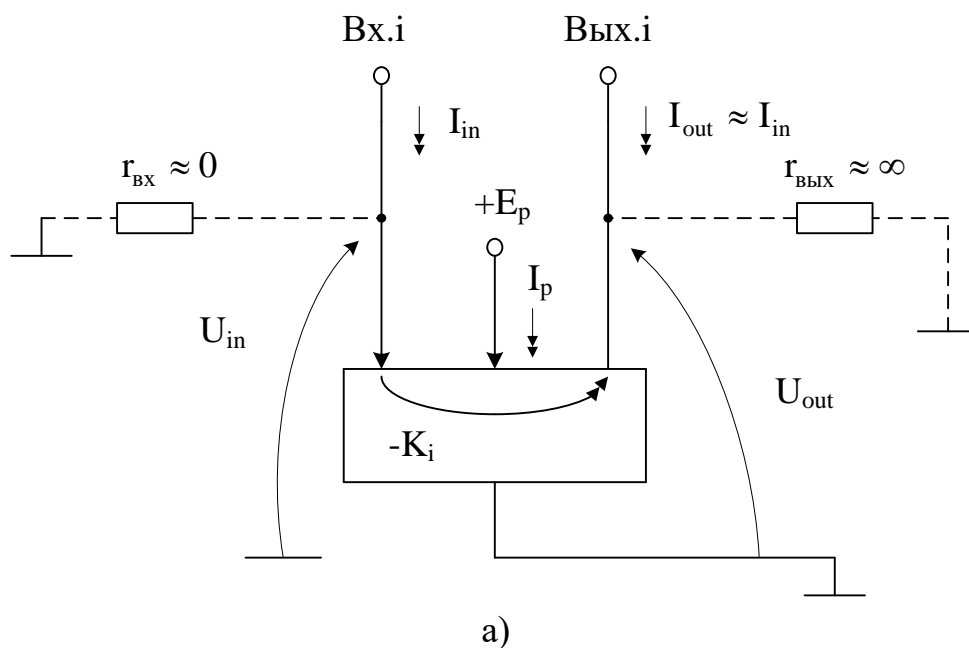


Рис. 1 Функциональная схема токового зеркала (а) и его включение в конкретном операционном усилителе (б) (Чертёж 1215)

Во многих практических случаях ТЗ является самым критичным элементом аналоговой схемотехники, т.к. его свойства оказывают существенное влияние на предельные параметры аналоговых микросхем (коэффициент усиления по напряжению, максимальные выходные токи, частоту единичного усиления, максимальную скорость нарастания выходного напряжения, напряжение смещения нуля, коэффициент ослабления входного синфазного сигнала, коэффициент подавления помехи по питанию, диапазон изменения выходного напряжения и др.).

Различают две схемы включения ТЗ – управляемое ТЗ (когда входной ток изменяется сигналом, а выход, инвертирующий  $I_{in}$ , используется как активная нагрузка) и неуправляемое ТЗ (когда  $I_{in} = \text{const}$ ).

Основные параметры токового зеркала:

1.  $K_i = \frac{I_{out}}{I_{in}} \approx 0,9...1,2$  – коэффициент передачи входного тока  $I_{in}$  и его

погрешность ( $\Delta K_i$ ) при технологическом разбросе, неидентичности статических режимов транзисторов ТЗ по напряжению сток-исток, воздействию температуры, радиации и т.п.

2.  $r_{вых} = \left. \frac{du_{out}}{di_{out}} \right|_{I_{in}=\text{const}}$  – выходное дифференциальное сопротивление. В

зависимости от схемотехники ТЗ и статических токов  $I_{out}$  лежит в диапазоне «единицы КОм – десятки КОм – десятки МОм – единицы ГОм».

3.  $U_{in}, \Delta U_{in}$  – входное статическое напряжение ТЗ и допустимый диапазон его изменения  $\Delta U_{in}$ . Желательно иметь  $U_{in} = 0$  (как у идеального ТЗ).

4.  $U_{out}, \Delta U_{out}$  – выходное статическое напряжение и допустимый диапазон его изменения ( $\Delta U_{out}$ ), в пределах которого сохраняется работоспособность ТЗ, например, обеспечиваются заданные значения  $r_{вых}$ .

5.  $I_p$  – дополнительный ток потребления от источника питания  $E_p$ , обусловленный необходимостью установления (в некоторых случаях) статического режима транзисторов ТЗ. Для большинства схем ТЗ включение  $I_p$  не требуется, т.е. здесь  $I_p = 0$ .

6.  $I_{in,max}, I_{out,max}$  – максимальные значения входного и выходного токов ТЗ, при которых токовое зеркало выполняет свои функции и обеспечивает заданные параметры.

7. Выходная и входная емкости.

Кроме этого, ТЗ характеризуется динамическими параметрами, определяющими его поведение в диапазоне высоких частот, а также реакцию выходного тока на импульсное изменение  $I_{вх}$  (скорость нарастания, время установления переходного процесса и т.п.).

На рис. 2 – рис. 36 приведены основные варианты построения КМОП ТЗ, защищенные патентами разных стран.

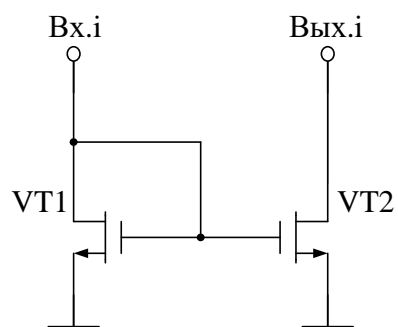


Рис. 2 Классическое токовое зеркало с минимальным числом элементов (П8016)

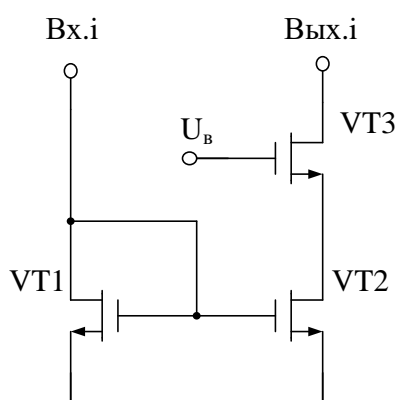


Рис. 3 Каскодное токовое зеркало с цепью смещения  $U_B$  (П8016)

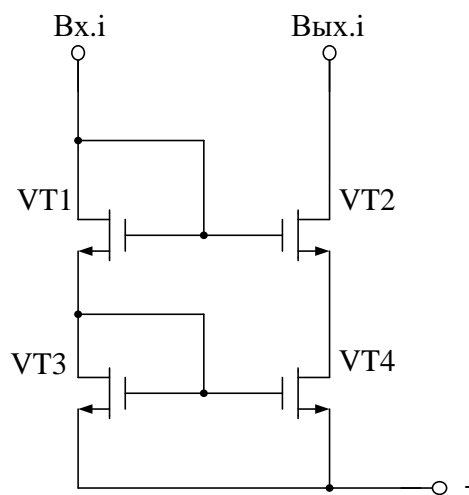


Рис. 4 Каскодное токовое зеркало по патенту US 6.980.054 (П8004)

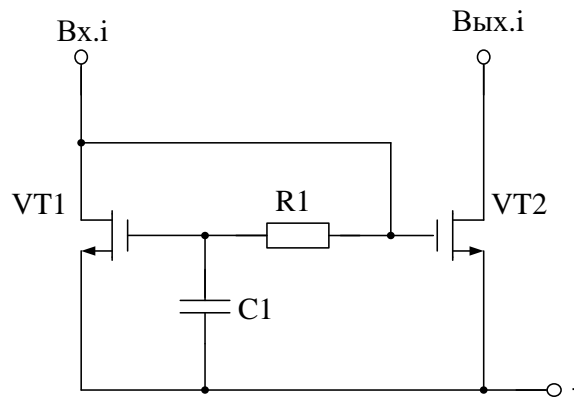


Рис. 5 Метод повышения быстродействия токовых зеркал (П8042)

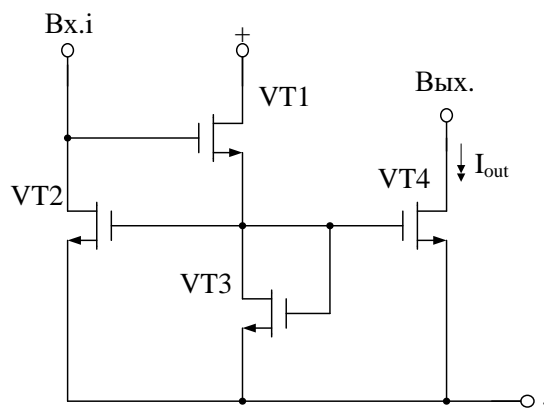


Рис. 6 Токовое зеркало Уильсона по патентной заявке US 2007/0216484, Fig.15 (П8010)

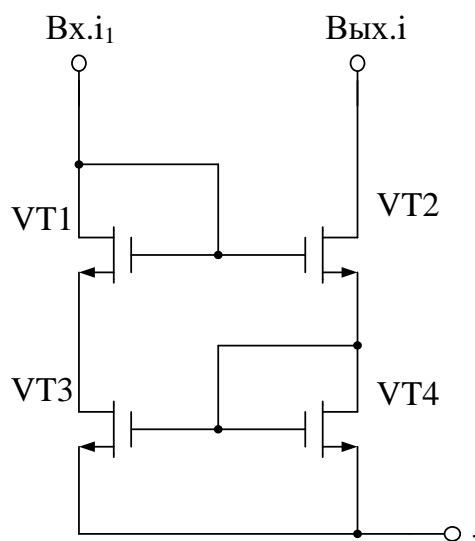


Рис. 7 Токовое зеркало Уильсона с идентичным статическим режимом транзисторов VT3, VT4 (П8009)

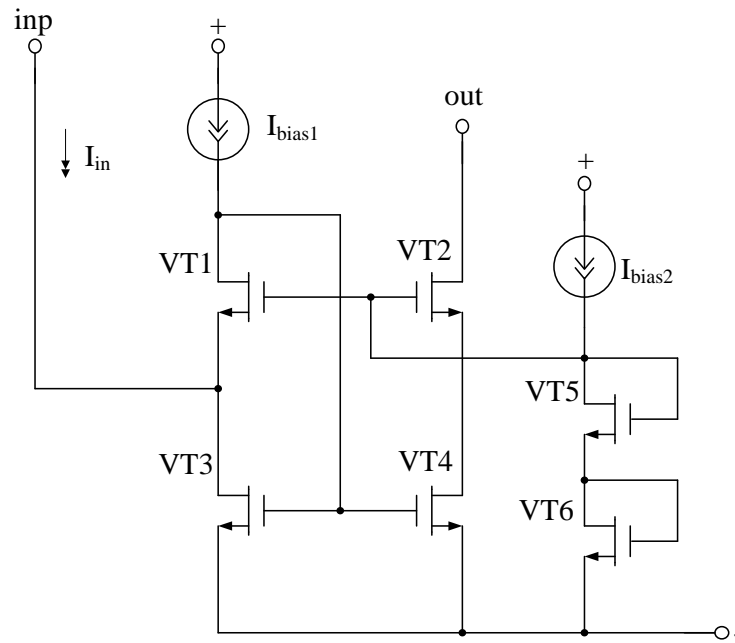


Рис. 8 Токовое зеркало по патентам US 5.801.523; US 6.617.915, US 7.915.948 (П8010)

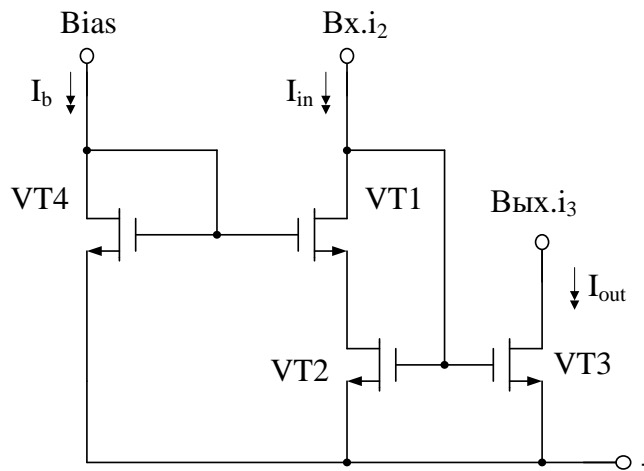


Рис. 9 Токовое зеркало по патентам US 6.414.552 и EP 1313211 (П8014)

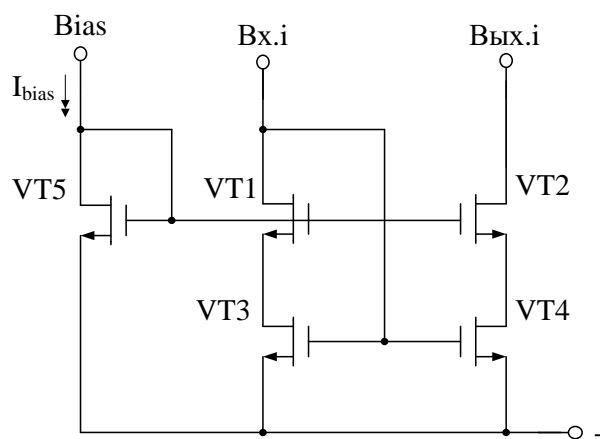


Рис. 10 Каскодное токовое зеркало по патентной заявке US 2010/0134286 (П8018)

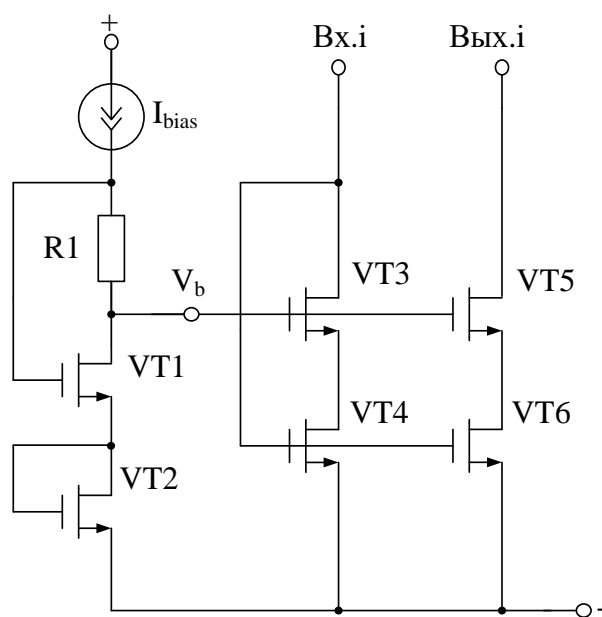


Рис. 11 Цепь смещения  $V_b$  для каскодного токового зеркала VT3-VT6 (П8019)

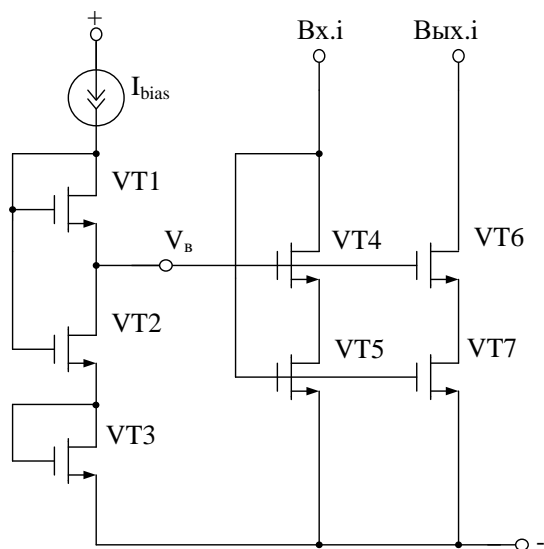


Рис. 12 Цепь смещения  $V_b$  для каскодного токового зеркала VT4-VT7 (П8020)

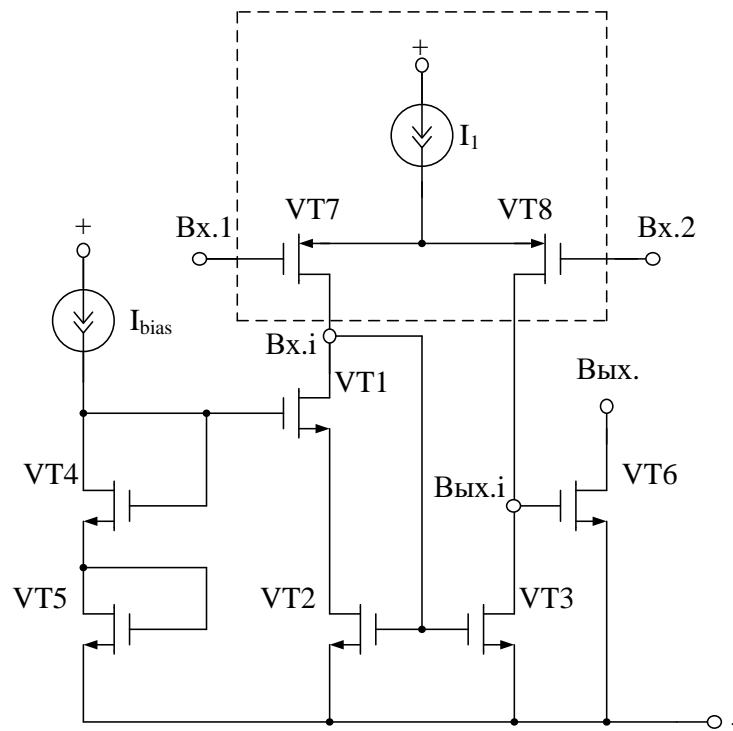


Рис. 13 Токовое зеркало по патенту US 6.583.665 и схема его включения в ОУ (П8011)

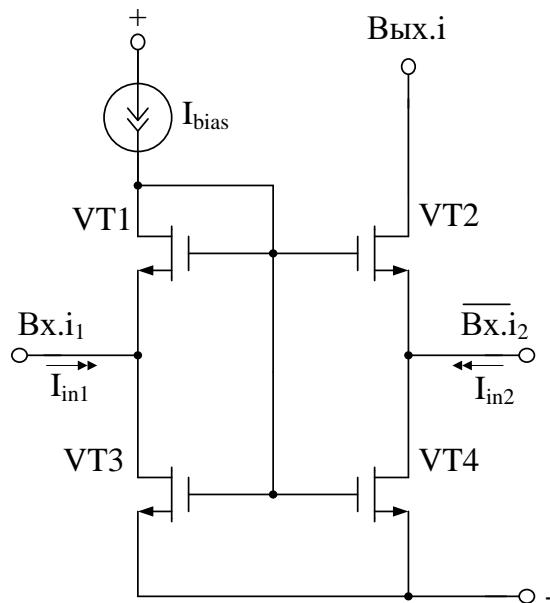


Рис. 14 Дифференциальное токовое зеркало по патенту US 2010/0134286 (П8017)



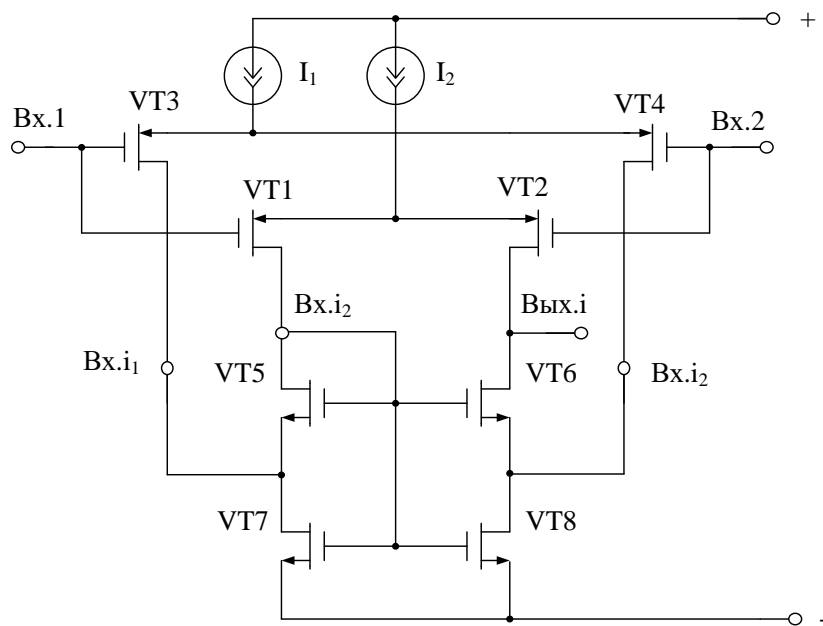


Рис. 15 Схема включения дифференциального токового зеркала (VT5-VT8) в ОУ (RU №139042, Адамов, Чаплыгин и др.) (П8028)

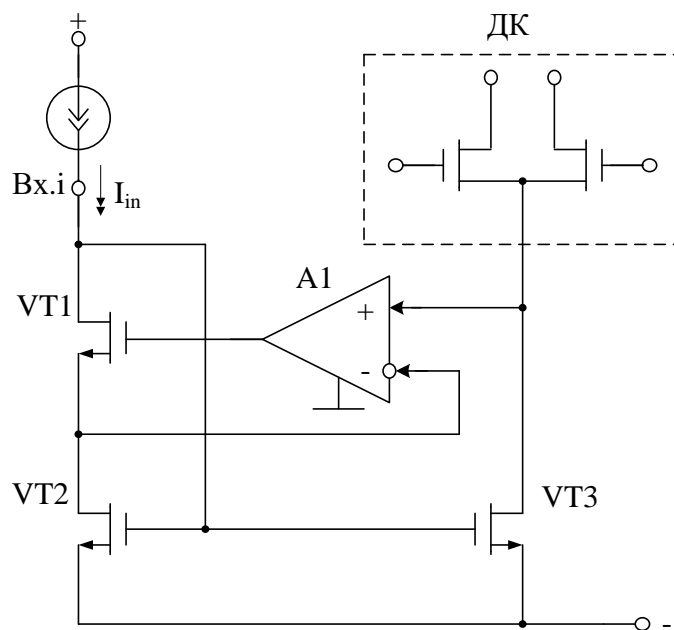


Рис. 16 Токовое зеркало по патентной заявке US 2007/0229150, fig.5 (П8029)

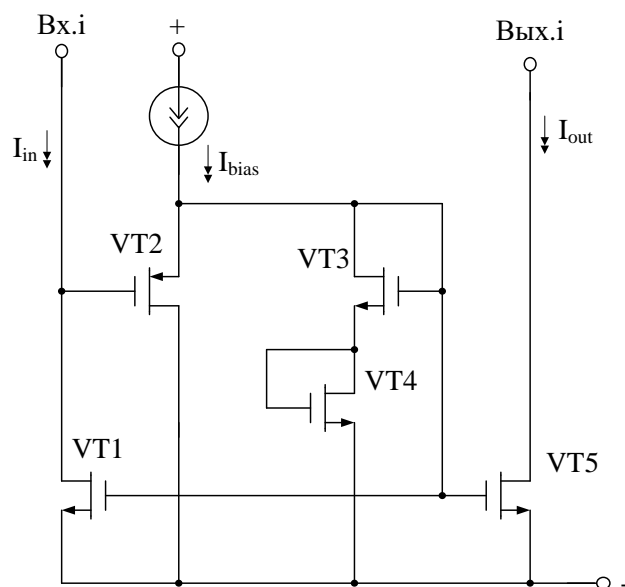


Рис. 17 Токовое зеркало на комплементарных КМОП транзисторах по патенту US 6.630.818 (П8012)

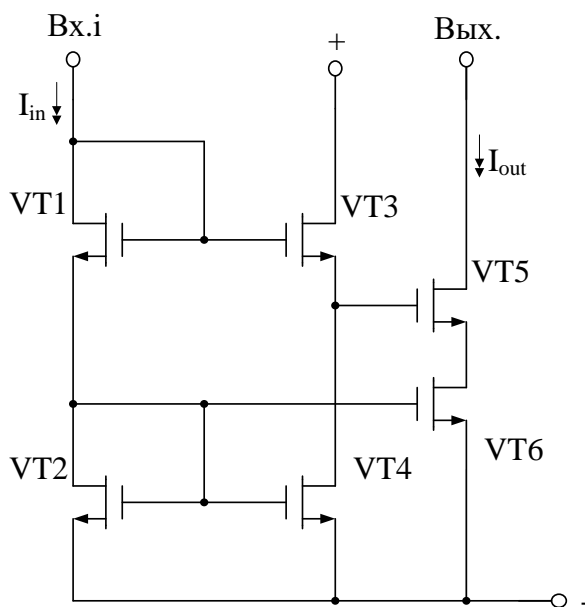


Рис. 18 Каскодное токовое зеркало по патенту US 5.515.010 (П8015)

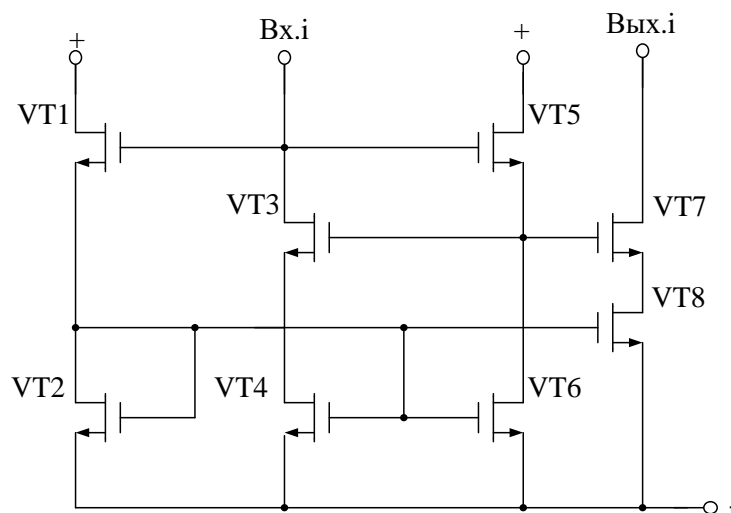


Рис. 19 Каскодное токовое зеркало по патенту US 5.515.010 (П8013)

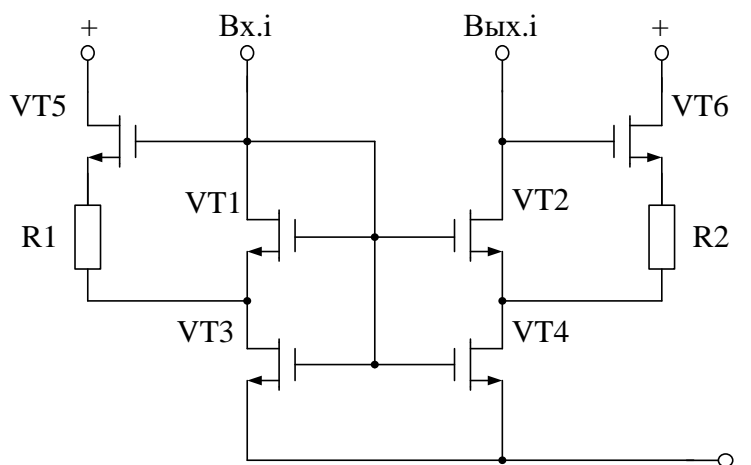


Рис. 20 Токовое зеркало с повышенным выходным сопротивлением (RU 2544780, Адамов Ю.Ф. и др.) (П8027)

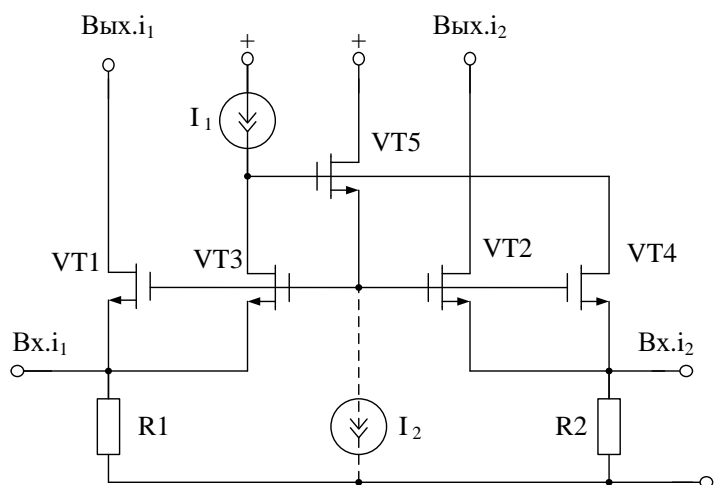


Рис. 21 Повторитель тока с дифференциальным входом (Иванов В.В., SU 1529410) (П8037)

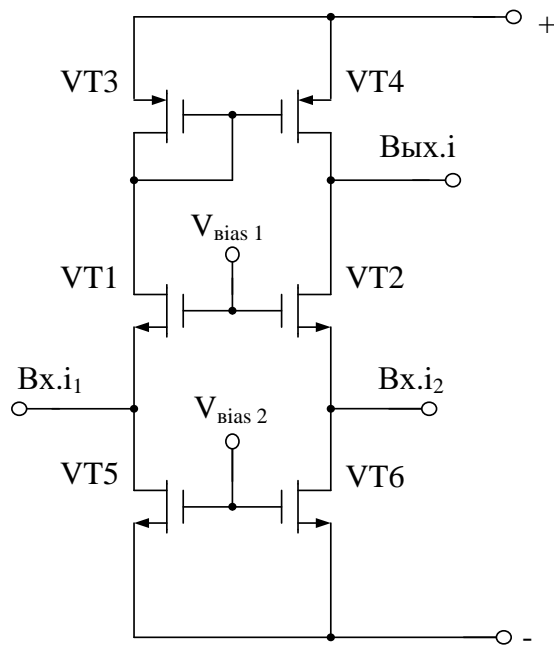


Рис. 22 Каскодное токовое зеркало с дифференциальным входом (П8036)

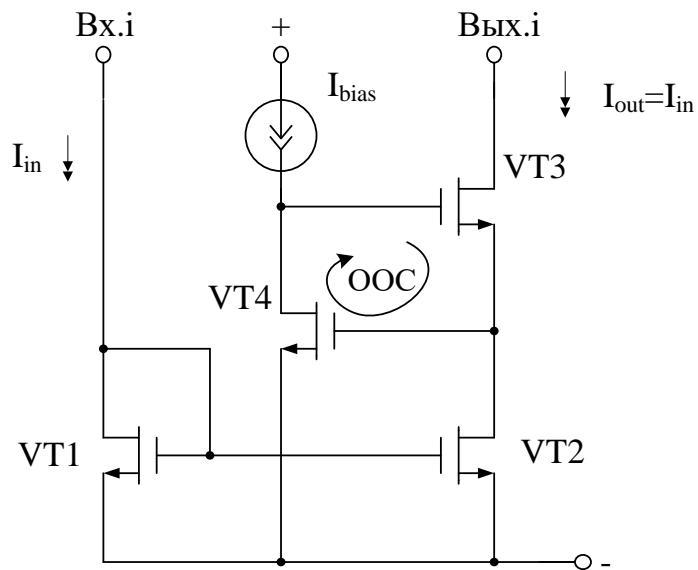


Рис. 23 Каскодное токовое зеркало с повышенным выходным сопротивлением ( В.И. Эннс, стр. 139) (П8044)

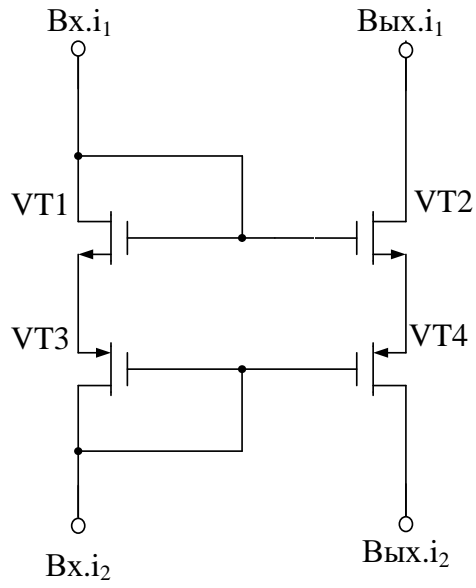


Рис. 24 Токовое зеркало на комплементарных транзисторах  
( В.И. Эннс, стр 140) (П8043)

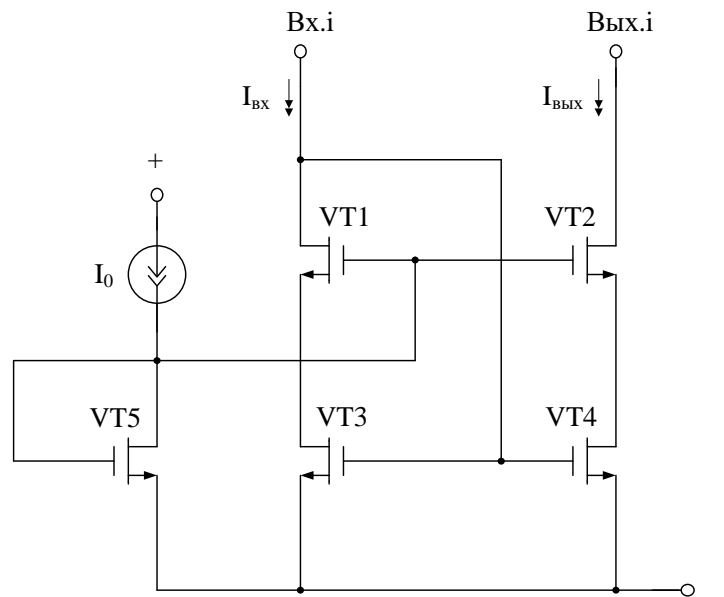


Рис. 25 Каскодное токовое зеркало (Иванов В.В., монография, рис. 2-6) (П7538)

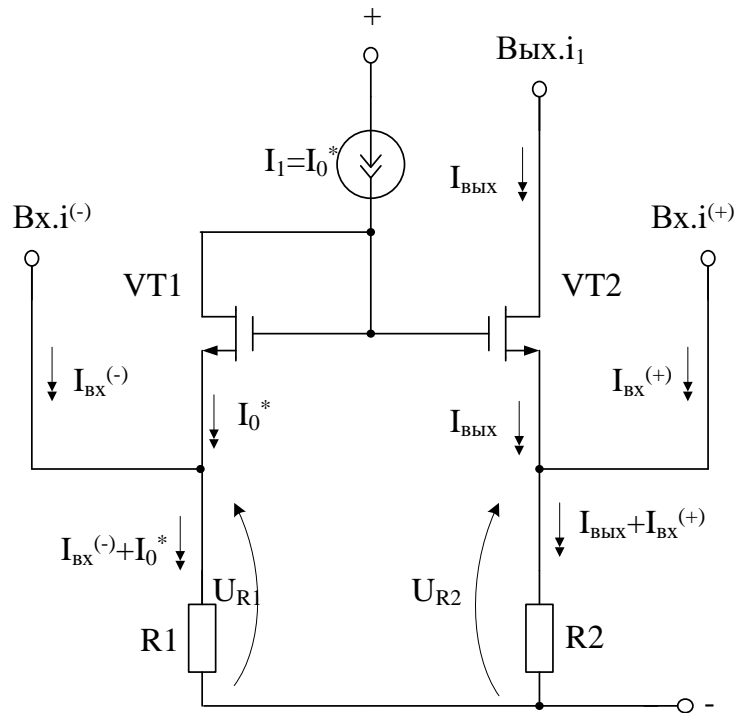


Рис. 26 Универсальное токовое зеркало с малым статическим напряжением на токовых входах (П78616)

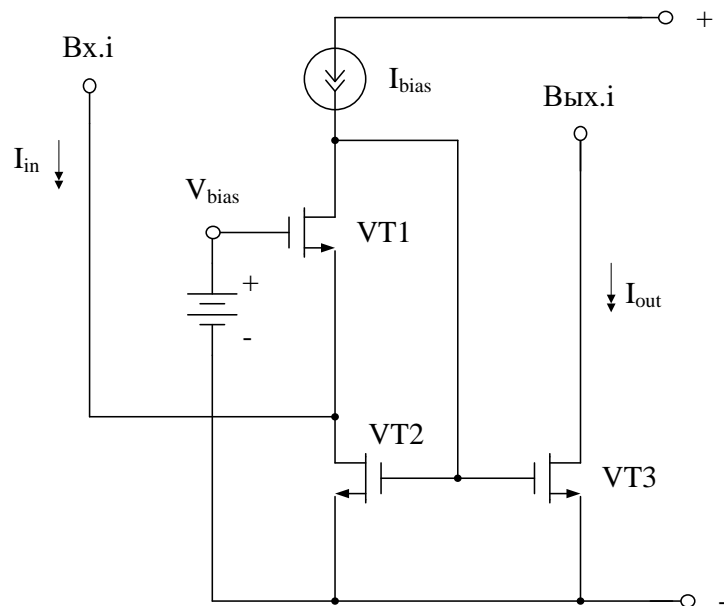


Рис. 27 Токовое зеркало по патентам US 8.169.263, US 7.915.948 (Чертёж 1220)

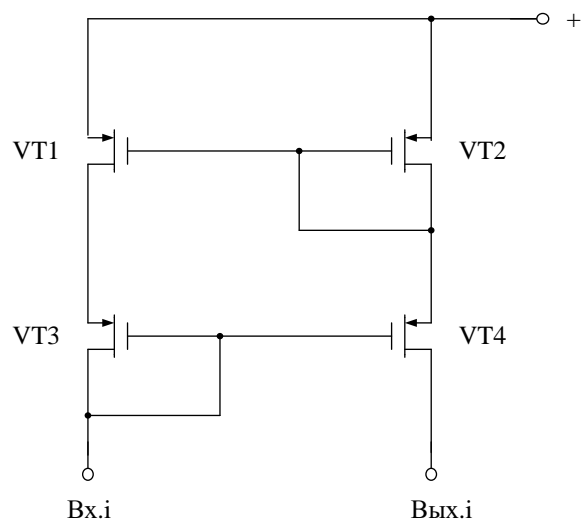


Рис. 28 Токовое зеркало Уильсона (Чертёж 1218)

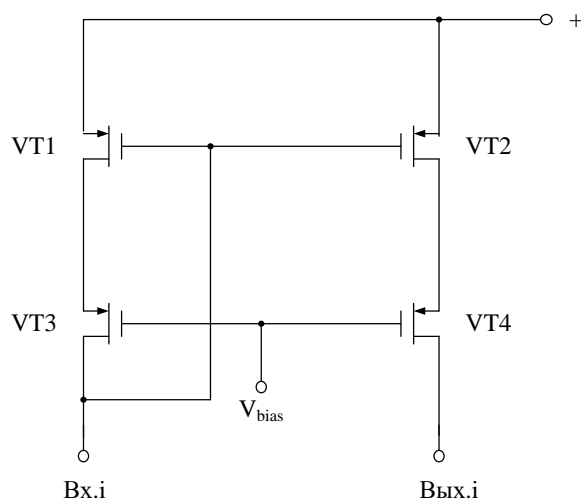


Рис. 28 Токовое зеркало по патенту US 6.788.143 (Чертёж 1219)

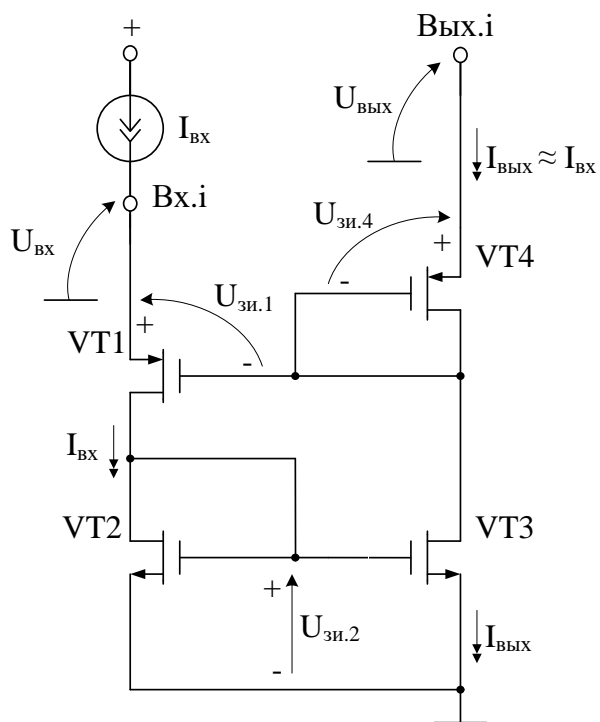


Рис. 29 Токовое зеркало с выходным напряжением, равным входному напряжению ( $U_{ВХ} \approx U_{ВЫХ}$ ) (П8048)

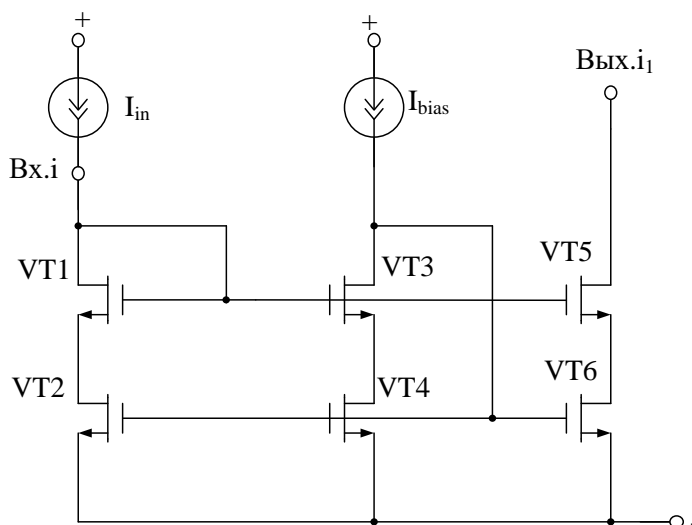


Рис. 30 М.Steygert. European Conference on Circuit theory and design, 1989, pp.556 (П8050)



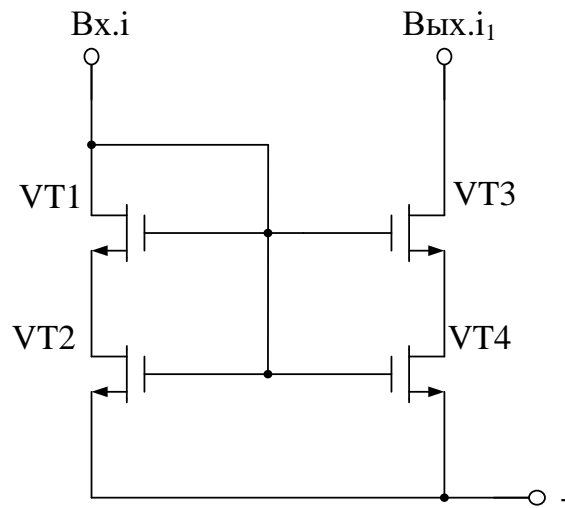


Рис. 31 Каскодное токовое зеркало по патенту US 7.541.871 (VT1, VT3- транзисторы с низким пороговым напряжением) (П8051)

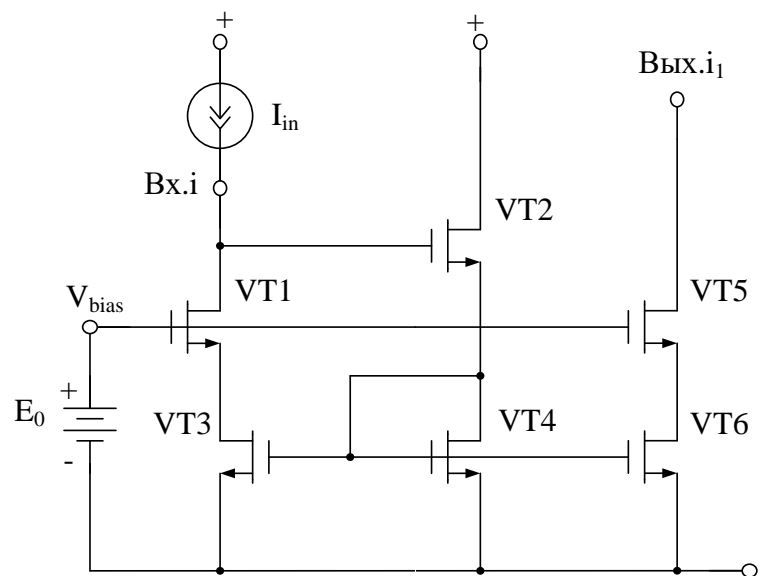


Рис. 32 М.Steygert. European Conference on Circuit theory and design, 1989, pp.556 (П8052)

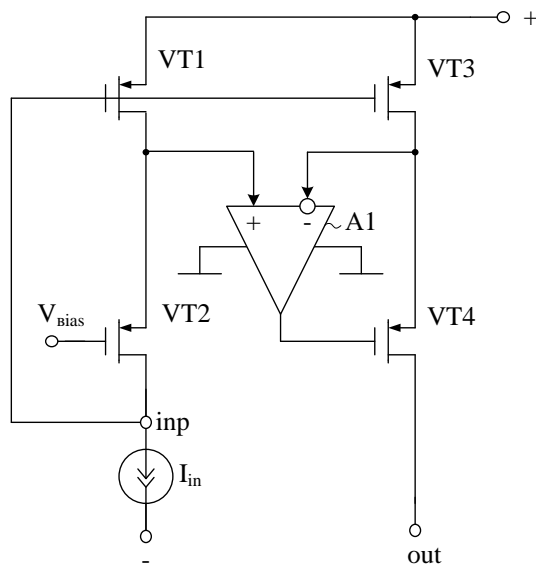


Рис. 33 Токвое зеркало с повышенным  $r_{вых}$  (Иванов В.В., монография) (П8068)

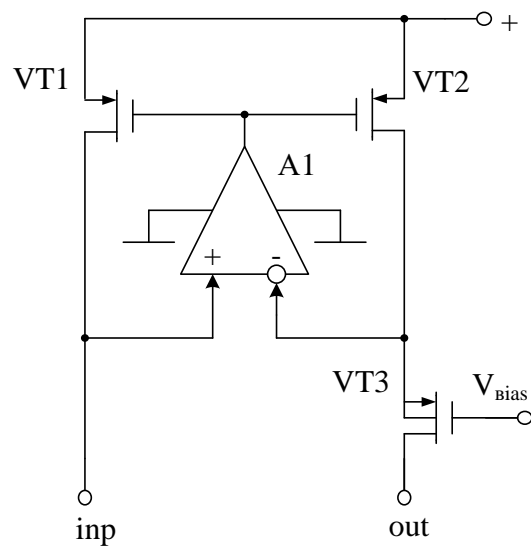


Рис. 34 Токвое зеркало с повышенным  $r_{вых}$  (Иванов В.В., монография) (П8066)

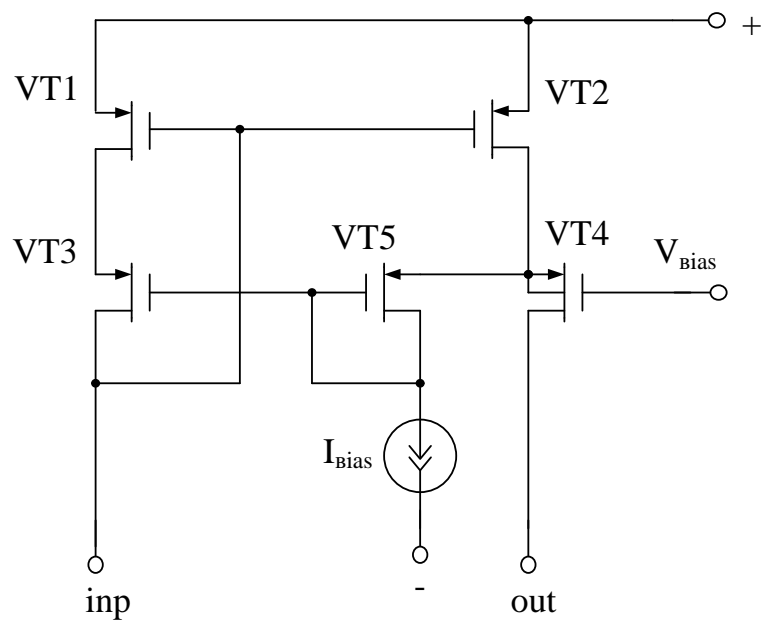
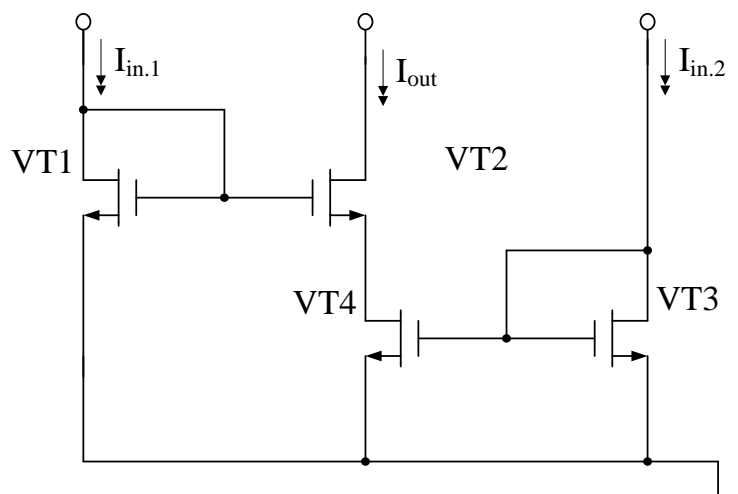


Рис. 35 Токовое зеркало с повышенным  $r_{\text{вых}}$  (Иванов В.В., монография) (П8067)



1. Если  $I_{\text{in.1}} \gg I_{\text{in.2}}$ , то  $I_{\text{out}} = I_{\text{in.2}}$

2. Если  $I_{\text{in.2}} \gg I_{\text{in.1}}$ , то  $I_{\text{out}} = I_{\text{in.1}}$

Рис. 36 Токовый компаратор (Иванов В.В., монография) (П8056)

### 3. Компьютерное моделирование токового зеркала рис. 8

Ниже в качестве примера приведены результаты моделирования погрешностей передачи тока одного из рассмотренных ранее токовых зеркал, а также зависимость его выходного сопротивления от входного статического тока в диапазоне частот.

Схема токового зеркала рис. 8 в среде Orcad на моделях CMOSp полевых транзисторов TSMC\_035\_T65 приведена на рис. 37.

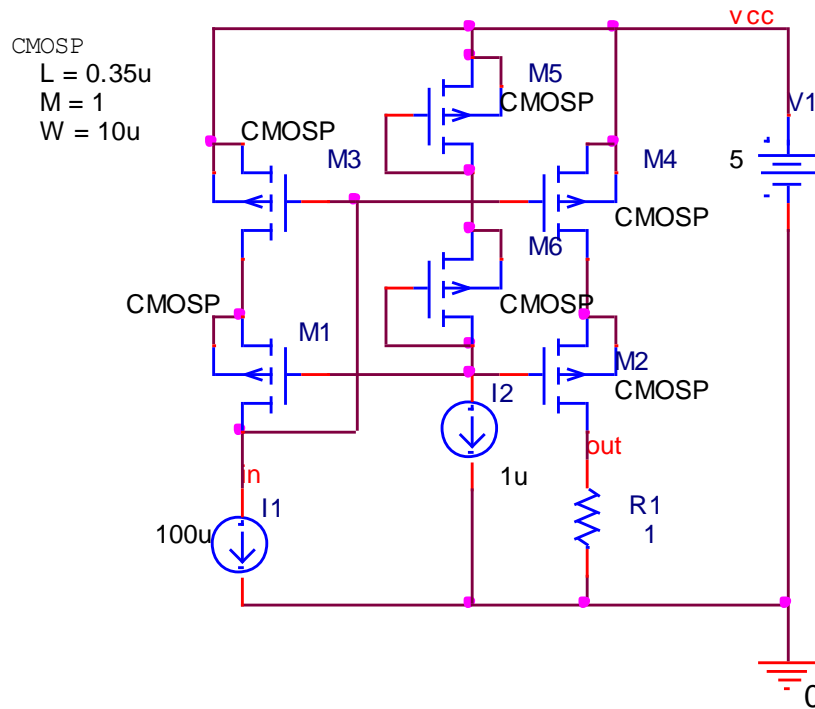


Рис. 37 Схема токового зеркала в среде Orcad на моделях CMOSp полевых транзисторов TSMC\_035\_T65

Графики рис. 38 и рис. 39 характеризуют влияние тока цепи смещения  $I_2$  на коэффициент передачи по току.

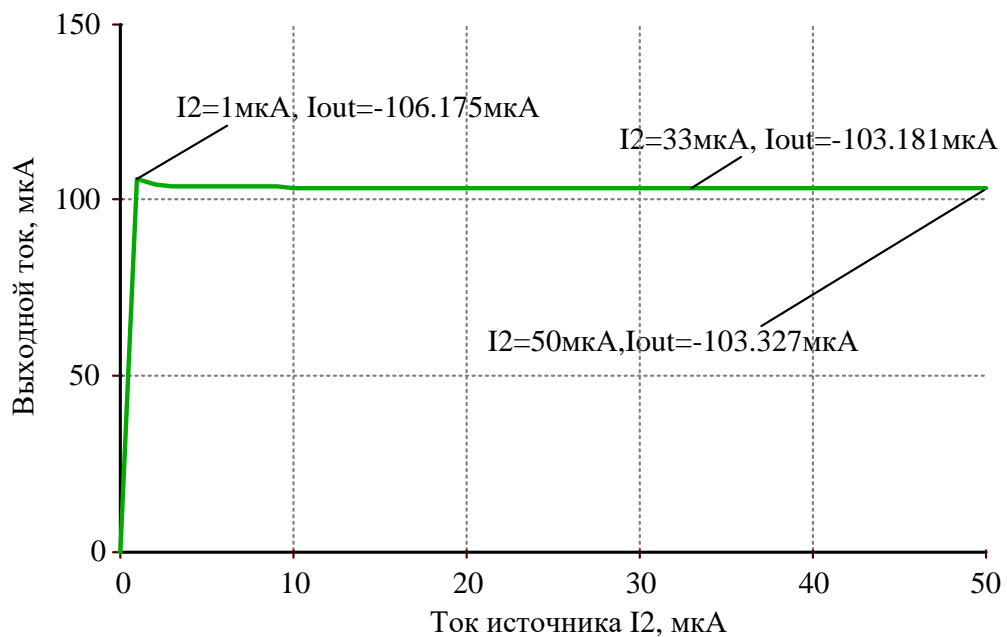


Рис. 38 Зависимость выходного тока  $I_{out}$  от тока цепи смещения при  $I_2=0\div 50$  мкА

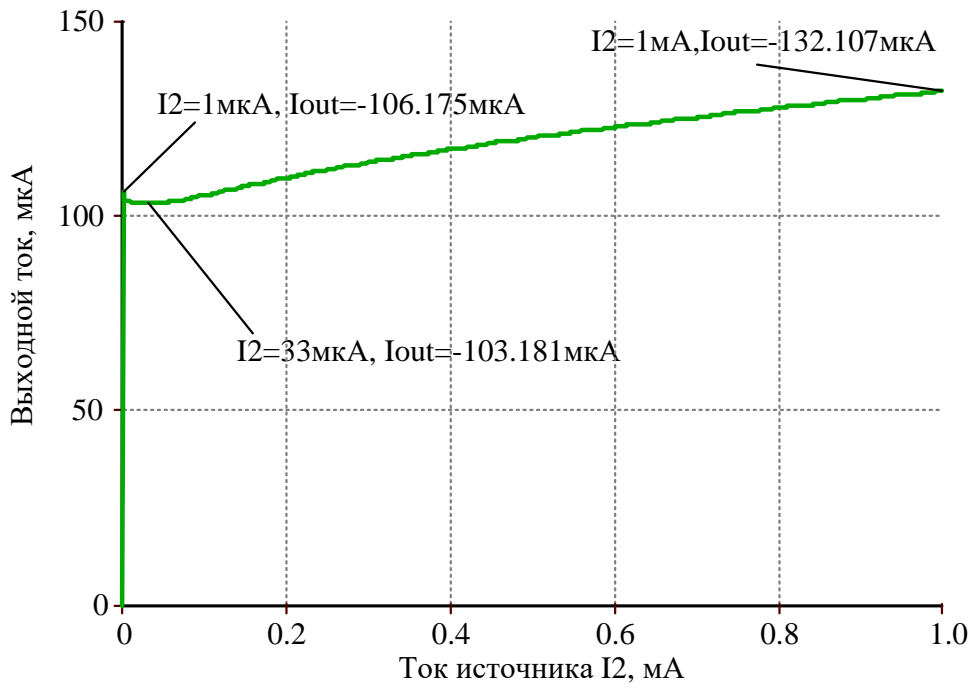


Рис. 39 Зависимость выходного тока  $I_{out}$  от тока цепи смещения при  $I_2=0 \div 1 \text{ мА}$

40. При моделировании  $r_{\text{ВЫХ}}$  использовалась схема измерения, показанная на рис.

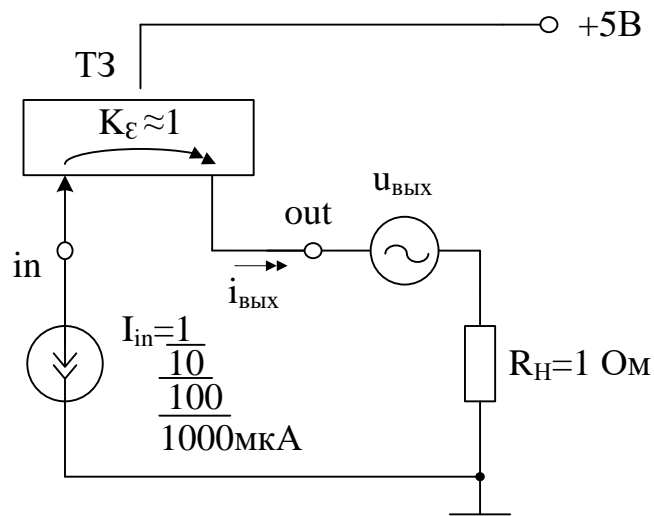


Рис. 40 Схема измерения  $r_{\text{ВЫХ}}$  токового зеркала при  $I_{in}=1/10/100/1000 \text{ мкА}$

$$r_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВЫХ}} / i_{\text{ВЫХ}} \text{ в диапазоне частот}$$

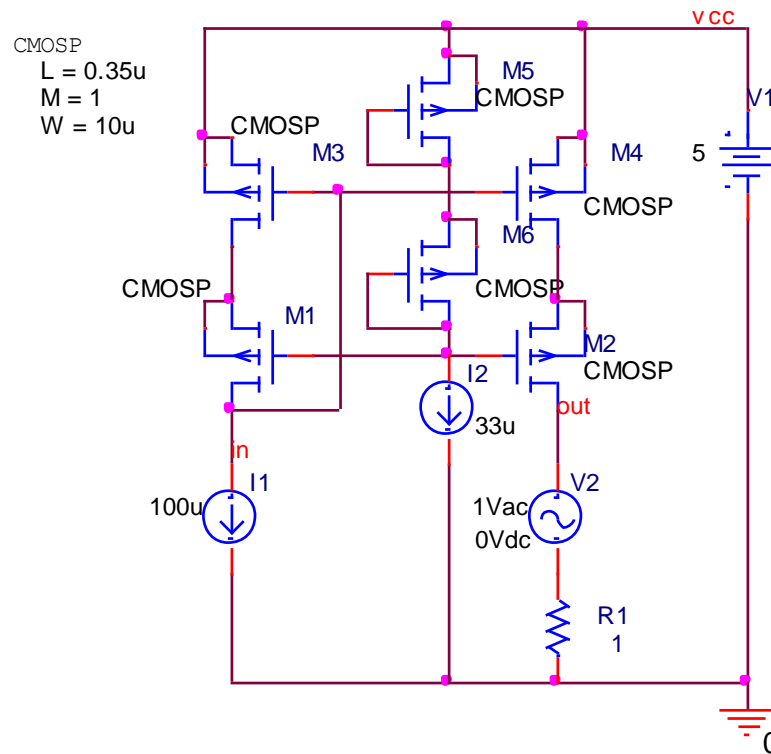


Рис. 41 Схема измерения выходного сопротивления токового зеркала рис. 37 в среде OrCAD

На рис. 42 и рис. 43 показаны зависимости  $r_{\text{вых}}$  от частоты при разных значениях статического входного тока ТЗ  $I_1=1 \text{ мкА} - 1 \text{ мА}$ .

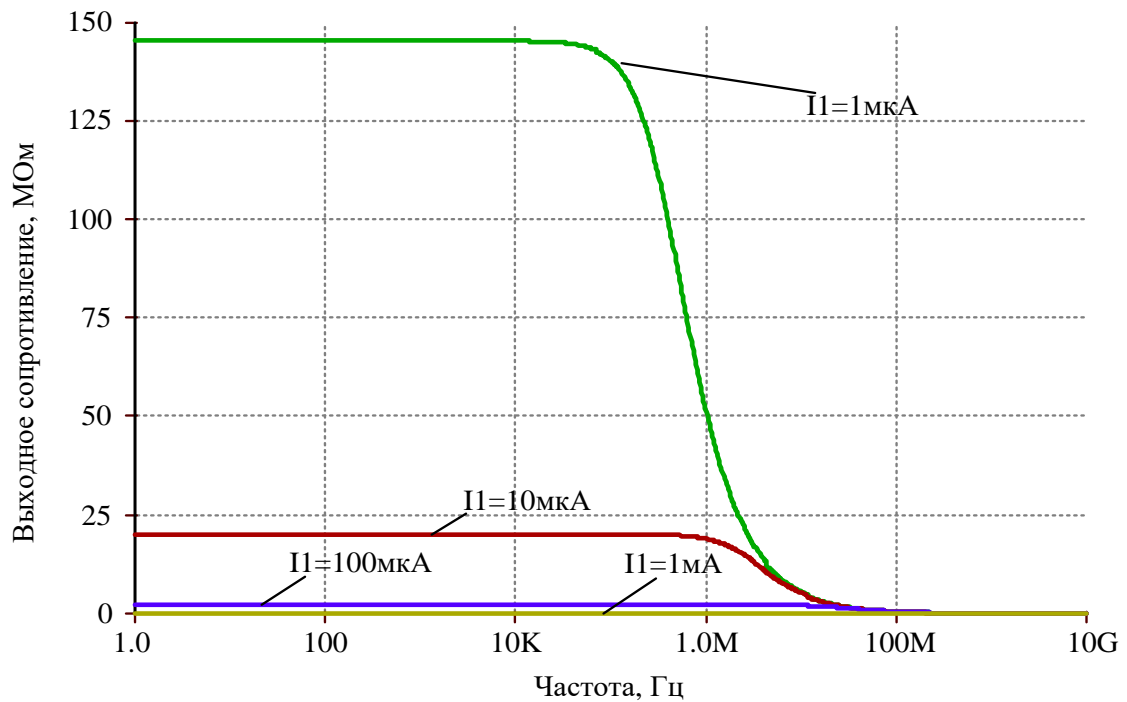


Рис. 42 Зависимость выходного сопротивления токового зеркала рис. 37 от частоты при  $I_1=1 \div 1000 \text{ мкА}$ ,  $I_2=33 \text{ мкА}$

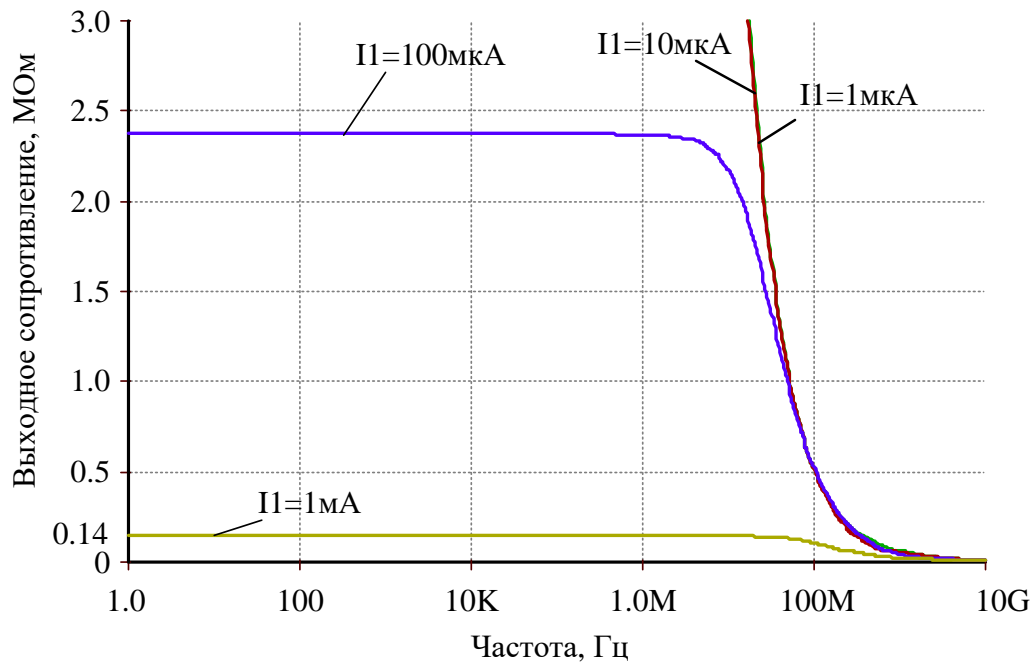


Рис. 43 Зависимость выходного сопротивления токового зеркала рис. 37 от частоты при  $I_1=1\div 1000\mu\text{кА}$ ,  $I_2=33\mu\text{кА}$  в увеличенном масштабе

Таким образом, выходное сопротивление токового зеркала рис. 8 при его реализации на CMOSp транзисторах изменяется в диапазоне от 150 МОм до 140 кОм.

### Нетлист схемы рис. 37

```

1: source OP_AMP
2: M_M2      N1297112 N134334 N129733 N129733 CMOSF
3: + L=0.35u
4: + W=10u
5: + M=1
6: M_M5      N144054 N144054 VCC VCC CMOSF
7: + L=0.35u
8: + W=10u
9: + M=1
10: R_R1     0 N1297112 1
11: M_M4     N129733 N102108 VCC VCC CMOSF
12: + L=0.35u
13: + W=10u
14: + M=1
15: V_V1     VCC 0 5
16: I_I2     N134334 0 DC 1u
17: M_M3     N130015 N102108 VCC VCC CMOSF

```

18: + L=0.35u  
 19: + W=10u  
 20: + M=1  
 21: M\_M6 N134334 N134334 N144054 N144054 CMOSP  
 22: + L=0.35u  
 23: + W=10u  
 24: + M=1  
 25: M\_M1 N102108 N134334 N130015 N130015 CMOSP  
 26: + L=0.35u  
 27: + W=10u  
 28: + M=1  
 29: I\_I1 N102108 0 DC 100u

Схема токового зеркала рис. 8 в среде Orcad на моделях CMOSn полевых транзисторов TSMC\_035\_T65 приведена на рис. 44.

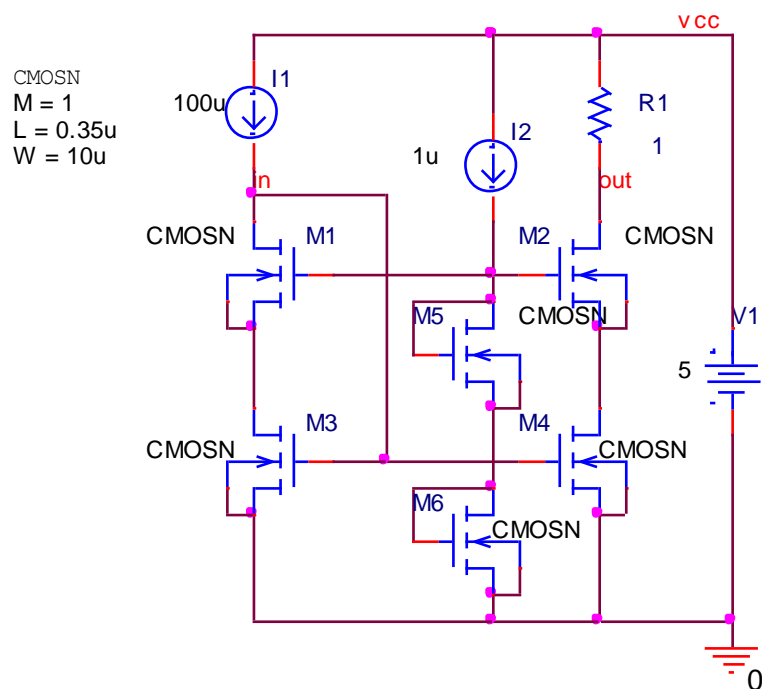


Рис. 44 Схема токового зеркала в среде Orcad на моделях CMOSn полевых транзисторов TSMC\_035\_T65

Графики рис. 45 и рис. 46 характеризуют влияние тока цепи смещения  $I_p=I_2$  на коэффициент передачи по току.



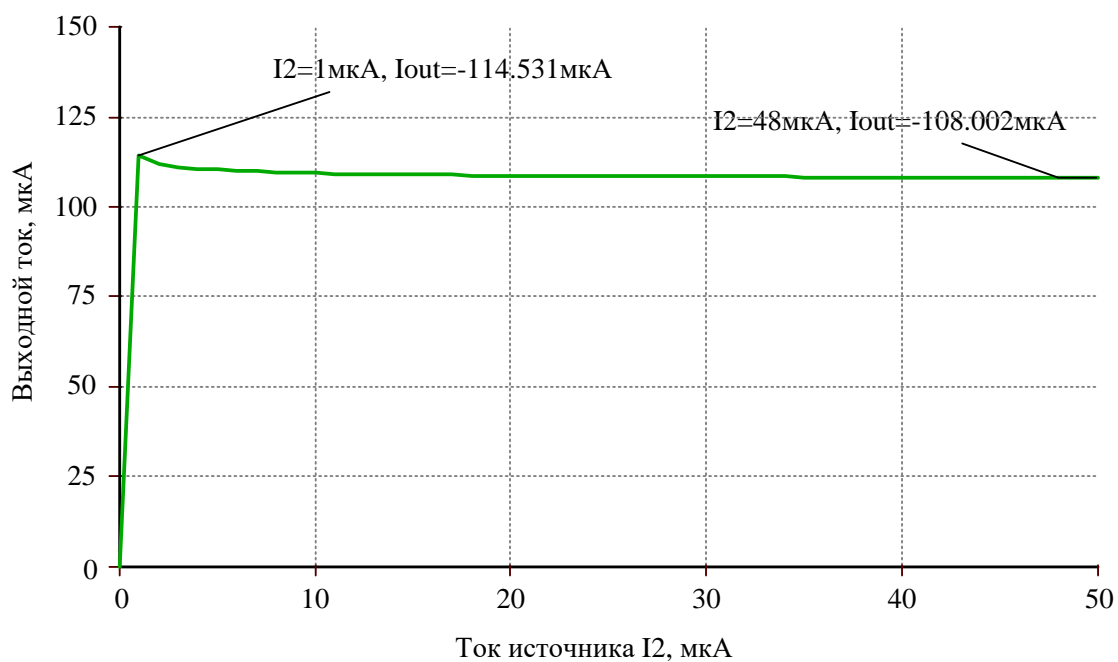


Рис. 45 Зависимость выходного тока  $I_{out}$  от тока цепи смещения при  $I_2=0\div 50\text{мкА}$

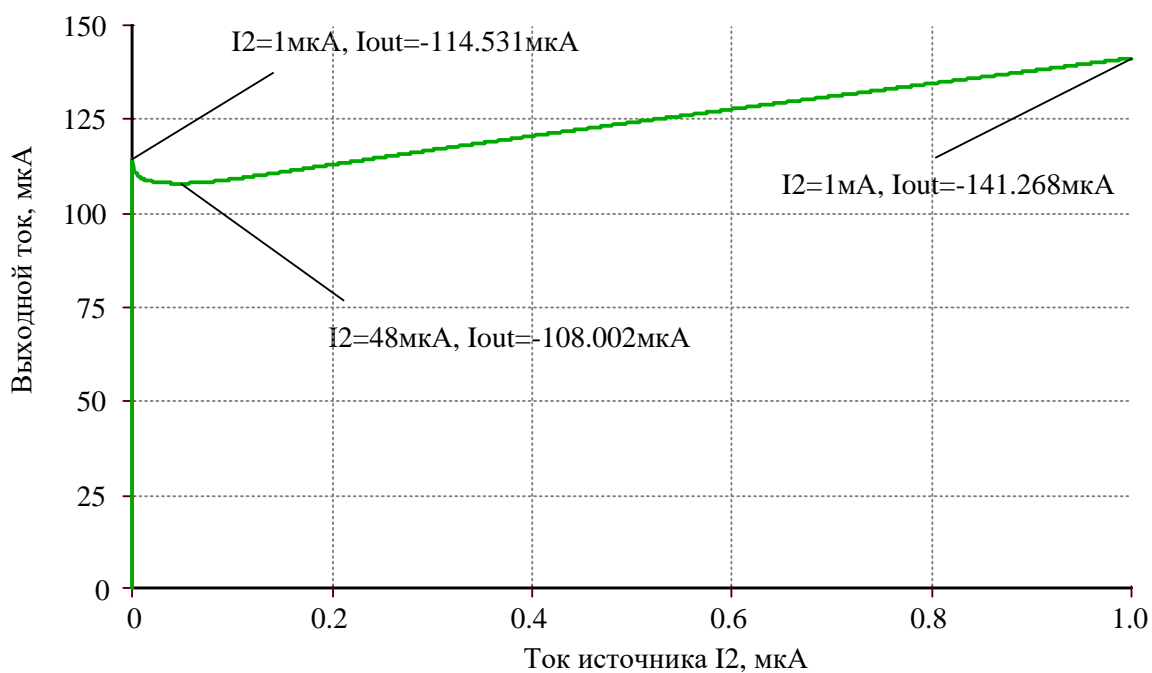


Рис. 46 Зависимость выходного тока  $I_{out}$  от тока цепи смещения при  $I_2=0\div 1\text{мА}$

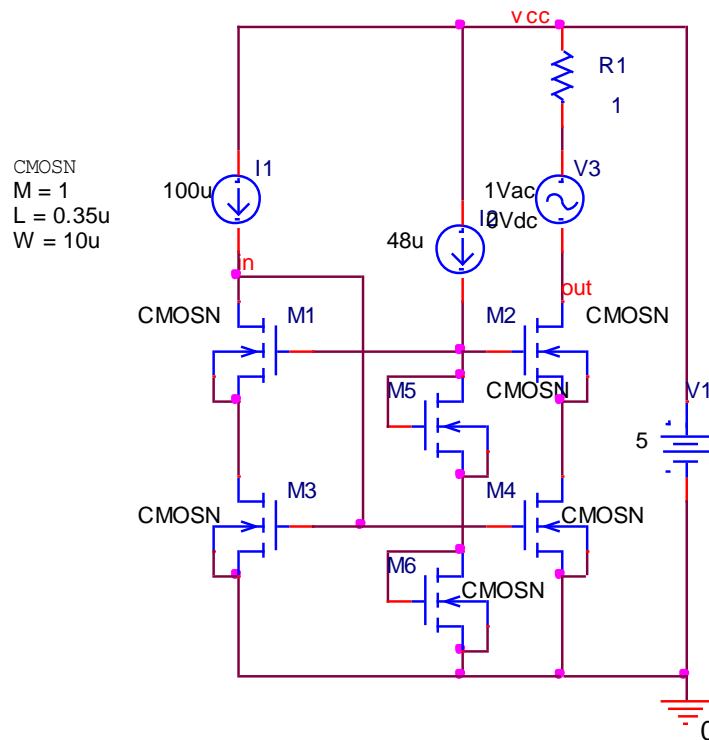


Рис. 47 Схема измерения выходного сопротивления токового зеркала рис. 44 в среде Orcad

На рис. 48, рис. 49 и рис. 50 показаны зависимости  $r_{\text{ВЫХ}}$  от частоты при разных значениях статического входного тока ТЗ  $I_1=1 \text{ мкА} - 1 \text{ мА}$ .

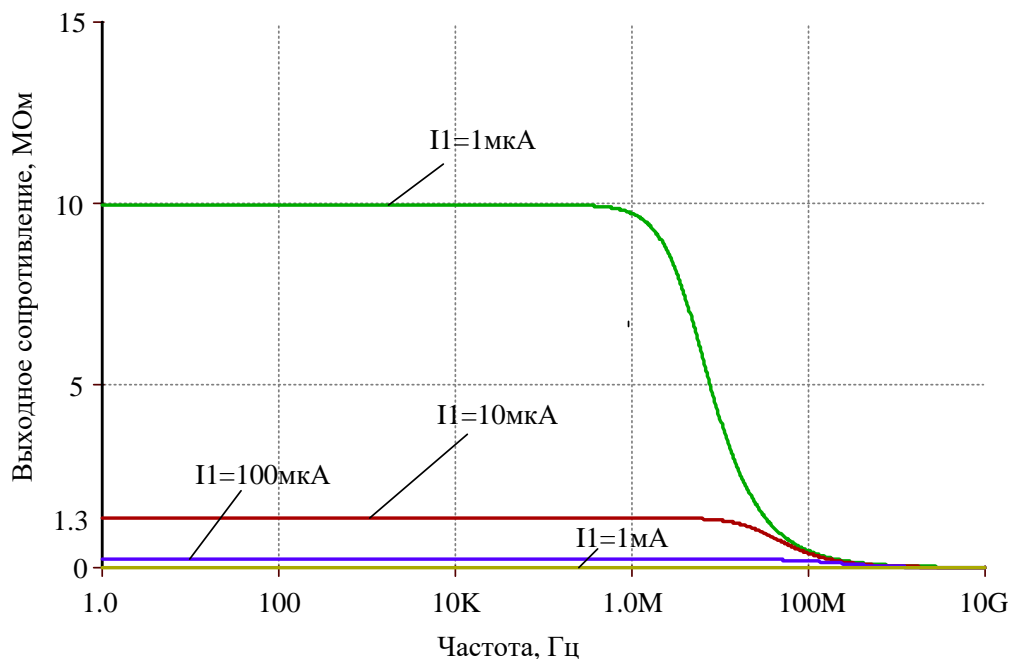


Рис. 48 Зависимость выходного сопротивления токового зеркала рис. 44 от частоты при  $I_1=1 \div 1000 \text{ мкА}$ ,  $I_2=48 \text{ мкА}$

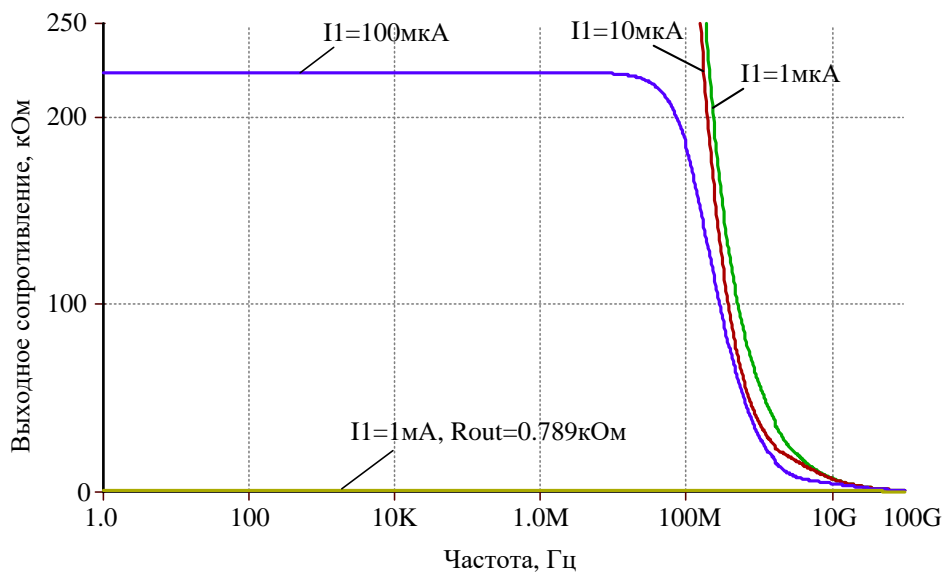


Рис. 49 Зависимость выходного сопротивления токового зеркала рис. 44 от частоты при  $I_1=1 \div 1000 \mu\text{A}$ ,  $I_2=48 \mu\text{A}$  в увеличенном масштабе №1

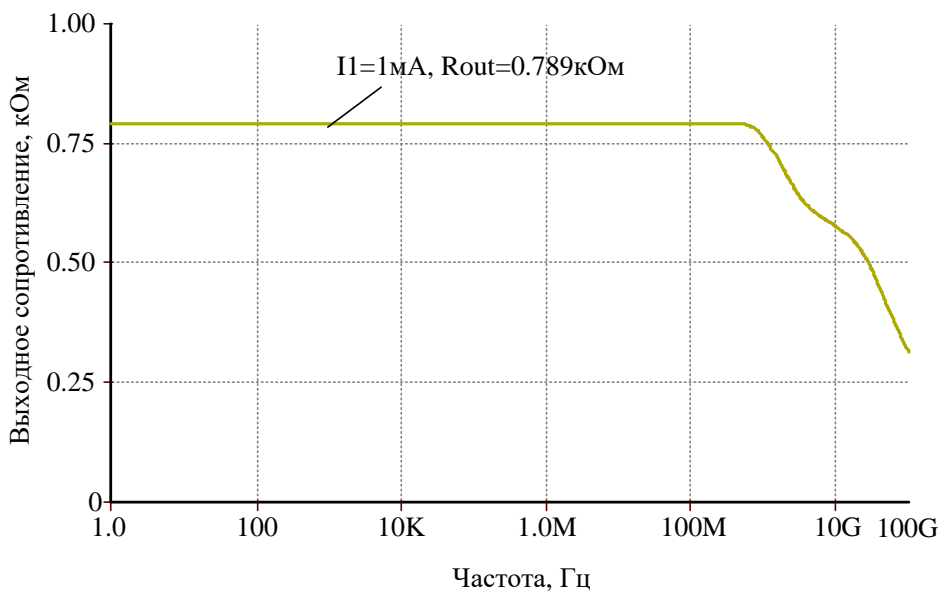


Рис. 50 Зависимость выходного сопротивления токового зеркала рис. 44 от частоты при  $I_1=1 \text{mA}$ ,  $I_2=48 \mu\text{A}$  в увеличенном масштабе №2

Таким образом, выходное сопротивление токового зеркала рис. 8 при его реализации на CMOSn транзисторах изменяется в диапазоне от 10 МОм до 0,8 кОм.

### Нетлист схемы рис. 44

```

1: source OP_AMP
2: M_M3      N132298 IN 0 0 CMOSN
3: + L=0.35u
4: + W=10u
5: + M=1
6: V_V1      VCC 0 5
7: M_M5      N102627 N102627 N145249 N145249 CMOSN
8: + L=0.35u
9: + W=10u
10: + M=1
11: I_I2      VCC N102627 DC 1u
12: R_R1      OUT VCC 1
13: I_I1      VCC IN DC 100u
14: M_M4      N132633 IN 0 0 CMOSN
15: + L=0.35u
16: + W=10u
17: + M=1
18: M_M6      N145249 N145249 0 0 CMOSN
19: + L=0.35u
20: + W=10u
21: + M=1
22: M_M2      OUT N102627 N132633 N132633 CMOSN
23: + L=0.35u
24: + W=10u
25: + M=1
26: M_M1      IN N102627 N132298 N132298 CMOSN
27: + L=0.35u
28: + W=10u
29: + M=1

```

#### 4. Ожидаемые параметры и характеристики ТЗ

Многие из рассмотренных выше токовых зеркал выполняют свои основные функции в диапазоне входных токов, изменяющихся на 6 порядков (1 мкА – 1 мА).

Выходное сопротивление токовых зеркал, определяющее коэффициент усиления по напряжению многих транзисторных каскадов с активными нагрузками, зависит от схемотехники ТЗ и рабочих токов. Так, для простейших ТЗ численные значения  $r_{\text{вых}}$  лежат в диапазоне «единицы килоом – сотни килоом», что недостаточно для многих применений.

Каскодные токовые зеркала и токовые зеркала Уильсона, а также ТЗ с отрицательной обратной связью, имеют более высокие значения  $r_{\text{вых}}$ , что позволяет получить на их основе коэффициент усиления порядка 100-120 дБ.

На практике коэффициент передачи по току  $K_i$  может отличаться от единицы как в меньшую так и в большую стороны, что связано с влиянием внутренней обратной связи основных транзисторов при неодинаковых статических напряжениях сток-исток.

## 5. Параметры оптимизации

Параметрами оптимизации для токовых зеркал являются:

- геометрия транзисторов,
- выходное сопротивление в рабочем диапазоне токов,
- минимальное статическое напряжение на токовом выходе,
- минимальное статическое напряжение на токовом входе,
- численные значения коэффициента передачи  $K_i$  и его погрешности, зависящие как от технологических разбросов, так и неидентичности статических напряжений сток-исток основных транзисторов,
- собственное токопотребление ТЗ и величина тока  $I_p$  цепи установления статического режима (рис. 1, если она имеется),
- влияние температуры и радиации, динамические параметры, характеризующие работу ТЗ с импульсными входными токами, а также малосигнальный диапазон рабочих частот.

Неидеальность токовых зеркал ограничивает предельные параметры многих современных микросхем, поэтому задачи их выбора, рационального построения и оптимизации относятся к одной из актуальных проблем современной микроэлектроники.

Разработка выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект 16-19-00122)