**Расчёт коэффициента усиления для небольших схем, которые могут входить в законченные аналоговые блоки**

1. **Общие сведения**

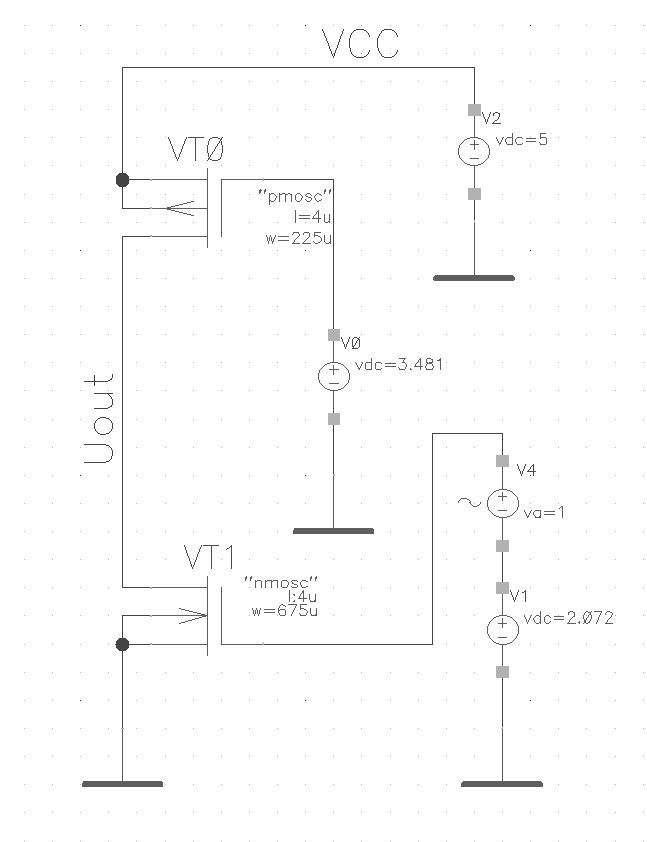
* *i* – бесконечно малое приращение (далее, приращение) тока стока транзистора, например, *i0* – бесконечно малое приращение тока стока транзистора VT0;
* *uout* – приращение выходного напряжения;
* *g* – крутизна транзистора

где *∂ugs* – приращение напряжения затвор-исток транзистора;

*∂ig* – приращение тока стока, вызванное приращением *∂ugs* транзистора;

* *r* – выходное сопротивление транзистора
* *Ku* – коэффициент усиления на выходе схемы *uout*;
* *Ku1* – коэффициент усиления на выходе схемы *uout1*;
* *Id* – ток стока транзистора;
* Расчёт схем проводится при напряжении питания 5 В, Spice-параметрах, приведённых в приложении 1, длине канала транзисторов 4 мкм.

1. **Схема 1**

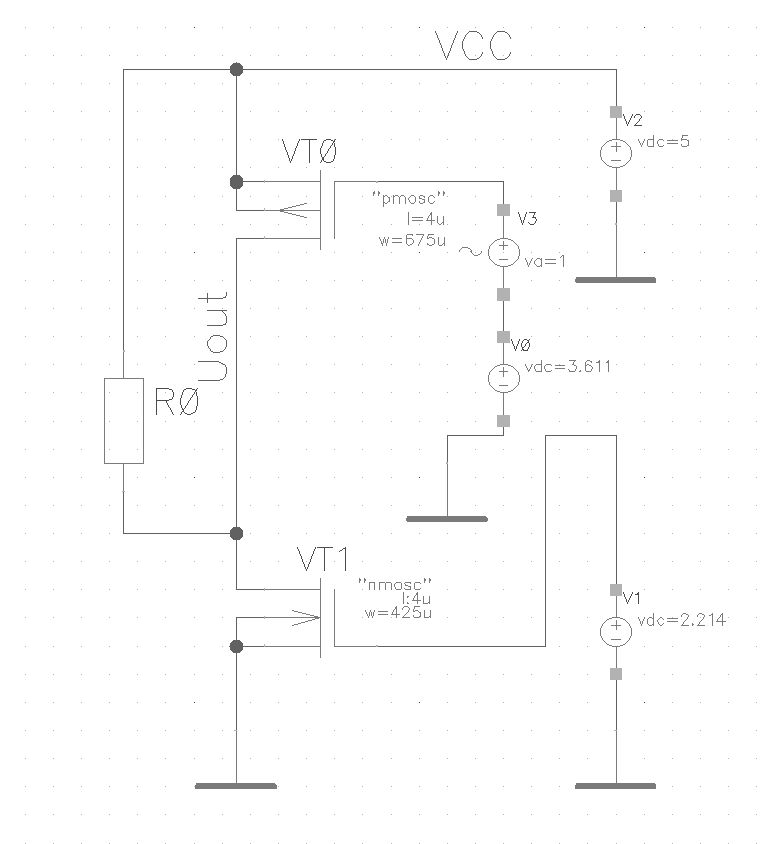
****

Здесь источник входного сигнала подключен к затвору VT1, в нагрузку которого включен VT0.

Приращение выходного напряжения *∂uout* одинаковое для транзисторов VT0 и VT1. Это эквивалентно тому, что r1 и r0 для данного случая параллельны, поэтому *∂ugs1* вызовет общее приращение тока *∂ig1 = ∂i1 + ∂i0*. Следовательно, *Ku* определяется следующей формулой

Для примера зададим выходное напряжение Uout = 3.1 В, а ток стока транзисторов *Id* = 45 мкА. Из формулы видно, что при увеличении *g1, r0, r1* можно увеличить *Ku* до необходимых значений. Тогда для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0 и VT1, соответственно, w0 = 225 мкм и w1 = 675 мкм, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g1 =* 0.000465078*, r0 =* 8577260*, r1 =* 13171291, следовательно, *Ku* = 2415.

1. **Схема 2**

****

Здесь источник входного сигнала подключен к затвору VT0, в нагрузку которого включен VT1, а также к выходу подключен резистор с сопротивлением R0 = 47.5 кОм.

*∂ugs0* вызовет приращение тока

где *∂i*1+ − приращение тока стока VT1 за счёт приращения *∂ugs0.*

Тогда приращение тока стока VT1 с учётом изменения тока через R0

Приращение тока через R0

Тогда приращение выходного напряжения равно

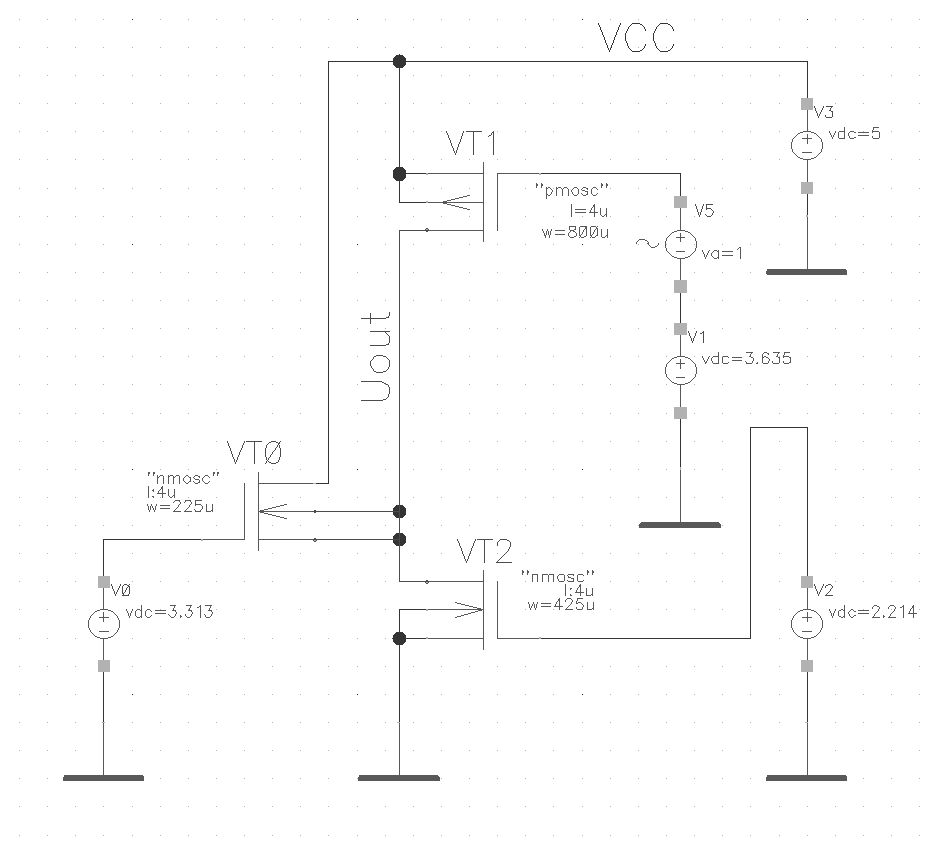
Приращение выходного напряжения также равно

Приравнивая эти 2 части получаем:

Откуда находим коэффициент усиления *Ku*

Для примера зададим выходное напряжение Uout = 3.1 В, ток стока транзистора VT0 *Id0* = 45 мкА, ток через резистор R0 *IR0* = 40 мкА. Из формулы видно, что при увеличении *g0, r0, r1* можно увеличить *Ku* до необходимых значений. Тогда для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0 и VT1, соответственно, w0 = 675 мкм и w1 = 425 мкм, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g0 = 0.000509151, r0 =* *5630736, r1 =* *10843621*, следовательно, *Ku* = 23.9.

1. **Схема 3**

****

В отличие от предыдущей схемы вместо резистора включен транзистор VT0.

*∂ugs1* вызовет приращение тока

где *∂i*2+ − приращение тока стока VT2 за счёт приращения *∂ugs1.*

Тогда приращение тока стока VT2 с учётом изменения тока стока VT0

Приращение выходного напряжения

Приращение тока стока *∂i*0 нужно найти из уравнения

Тогда

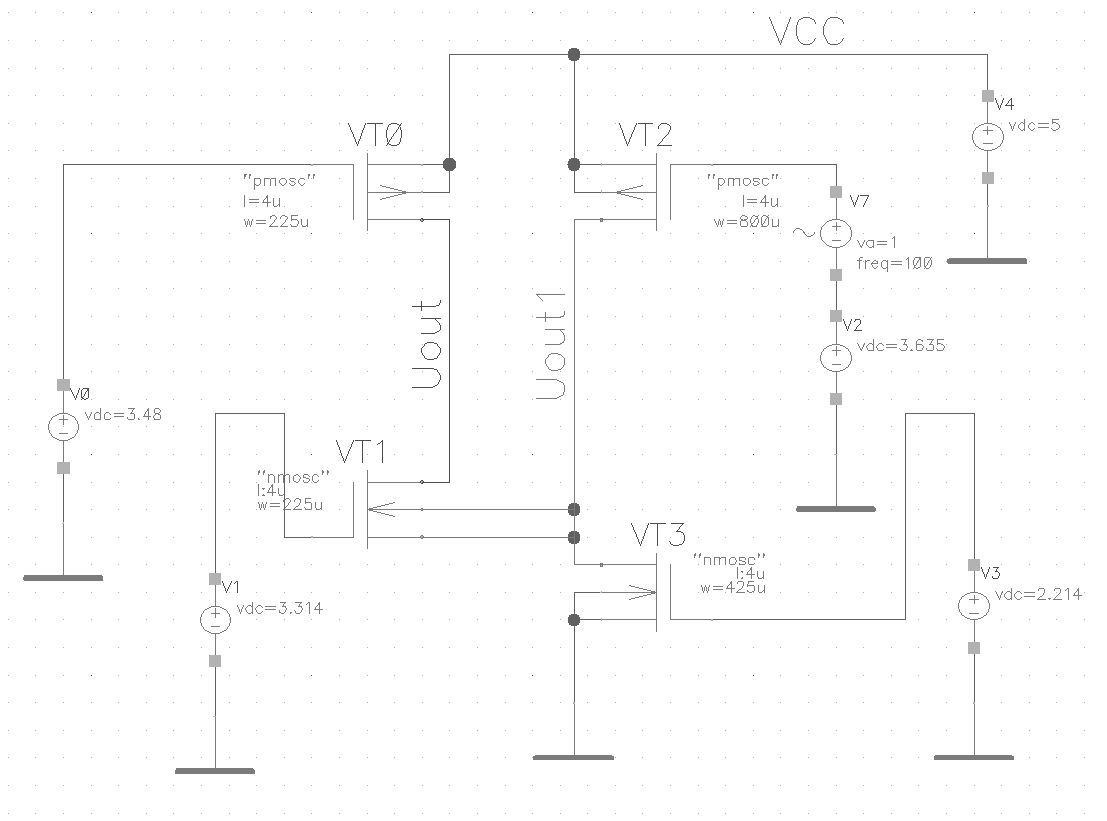
Подставляя полученный *∂i*0 в уравнение *∂uout,* получим:

Отсюда находим *∂i*2+:

Следовательно, коэффициент усиления

Для примера зададим выходное напряжение Uout = 1.1 В, ток стока транзистора VT0 *Id0* = 45 мкА, ток стока транзистора VT1 *Id1* = 40 мкА. Для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0…VT2, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g0 = 0.000267985, g1 = 0.00052306, r0 =* *20493956, r1 =* *5580738*, *r2 =* *10843833,* следовательно, *Ku* = 1.95.

1. **Схема 4**

****

В отличие от предыдущей схемы в нагрузку транзистора VT1 включен транзистор VT0.

1. Расчёт коэффициента усиления при подаче переменного сигнала на затвор транзистора VT2

*∂ugs2* вызовет приращение тока

где *∂i*3+ − приращение тока стока VT3 за счёт приращения *∂ugs2.*

Тогда приращение тока стока VT3 с учётом изменения тока стока VT1

Приращение тока стока *∂i1* находится из следующего уравнения:

где приращение выходного напряжения *∂uout = ∂i*1 ∙ *r0.*

Подставляя *∂uout* в уравнение выше, получим уравнение:

из которого выразим *∂i*3+

Приращение напряжения *∂uout1* равно:

Тогда получаем уравнение

из которого также выражаем *∂i*3+

Из выражений для *∂i*3+ находим *∂i*1

Следовательно, коэффициент усиления

Для примера зададим выходное напряжение Uout1 = 1.1 В, Uout = 3.5 В ток стока транзистора VT0 *Id0* = 45 мкА, ток стока транзистора VT2 *Id2* = 40 мкА. Для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0…VT3, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g1 =* *0.000267985, g2 =* *0.00052306, r0 =* *8577413, r1 =* *20494257*, *r2 =* *5580738, r3 =* *10843833,*  следовательно, *Ku* = 4483.

1. Расчёт коэффициента усиления при подаче одинакового переменного сигнала на затвор транзисторов VT0 и VT3

Приращение потенциала затвора VT3 *∂u*3 вызовет приращение тока *∂ig*3 = *∂i*1*g*3 + *∂i*2*g*3 + *∂i*3*g*3,

а приращение потенциала затвора VT0 *∂u*0 – приращение тока *∂ig*0 = *∂i*0*g*0 + *∂i*1*g*0

При этом

Поэтому

*∂i*1*g*3 также можно выразить из следующего уравнения:

Тогда

Из 2 уравнений для *∂i*1*g*3 выразим *∂i*3*g*3

Приращение выходного напряжения *∂uout*:

Подставляя в последнее уравнение вместо *∂i*0*g*0 и *∂i*1*g*3 выражения, полученные выше, получим:

Из последнего равенства выражаем *∂i*3*g*3:

Из 2 полученных уравнений для *∂i*3*g*3 выражаем *∂i*1*g*0:

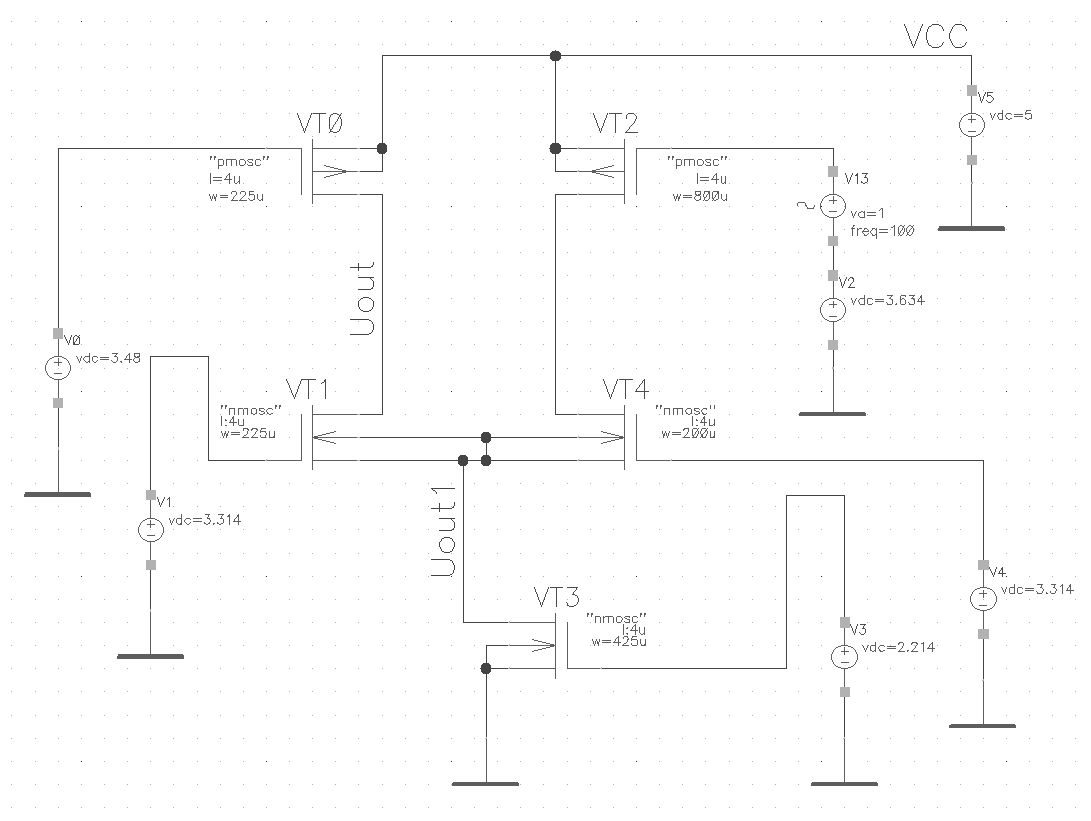
Следовательно, коэффициент усиления для цепи Uout:

Коэффициент усиления для цепи Uout1:

Т. к. *∂u*0 = *∂u*3, *g0* = *∂ig*0/*∂u*0, *g3* = *∂ig*3/*∂u*3,то при расчёте *Ku* и *Ku1* в формулы для *∂i*1*g*0, *∂i*1*g*3, *∂i*3*g*3, *∂i*0*g*0 вместо *∂ig*0и *∂ig*3 нужно подставить *g0* и *g3* соответственно, а *∂u*0 из формул для *Ku* и *Ku1* необходимо исключить.

Для примера зададим выходное напряжение Uout1 = 1.1 В, Uout = 3.5 В ток стока транзистора VT0 *Id0* = 45 мкА, ток стока транзистора VT2 *Id2* = 40 мкА. Для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0…VT3, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g1 =* *0.000267985, g2 =* *0.00052306, r0 =* *8577413, r1 =* *20494257*, *r2 =* *5580738, r3 =* *10843833,*  следовательно, *Ku* = 6845, а *Ku*1 =3.132.

1. **Схема 5**



В отличие от предыдущей схемы в нагрузку транзистора VT2 добавлен транзистор VT4.

*∂ugs2* вызовет приращение тока

где *∂i*3+ − приращение тока стока VT3 за счёт приращения *∂ugs2.*

Тогда приращение тока стока VT3 с учётом изменения тока стока VT1

Приращение тока стока *∂i1* находится из следующего уравнения:

где приращение выходного напряжения *∂uout = ∂i*1 ∙ *r0.*

Подставляя *∂uout* в уравнение выше, получим уравнение:

из которого выразим *∂i*3+

Приращение напряжения на стоке VT2 *∂uout\_ds2* равно:

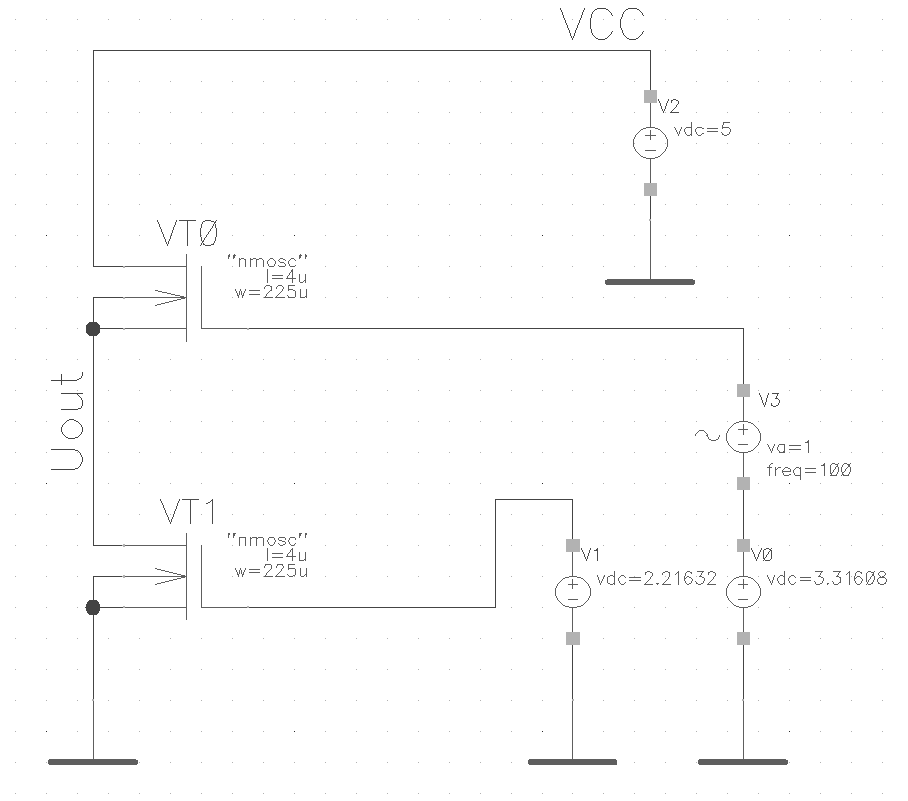
Тогда *∂i*3+ можно также выразить следующим образом:

Из полученных выражений для *∂i3+* выразим *∂i1*

Следовательно, коэффициент усиления

Для примера зададим выходное напряжение Uout1 = 1.1 В, Uout = 3.5 В ток стока транзистора VT0 *Id0* = 45 мкА, ток стока транзистора VT2 *Id2* = 40 мкА. Для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0…VT4, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g1 =* *0.000267985, g2 =* *0.000523064, r0 =* *8577413, r1 =* *20494257*, *r2 =* *5580822, r3 =* *10843833, r4=* *23059546. С*ледовательно, *Ku* = 433.8.

1. **Схема 6**

****

Приращение тока стока *∂i1* находится из следующего уравнения:

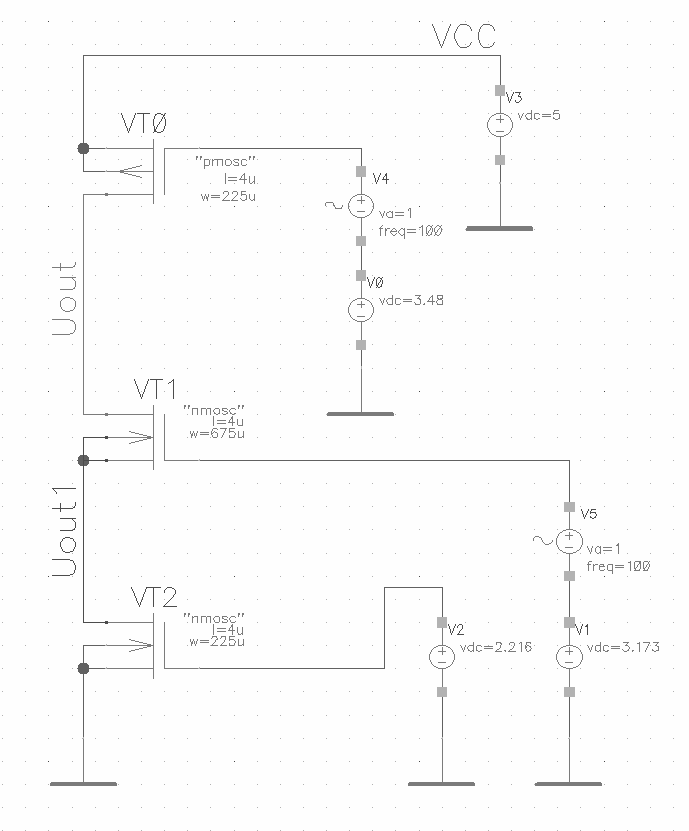
где *∂u0* – приращение потенциала затвора VT0 (входное напряжение схемы).

Следовательно,

Коэффициент усиления для данной схемы:

Для примера зададим выходное напряжение Uout = 1.1 В, ток стока транзистора VT1 *Id1* = 45 мкА. Для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0, VT1, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g0 =* *0.000465078, r0 =* *13171266, r1 =* *20494516. С*ледовательно, *Ku* = 0.9997.

1. **Схема 7**

****

1. Расчёт коэффициента усиления при подаче переменного сигнала на затвор транзистора VT1

Приращение тока стока *∂i1* находится из следующего уравнения:

где *∂u1* – приращение потенциала затвора VT1 (входное напряжение схемы).

Следовательно,

Коэффициент усиления для цепи Uout1:

Коэффициент усиления для цепи Uout:

Для примера зададим выходное напряжение Uout1 = 1.1 В, Uout = 3.5 В ток стока транзистора VT1 *Id1* = 45 мкА. Для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0…VT2, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g1 =* *0.000465078, r0 =* *8577413, r1 =* *13171313, r2 =* *20494516.* Следовательно, *Ku*1 = 0.9997, *Ku* = 0.4182.

1. Расчёт коэффициента усиления при подаче одинакового переменного сигнала на затворы транзисторов VT0 и VT1

Приращение тока стока *∂i2g0* VT1, VT2 за счёт приращения напряжения *∂u0* (входного напряжения схемы) на затворе VT0 находится из следующего уравнения:

где *∂i2g1 –* приращение тока стока VT0, VT1, VT2 за счёт приращения напряжения на затворе VT1 *∂u1 = ∂u0 ,*

*∂i0g0 –* приращение тока стока VT0 за счёт приращения напряжения *∂u0 .*

Суммарное приращение тока стока *∂ig0* за счёт приращения напряжения *∂u0* равно:

*∂ig0 = ∂i0g0* + *∂i2g0 .*

Следовательно,

Выходное напряжение *∂uout*:

Нагрузкой транзистора VT0 является каскодная пара VT1 и VT2, сопротивление которой равно:

Поэтому ток *∂i2g0* равен также:

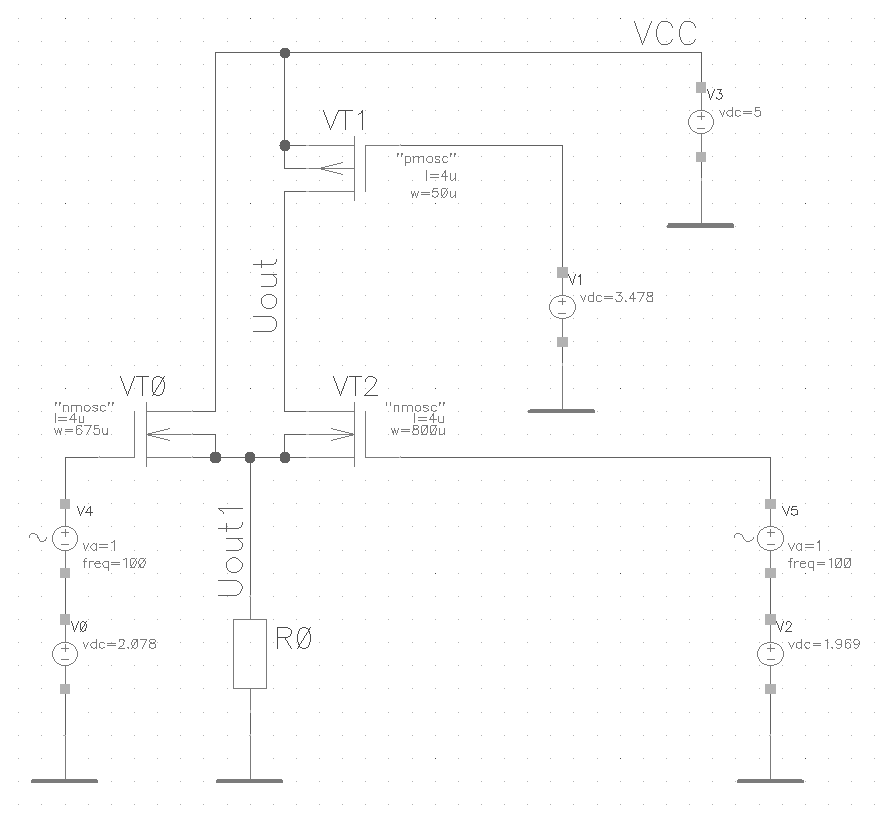
Приравняв уравнения *∂i2g0* друг другу, получим приращение тока *∂i2g1*:

Коэффициент усиления для цепи Uout1:

Коэффициент усиления для цепи Uout:

Для примера зададим выходное напряжение Uout1 = 1.1 В, Uout = 3.5 В ток стока транзистора VT1 *Id1* = 45 мкА. Для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0…VT2, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g1 =* *0.000465078, r0 =* *8577413, r1 =* *13171313, r2 =* *20494516.* Следовательно, *Ku*1 = 0.59, *Ku* = 2509.

1. **Схема 8**

****

1. Расчёт коэффициента усиления при подаче переменного сигнала на затвор транзистора VT0

Приращение тока стока *∂i0* находится следующим образом:

где *∂u0* – приращение потенциала затвора VT0 (входное напряжение схемы).

*∂i0* равен также:

Приращение тока стока *∂i2* находится из следующего уравнения:

Следовательно,

Тогда *∂iR0* равен

Коэффициент усиления для цепи Uout1:

Коэффициент усиления для цепи Uout:

Для примера зададим небольшое сопротивление резистора R0 = 100 Ом, чтобы показать как влияет маленький резистор R0 на общий коэффициент усиления. Умышленно сделаем несимметрию плеч, т. е. сделаем токи транзисторов VT0 и VT2 разными: *Id0* = 45 мкА, *Id2* = 10 мкА, также зададим Uout = 3.5 В. Для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0…VT2, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g0 =* *0.000465078, g2 = 0.000238864,* *r0 =* *13171231, r1 =* *38764856, r2 =* *26902576.* Следовательно, *Ku*1 = 0.044, *Ku* = 167.1.

1. Расчёт коэффициента усиления при подаче переменного сигнала на затвор транзистора VT2

Приращение тока стока *∂i2* находится из следующего уравнения:

где *∂u2* – приращение потенциала затвора VT2 (входное напряжение схемы).

*∂i2* равен также:

Следовательно,

Приращение тока стока *∂i0* равно:

Тогда *∂iR0* равен

Коэффициент усиления для цепи Uout1:

Коэффициент усиления для цепи Uout:

Для примера зададим небольшое сопротивление резистора R0 = 100 Ом, чтобы показать как влияет маленький резистор R0 на общий коэффициент усиления. Умышленно сделаем несимметрию плеч, т. е. сделаем токи транзисторов VT0 и VT2 разными: *Id0* = 45 мкА, *Id2* = 10 мкА, также зададим Uout = 3.5 В. Для данного режима находим ширину канала транзисторов VT0…VT2, а также напряжения рабочей точки транзисторов. При этом *g0 =* *0.000465078, g2 = 0.000238864,* *r0 =* *13171231, r1 =* *38764856, r2 =* *26902576. С*ледовательно, *Ku*1 = 0.009268, *Ku* = 3758.

**Приложение 1 – SPICE-параметры для симулятора SpectreS САПР Cadence, с которыми проводился расчёт схем**

.model nmosc nmos LEVEL=3 &

WD=285.3n &

UO=194.7 &

VTO=1.5180 &

NFS=0 &

TOX=30.00n &

NSUB=2.72389E17 &

VMAX=489.4K &

RS=8f &

RD=8f &

XJ=1p &

LD=263.6n &

DELTA=1.930 &

THETA=1.000u &

ETA=9.101m &

KAPPA=6.921

.model pmosc pmos LEVEL=3 &

WD=363.8n &

UO=150.6 &

VTO=-1.1930 &

NFS=0 &

TOX=30.00n &

NSUB=1.762T &

VMAX=125.1K &

RS=1f &

RD=1f &

XJ=1n &

LD=43.06n &

DELTA=638.0m &

THETA=2.907m &

ETA=27.42m &

KAPPA=1.747