

# Параметры операционных усилителей. Как измерить и какие возникают сложности?

Ю. Павлюк<sup>1</sup>, И. Гуреев<sup>2</sup>

УДК 621.375 | ВАК 05.27.01

Операционный усилитель – одна из базовых схем аналоговой электроники, на основе которой можно строить сложные системы. Данный элемент существует как отдельно, так и присутствует в составе почти всех интегральных микросхем: AC/DC- и DC/DC-преобразователей, АЦП, ЦАП, интерфейсов, синтезаторов частот, микроконтроллеров и др. Система, в которой будет использоваться усилитель, накладывает определенные ограничения на его параметры. Как измерить параметры усилителя и с какими трудностями можно столкнуться? Эти вопросы рассматриваются в статье.

## БАЗОВЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

Операционный усилитель (ОУ) представляет собой преобразователь напряжения с высоким коэффициентом умножения, разработанный для применения в системах с обратной связью. Существует много различных архитектур для построения усилителя на базе транзисторов, однако в большинстве случаев схемотехники рассматривают его как некий «черный ящик» или треугольник, в котором есть три основных вывода: неинвертирующий вход, инвертирующий вход, выход. Для полностью дифференциальных усилителей доступны два выхода: инвертирующий и неинвертирующий. Идеальный усилитель можно представить, как показано на рис. 1.

Основные параметры ОУ:

- $K_u$  – коэффициент усиления;
- $V_{os}$  – напряжение смещения нуля;
- диапазон входных и выходных напряжений;
- $GBW$  – частота единичного усиления;
- $CMRR$  – коэффициент ослабления синфазного напряжения;
- $Noise$  – собственный уровень шума усилителя;
- $I_{in}$  – входной ток;
- $+PSRR$  – устойчивость к помехе в цепях питания;
- $-PSRR$  – устойчивость к помехе в цепях «земли»;
- $V-$ ,  $V+$  – напряжения «земли» и питания соответственно;
- $P$  – потребляемая мощность.

Теперь приступим к анализу схем для измерения различных параметров усилителя.

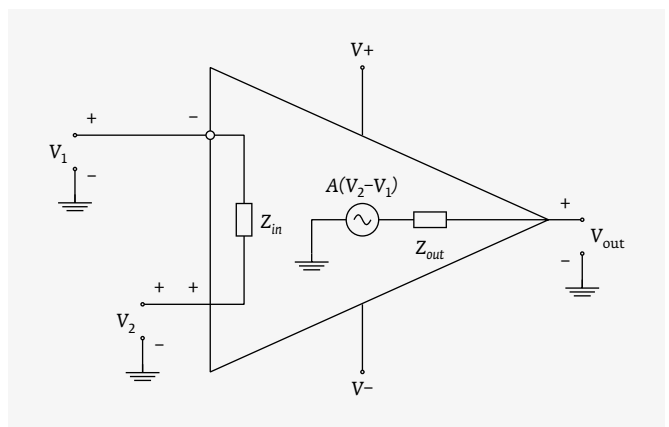


Рис. 1. Схема идеального операционного усилителя

## ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОУ

При разработке микросхем в симуляторе довольно легко проверить все параметры, которые вас интересуют. В современных САПР есть много различных типов анализа схем, которые позволяют сделать это быстро. Но при работе с реальной схемой приходится сразу же сталкиваться со множеством проблем. В качестве примера можно привести один из проектов, над которым приходилось работать – изолирующий усилитель ошибки (рис. 2). Для работы данной схемы в составе изолированного DC-DC-преобразователя очень важны параметры входного ОУ.

В России существует отдельный ГОСТ 23089.(1, 2, 3, 4, 5, 13, 11), в котором описаны схемы измерений, но нигде нет достаточной информации о том, как именно они работают и какие проблемы могут встретиться в данном процессе. Рассмотрим подробно все схемы измерений различных параметров ОУ.

<sup>1</sup> МИЭТ, аспирант; АО «ПКК Миландр», инженер 1 категории.

<sup>2</sup> МИЭТ, аспирант; АО «ПКК Миландр», инженер 2 категории.

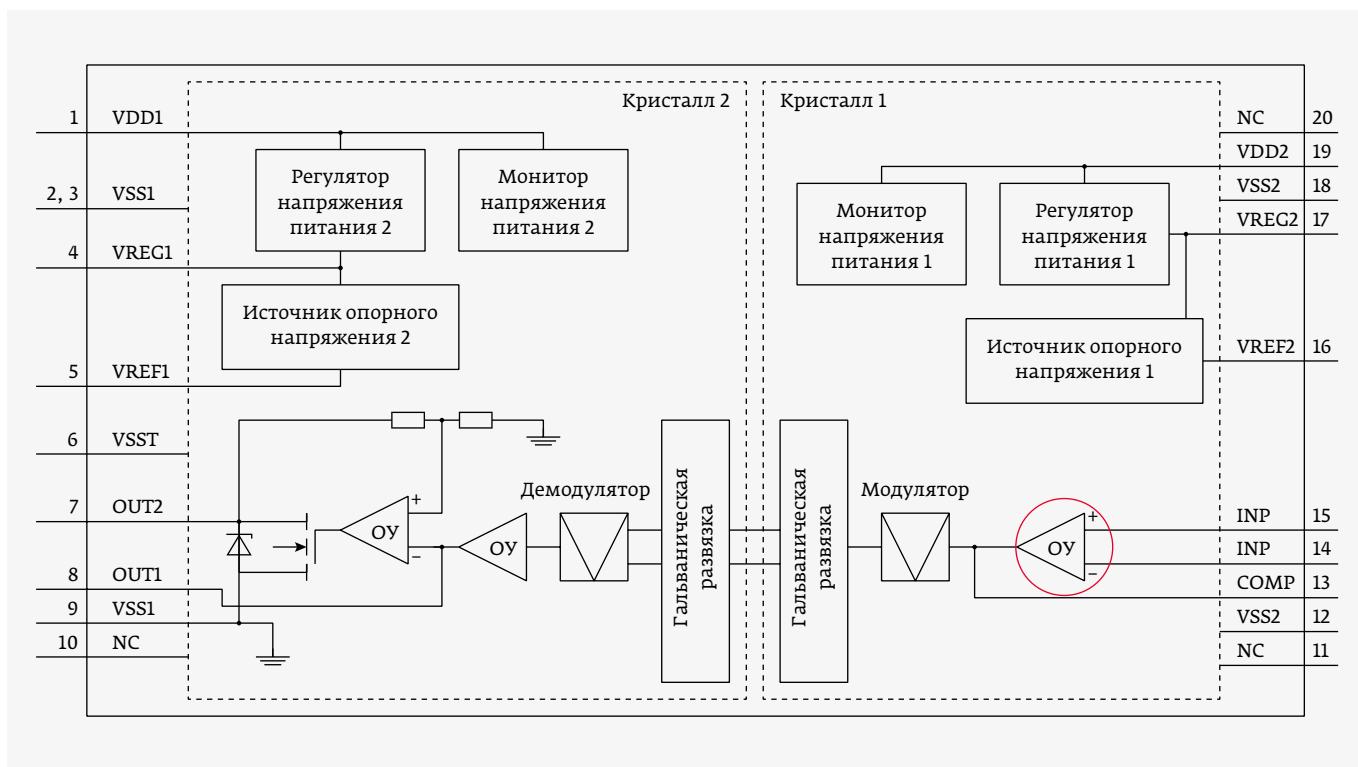


Рис. 2. Блок-схема изолированного усилителя

**Коэффициент усиления**

Для измерения коэффициента усиления  $K_u$  можно использовать схему, для работы которой необходимо применять вспомогательный усилитель (рис. 3).

Для того чтобы при измерении избавиться от напряжения  $V_{os}$ , необходимо производить измерения два раза, при разных  $G_4$ .

1.  $G_4 = U_1$ , тогда  $U_{xi} = U_{x1}$ .
2.  $G_4 = U_2$ , тогда  $U_{xi} = U_{x2}$ .

Выведем формулу для определения  $K_u$ . Запишем уравнения Кирхгофа:

$$\begin{aligned} U_{xi} &= (V_4 - G_5) \cdot A, \\ \frac{G_4 - V_4}{R_7} &= \frac{V_4 - V_3}{R_5}, \\ \frac{U_{xi} - V_1}{R_3} &= \frac{V_1 - G_3}{R_1}, \\ ((V_{os} + G_3) - V_1) \cdot K_u &= V_3. \end{aligned}$$

Составим уравнения для двух этапов измерения, проводя следующие замены переменных:

1.  $V_1 \rightarrow V_{11}, V_3 \rightarrow V_{31}, V_4 \rightarrow V_{41}, U_{xi} \rightarrow U_{x1}, G_4 = U_1$ .
2.  $V_1 \rightarrow V_{12}, V_3 \rightarrow V_{32}, V_4 \rightarrow V_{42}, U_{xi} \rightarrow U_{x2}, G_4 = U_2$ .

Получаем систему из 8-ми уравнений с 8-ю неизвестными:  $V_{11}, V_{12}, V_{31}, V_{32}, V_{41}, V_{42}, K_u, V_{os}$ . Решая уравнения, получаем:

$$\begin{aligned} K_u &= \frac{R_1 + R_3}{R_1} \cdot \frac{(U_1 - U_2) \cdot R_5 + (R_5 + R_7) \cdot (U_{x2} - U_{x1})}{(U_{x1} - U_{x2}) \cdot R_7} = \\ &= |A \rightarrow \infty, R_5 = R_7| \approx \frac{R_1 + R_3}{R_1} \cdot \frac{U_1 - U_2}{U_{x1} - U_{x2}}. \end{aligned}$$

Измеряемое напряжение  $U_{xi}$  будет равно:

$$U_{xi} = G_3 + \frac{R_1 + R_3}{R_1} \cdot \left( V_{os} - \frac{G_4}{K_u} \right).$$

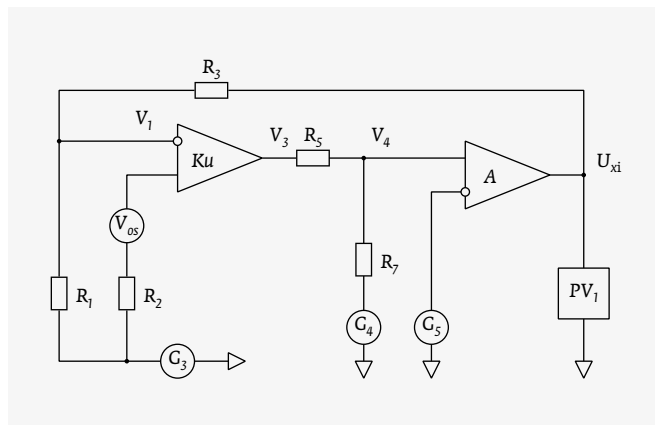


Рис. 3. Схема измерения коэффициента усиления.  $PV_1$  – измеритель напряжения (вольтметр)

Перейдем от теории к практике: нужно загрузить spice-модель вспомогательного усилителя в симулятор и собрать схему измерения (рис. 4).

Для компенсации всей системы необходимо использовать RC-цепь на неинвертирующем входе вспомогательного усилителя.

Для измерений источник  $V_{test}$  создает два уровня напряжений  $U_2, U_1$ , после чего замеряется напряжение на  $V_{in}$ , и по формуле пересчитывается в коэффициент усиления (рис. 5).

Для исследуемого усилителя получается значение 105 дБ.

Возможные трудности при измерениях:

- влияние смещения нуля на рабочую точку вспомогательного усилителя. При смещении нуля исследуемого усилителя 5 мВ выход вспомогательного усилителя по DC становится  $-4,7$  В. Проблема устраняется при использовании биполярного питания;
- при моделировании с включенными в симуляторе шумами транзисторов, их амплитуда оказывается сопоставимой с разницей напряжений, необходимых для вычислений  $K_u$  (рис. 6). Для улучшения точности измерений необходимо использовать усреднение,

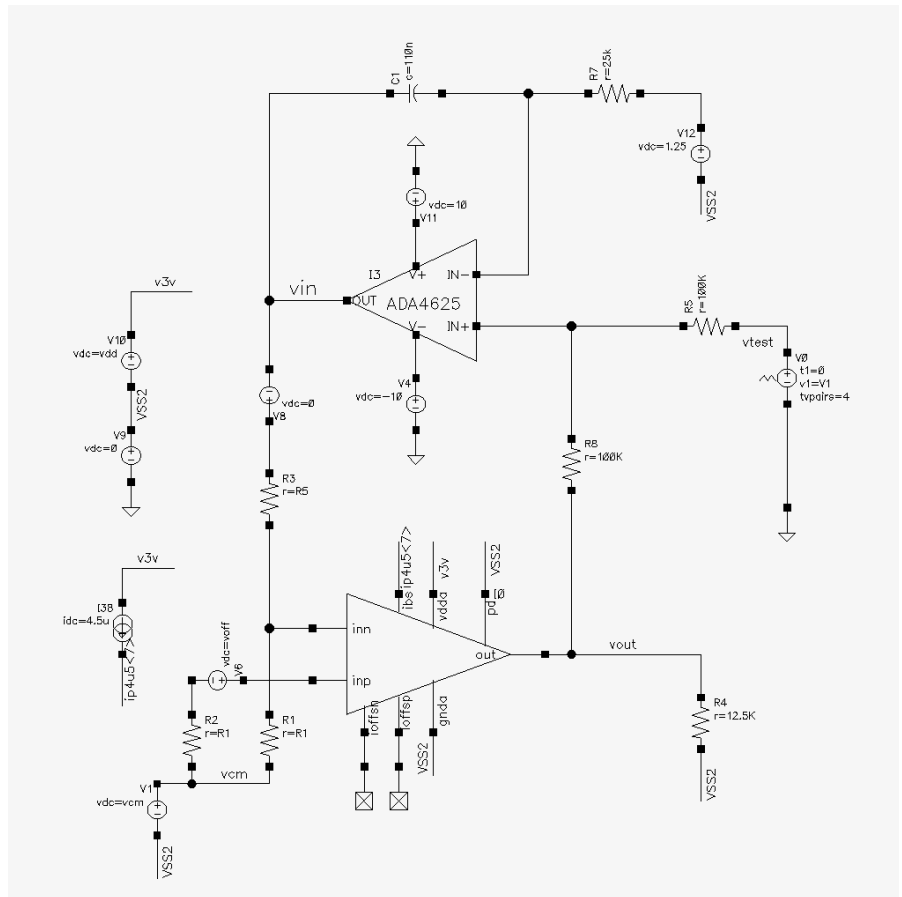


Рис. 4. Схема измерения коэффициента усиления, собранная в симуляторе

однако оно не помогает полностью избавиться от шума. Если коэффициент усиления не слишком высокий, шум не будет сильной помехой.

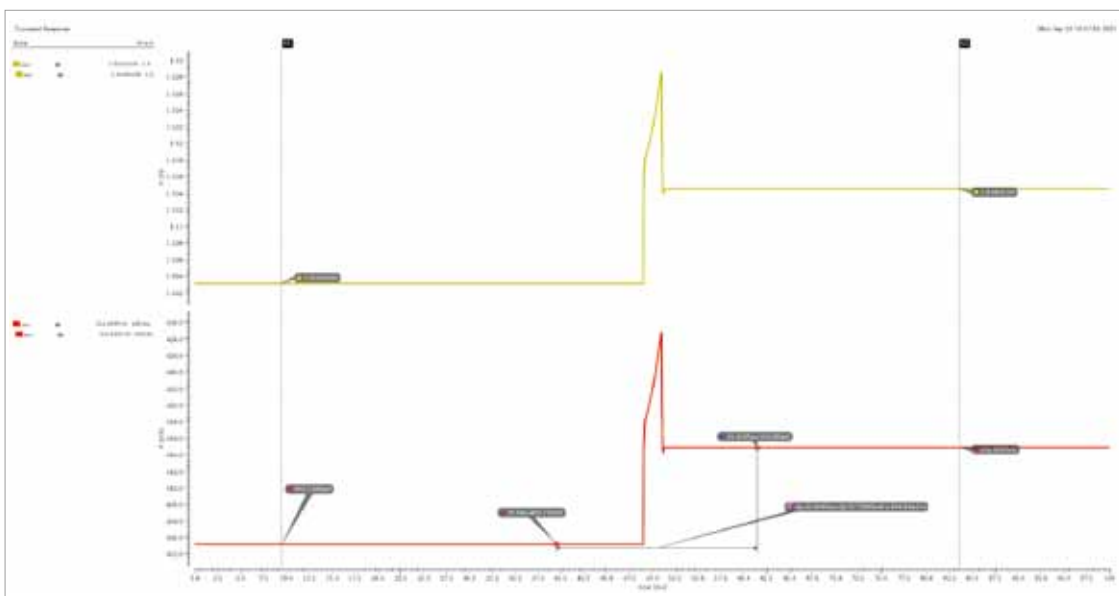
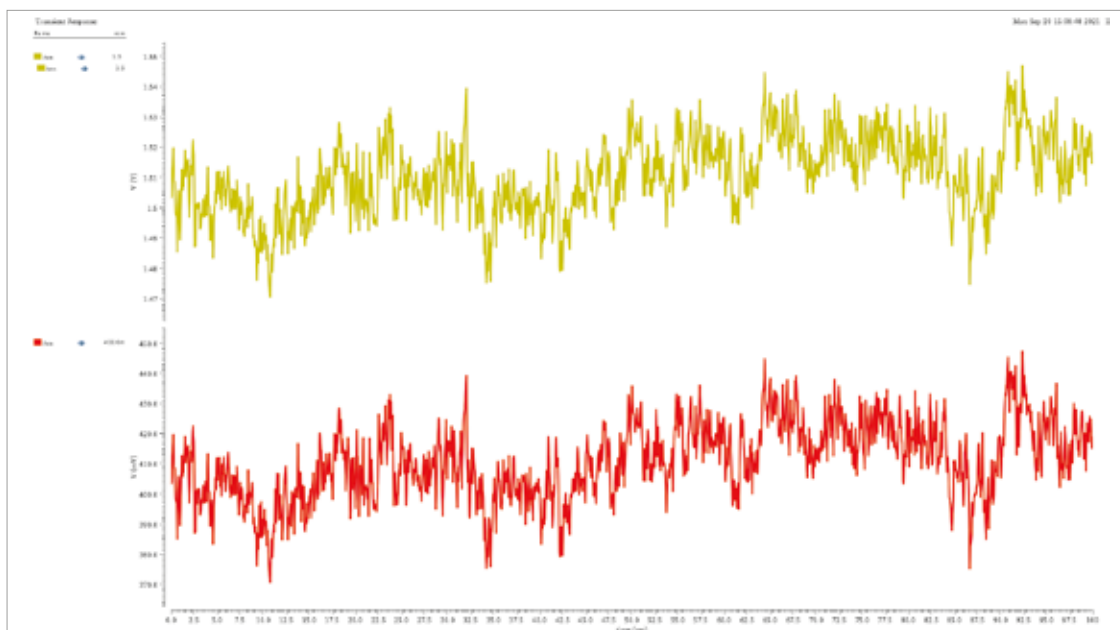


Рис. 5. Работа схемы при TRAN-анализе, где  $V_{in}$  – выход вспомогательного усилителя (для различных  $C_2$ )

**Рис. 6.** Выход вспомогательного усилителя с учетом шума исследуемого усилителя



У исследуемого усилителя минимальное значение  $Ku = 66$  дБ:

$$66 = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{50000 + 50}{50} \cdot \frac{2,1 - 0,4}{dU_{xi}} \right)$$

$$dU_{xi} = 0,4014 \text{ В.}$$

Получается, чтобы отбраковать усилитель нужно задетектировать 0,4 В, что с таким уровнем шума является легкой задачей;

- напряжение на выходе исследуемого усилителя будет равно  $V_{12} + V_{12} - V_{test}$ . Для повышения точности необходимо задавать разницу между двумя  $V_{test}$  как можно больше, однако это ограничивается допустимым выходным напряжением усилителя, что нужно также учитывать.

### Смещение нуля

Рассмотрим схему для измерения смещения  $V_{os}$  (рис. 7).

Найдем формулу, которая будет определять напряжение смещения. Составим систему уравнений:

$$\frac{U_{x1} - V_1}{R_5} = \frac{V_1 - G_3}{R_1}$$

$$((V_{os} + G_3) - V_1) \cdot Ku = G_5.$$

Решая систему (неизвестные –  $V_1$  и  $V_{os}$ ), получаем:

$$V_{os} = \frac{G_5}{Ku} + \frac{R_1}{R_1 + R_5} \cdot (U_{x1} - G_3).$$

Приближенно  $V_{os}$  можно вычислить по формуле:

$$V_{os} \approx \frac{R_1}{R_1 + R_5} \cdot (U_{x1} - G_3).$$

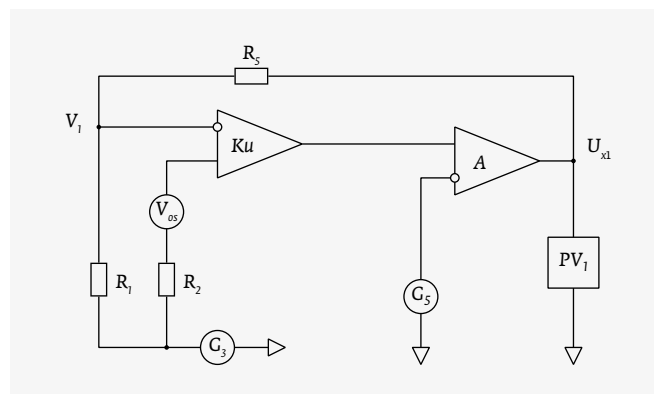
Выходное напряжение вспомогательного усилителя определяется формулой:

$$U_{x1} \approx G_3 + \frac{R_5 + R_1}{R_1} V_{os}.$$

Для увеличения точности измерений необходимо увеличивать  $R_5$ , однако смещение нуля может вывести из режима вспомогательный усилитель, поэтому стоит выбирать усилитель с широким диапазоном биполярного питания.

Приступим к моделированию. Соберем схему измерения с учетом цепи коррекции и однополярного питания исследуемого усилителя (рис. 8).

Проведем АС-анализ (рис. 9). Система работает стабильно, теперь нужно выполнить измерения для разных смещений нуля:  $V_{off} = -5; 2; 5$  мВ (рис. 10).



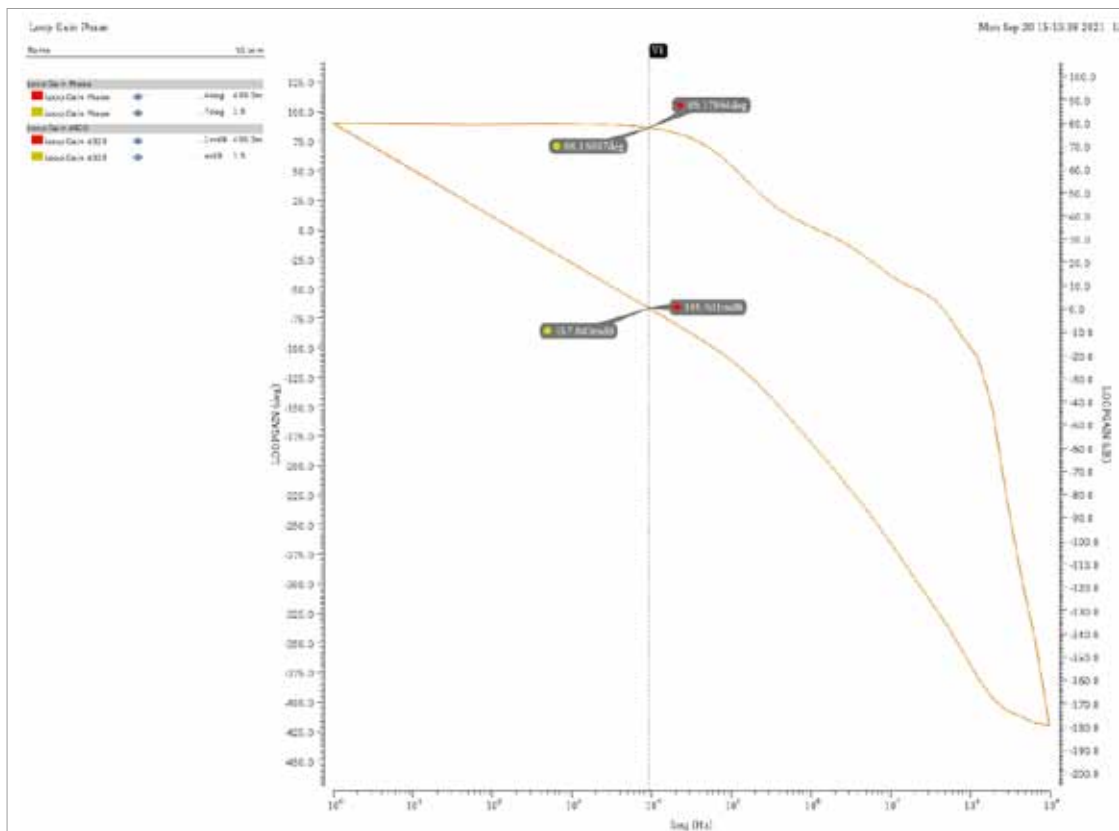
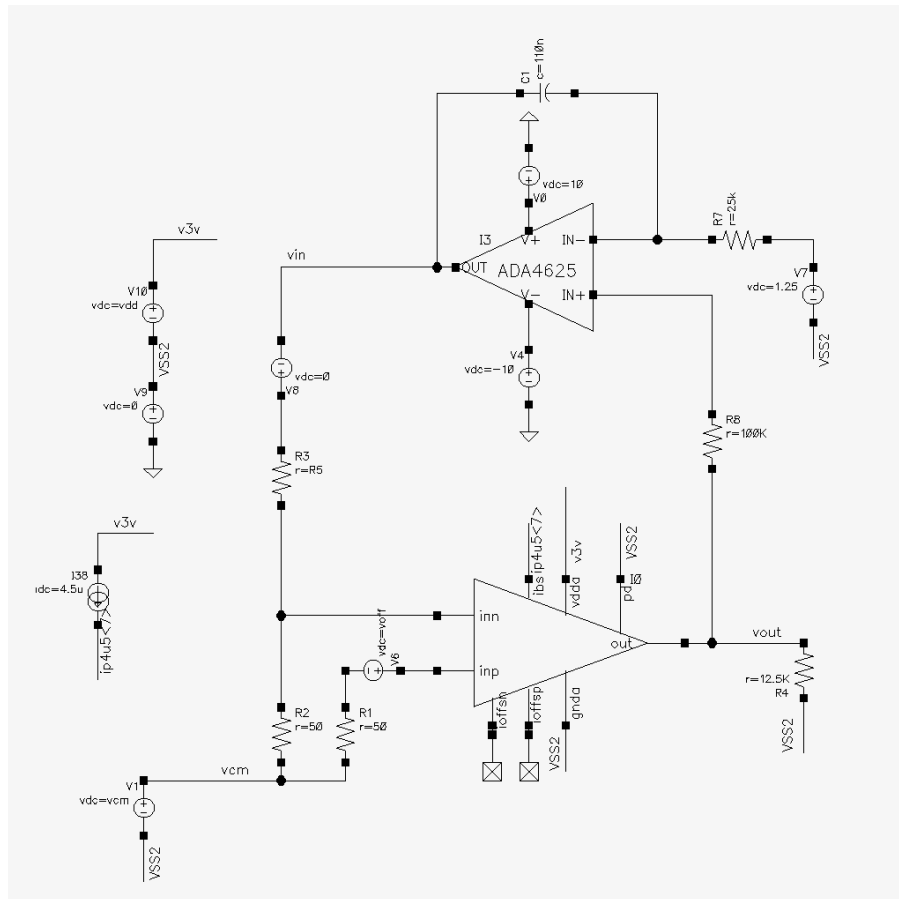
**Рис. 7.** Схема для измерения напряжения смещения

**Рис. 8.** Схема измерения напряжения смещения, собранная в симуляторе

При измерении смещения выход вспомогательного усилителя варьируется от  $-3,5$  до  $5,4$  В. Итого для  $V_{os}$  при  $V_{cm} = 0,4; 1,5$  В получаем значения, приведенные в табл. 1.

Возможные трудности при измерениях:

- при смещении нуля исследуемого усилителя  $-5$  мВ выход вспомогательного усилителя по DC становится  $-3,5$  В. Для  $V_{os} = 5$  мВ напряжение становится  $5,4$  В. Проблема устраняется при использовании биполярного питания;
- при добавлении шума картина измерений не сильно ухудшается (рис. 11). Результаты измерений для этого случая (с использованием усреднения) представлены в табл. 2.



**Рис. 9.** АС-анализ на стабильность обратной связи для схемы измерения напряжения смещения

### Частота единичного усиления

Рассмотрим схему измерения частоты единичного усиления (рис. 12).

Выведем формулу, определяющую частоту единичного усиления  $f_1$  (GBW). Запишем уравнения Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \frac{V_{in} - V_1}{R_1} + \frac{V_4 - V_1}{R_5} &= \frac{V_1 - V_3}{R_2} \\ \frac{V_1 - V_3}{R_2} &= \frac{V_3 - G_3}{R_3} \\ (G_3 - V_3) \cdot Ku &= V_2 \\ (V_2 - G_5) \cdot A &= V_4. \end{aligned}$$

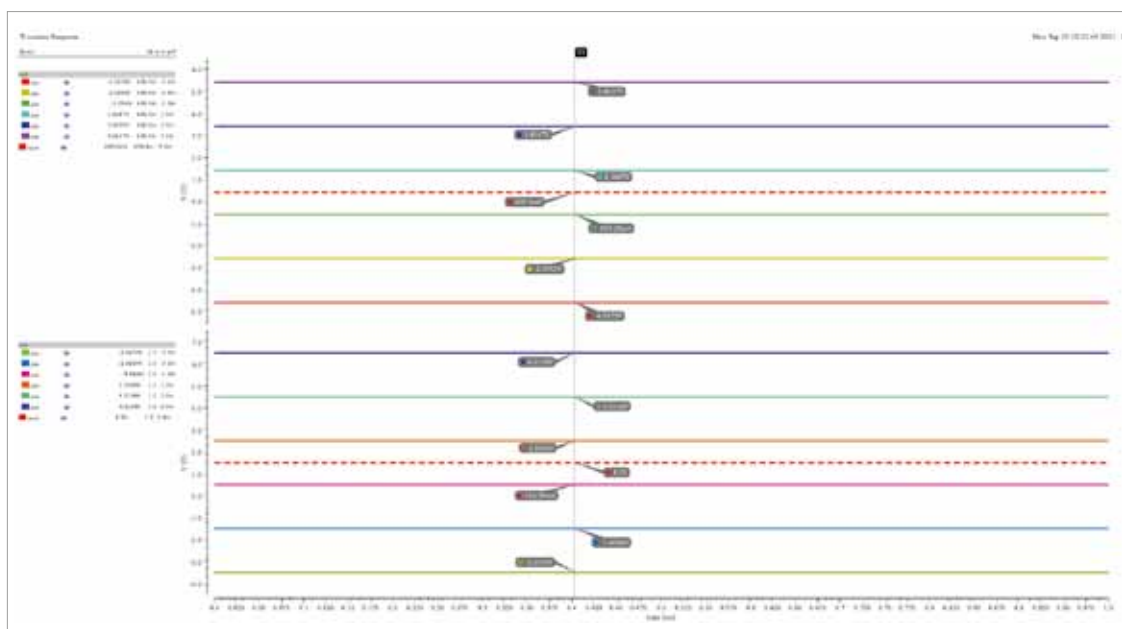
Неизвестные:  $V_3, V_4, V_{in}, Ku$ . Решим систему и найдем чему равен  $Ku$ :

$$Ku = \frac{R_2 + R_3}{R_3} \cdot \frac{V_2}{G_3 - V_1}.$$

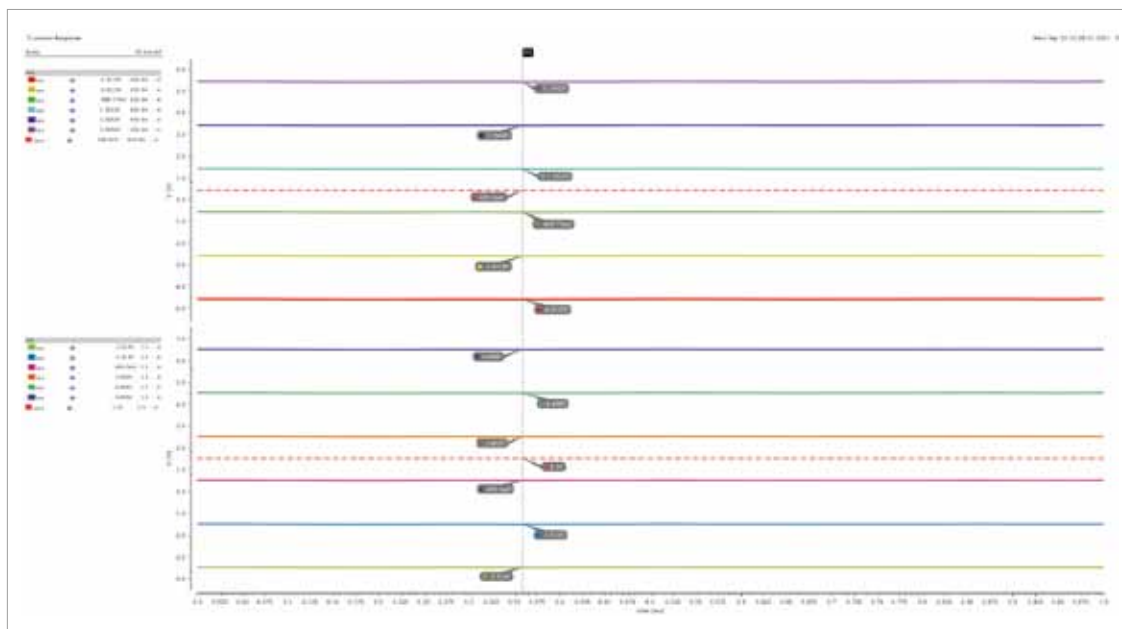
Переходя к амплитудам переменных сигналов с частотой  $f_0$ , учитывая, что сигналы  $V_2$  и  $V_1$  сдвинуты на  $180^\circ$ , а  $G_3 = \text{const}$ , получаем:

$$Ku(f_0) = \frac{V_{2amp}}{V_{1amp}} \frac{R_2 + R_3}{R_3}. \tag{1}$$

Если  $Ku$  имеет наклон 20 дБ/дек вплоть до  $f_1$ , то передаточную характеристику можно представить в виде:



**Рис. 10.** Напряжения на выходе вспомогательного усилителя для различных значений смещения нуля и  $G_3$



**Рис. 11.** Выход вспомогательного усилителя с учетом шума исследуемого усилителя

**Таблица 1.** Результаты измерений напряжения смещения нуля

$V_{cm}, В$	$V_{off}, мВ$	$V_{os}, мВ$	$V_{in}-V_{os}, В$
0,4	-5	-5,009	-5,014
0,4	-3	-3,009	-3,012
0,4	-1	-1,009	-1,01
0,4	1	991,5 мкВ	992,5 мВ
0,4	3	2,991	2,994
0,4	5	4,991	4,996
1,5	-5	-5,008	-5,013
1,5	-3	-3,008	-3,011
1,5	-1	-1,008	-1,009
1,5	1	991,7 мкВ	992,6 мВ
1,5	3	2,992	2,995
1,5	5	4,992	4,997

$$K = \frac{K_0}{(1 + j \cdot 2\pi f \tau_0)}$$

АЧХ данной характеристики можно представить как:

$$Ku = |K| = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \tau_0^2 \cdot (2\pi f)^2}}$$

Если проводить измерения, отступив от «полочки», АЧХ можно записать в следующем виде:

$$Ku \approx \frac{K_0}{2\pi f \tau_0}$$

Для частоты единичного усиления:

$$Ku(f_1) = 1 = \frac{K_0}{2\pi f_1 \tau_0} \Rightarrow \tau_0 = \frac{K_0}{2\pi f_1}$$

Проводим измерения для частоты  $f_0$ :

$$Ku(f_0) = \frac{K_0}{2\pi f_0 \tau_0} = \frac{K_0}{2\pi f_0} \cdot \frac{1}{K_0} \cdot \frac{2\pi f_1}{f_0} = \frac{f_1}{f_0}$$

Подставляем в уравнение (1) и получаем финальное выражение для частоты единичного усиления:

$$f_1 = \frac{V_{2amp}}{V_{1amp}} \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_3} \cdot f_0$$

Для использования данной методики необходимо учитывать, что наклон АЧХ должен составлять 20 дБ/дек вплоть до частоты единичного усиления.

Запишем уравнение для  $V_4$ :

**Таблица 2.** Результаты измерений напряжения смещения нуля при наличии шума

$V_{cm}, В$	$V_{off}, мВ$	$V_{os}, мВ$	$V_{in}-V_{os}, В$
0,4	-5	-5	-5,005
0,4	-3	-3	-3,003
0,4	-1	-1	-1,001
0,4	1	999,6 мкВ	1,001
0,4	3	3	3,003
0,4	5	5	5,005
1,5	-5	-5	-5,005
1,5	-3	-3	-3,003
1,5	-1	-1	-1,001
1,5	1	999,8 мкВ	1,001
1,5	3	3	3,003
1,5	5	5	5,005

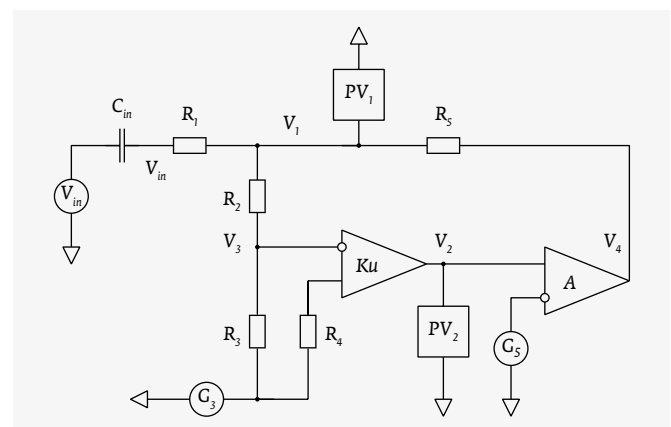
$$V_4 = -\frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot A \cdot Ku \cdot V_1$$

Для того чтобы система не выходила из режима, необходимо подбирать  $R_2 \gg R_3$ . Также увеличение  $R_2$  приведет к увеличению  $V_1$ , что повысит точность измерений.

При переходе от сигналов к амплитудам, необходимо помнить о предположении, что  $V_2$  и  $V_1$  отстают друг от друга на  $180^\circ$ , поэтому при подборе цепи коррекции необходимо убедиться в соблюдении данного условия.

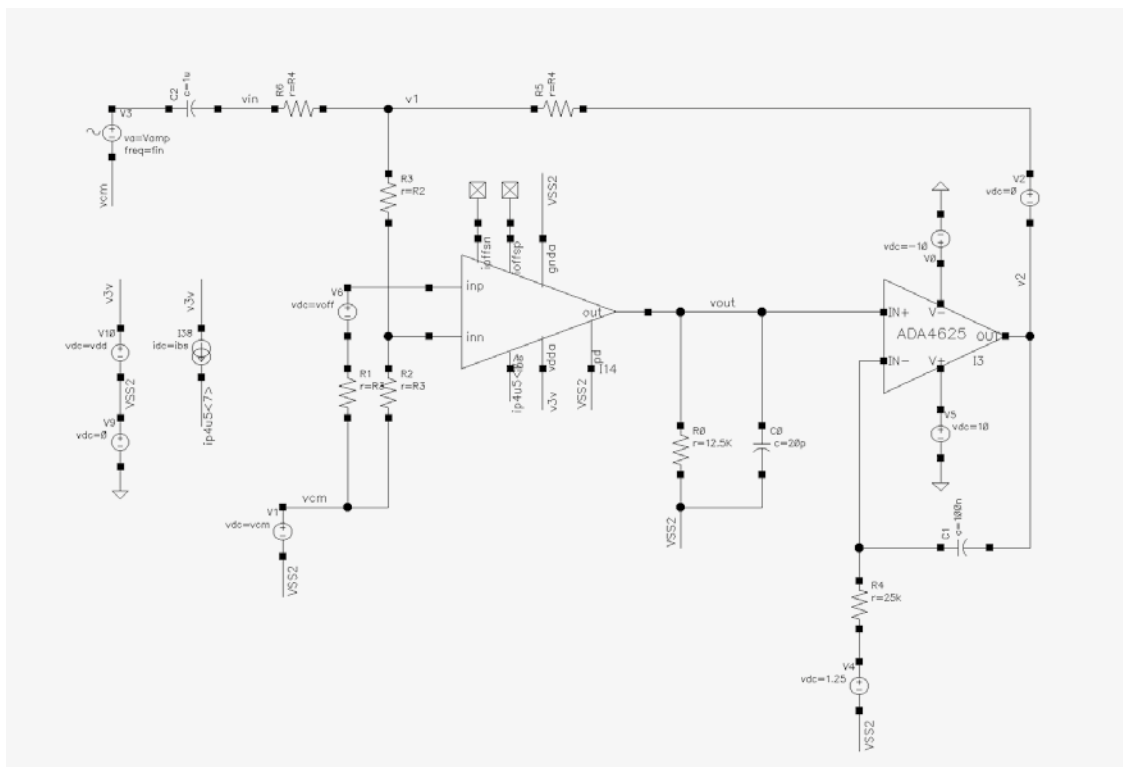
Для моделирования нужно собрать схему измерения с учетом цепи коррекции и однополярного питания исследуемого усилителя (рис. 13).

Проведем АС-анализ для данной системы (рис. 14).



**Рис. 12.** Схема измерения частоты единичного усиления

**Рис. 13.** Схема измерения частоты единичного усиления, собранная в симуляторе



Из графика видно, что для стабильной работы нужно использовать частоту  $f_0$  в диапазоне от 1 до 20 кГц.

По результатам моделирования АЧХ усилителя имеет наклон 20 дБ/дек, поэтому метод справедлив. Для различных параметров получаем значения, представленные в табл. 3.

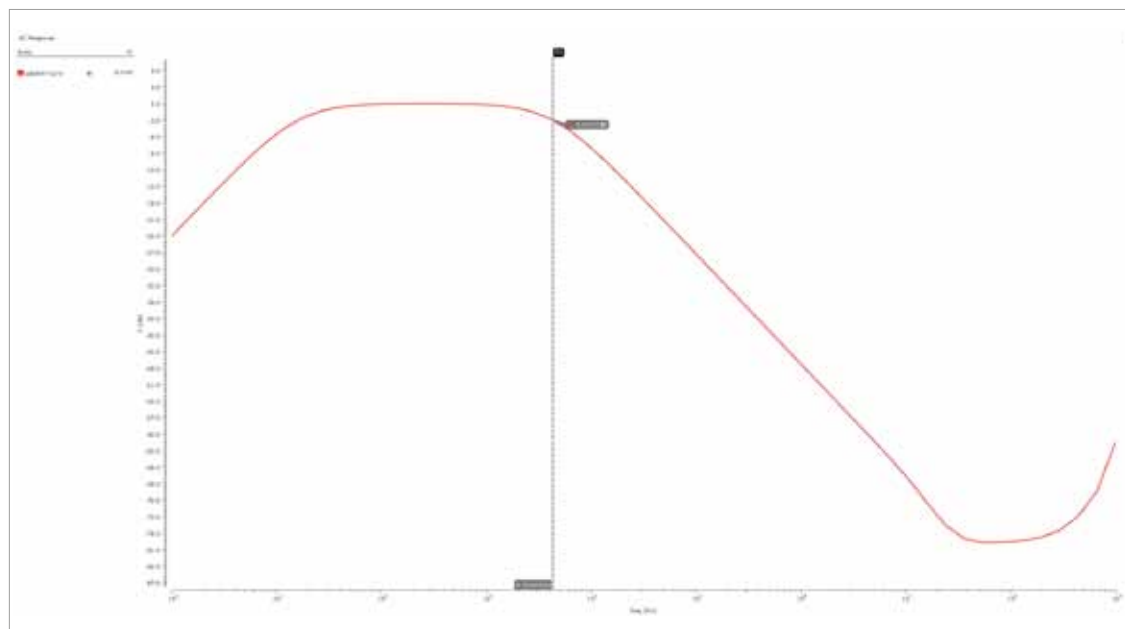
Возможные трудности при измерениях:

- необходимо использовать резисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_5$  с определенными значениями сопротивления

(в рассматриваемом случае  $R_1 = R_5 = 10$  кОм,  $R_2 = 50$  кОм), чтобы увеличить амплитуду сигналов  $V_1$  и  $V_{out}$ , что повышает точность измерений;

- можно увеличить амплитуду входного сигнала для увеличения точности (в рассматриваемом случае до 500 мВ).

При выполнении данных условий влияние шума становится минимальным.



**Рис. 14.** АС-анализ на стабильность обратной связи для схемы измерения частоты единичного усиления



Таблица 3. Значения, полученные в результате моделирования

Параметр	Мин.	Макс.	Среднее	Медиана	Среднеквадратичное отклонение
$V_1$ , мВ	384	434,1	412,7	415,1	16,31
$V_{out}$ , мВ	298,3	536,1	410,9	406,6	79,11
$f_1$ , МГц	6,881	13,98	10,06	9,816	2,333

### Метод 2 для измерения $f_1$

Существует более простой метод для измерения частоты единичного усиления (рис. 15). Для измерения на вход емкости  $C_{in}$  подается синусоидальный сигнал. Частота сигнала изменяется до тех пор, пока амплитуда входного сигнала не станет равной амплитуде выходного.

Резисторы  $R_{out}$  и  $R_{in}$  подбираются исходя из того, чтобы амплитуда на выходе  $U_x$  не превышала напряжение питания.

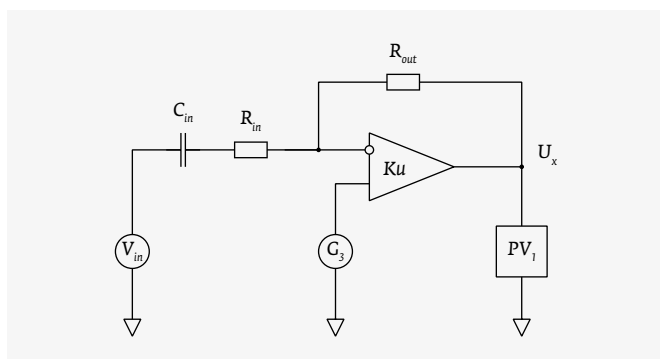


Рис. 15. Схема измерения частоты единичного усиления (метод 2)

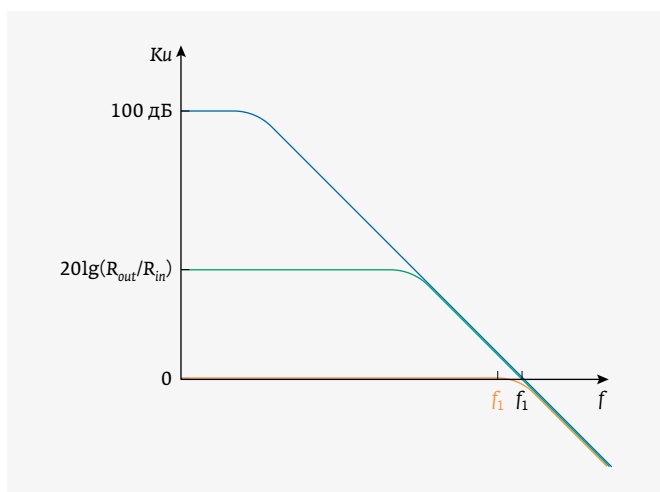


Рис. 16. АЧХ цепи: синий цвет – собственная АЧХ усилителя; зеленый – АЧХ усилителя с обратной связью > 1; красный – АЧХ усилителя с единичной обратной связью

Однако в единичном включении схеме составлять нельзя из-за плавного спада амплитуды, что заведомо будет уменьшать частоту единичного усиления при измерениях (рис. 16).

Поэтому при выборе резисторов необходимо добавлять коэффициент обратной связи. Обычно влияние спада становится слабым при усилении более 20 дБ.

Минусы метода:

1. Большая часть усилителей не рассчитана на работу с сигналом большой амплитуды. На высоких частотах нелинейности будут влиять на амплитуду – следовательно и на результат измерений. К примеру, для данного усилителя на 10 МГц нужно подавать сигнал 10 мВ для отсутствия искажений.
2. При использовании малых сигналов шумы становятся по амплитуде сопоставимы с полезным сигналом.
3. Требуется высокочастотный генератор для усилителей с большой полосой.

### Коэффициент ослабления синфазного напряжения

Уравнение идеального ОУ можно записать так:

$$V_{out} = A_d \cdot (V_2 - V_1).$$

Однако если учитывать неидеальность усилителя, в уравнении появится коэффициент усиления синфазного напряжения  $A_{cm}$ :

$$V_{out} = A_d \cdot (V_2 - V_1) + A_{cm} \frac{V_2 + V_1}{2}.$$

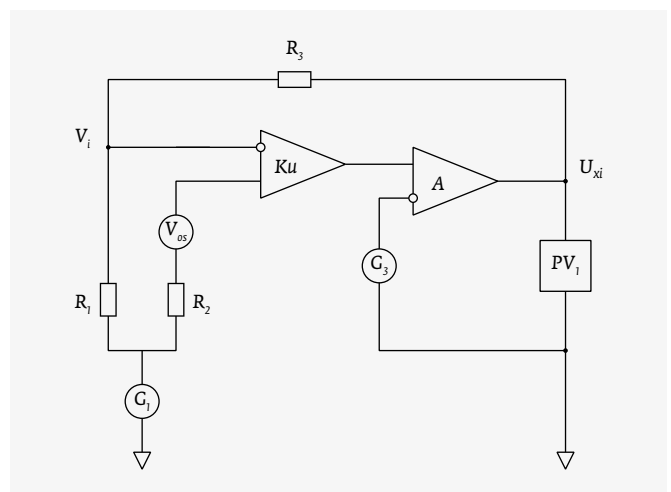


Рис. 17. Схема измерения коэффициента ослабления синфазного напряжения

**Рис. 18.** Схема измерения коэффициента подавления синфазной помехи, собранная в симуляторе

Коэффициент ослабления синфазного напряжения (CMRR) определяется как отношение  $A_d$  к  $A_{cm}$ .

Рассмотрим схему для измерения CMRR (рис. 17).

Для устранения влияния смещения нуля усилителя на систему измерения необходимо проводить в два этапа:

1.  $G_1 = U_1, U_{xi} = U_{x1}, V_i = V_1;$
2.  $G_1 = U_2, U_{xi} = U_{x2}, V_i = V_2.$

Найдем формулу, которая будет определять CMRR. Составим систему уравнений с учетом влияния CMRR на систему:

$$(G_1 + V_{os} - V_i)A_d + \frac{G_1 + V_{os} + V_i}{2}A_{cm} = G_3$$

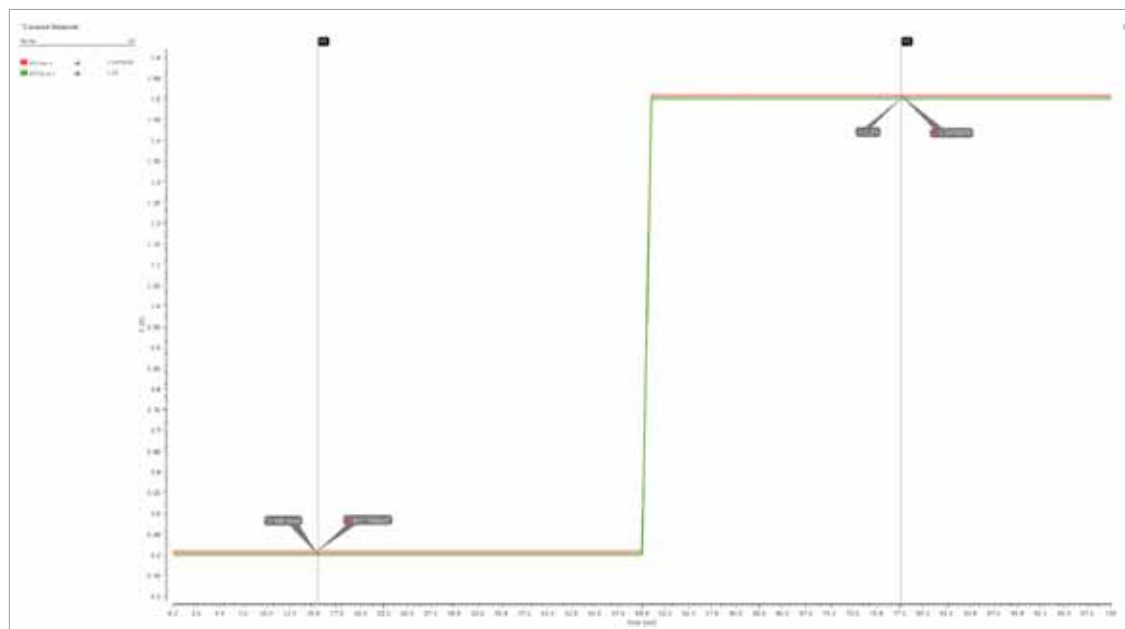
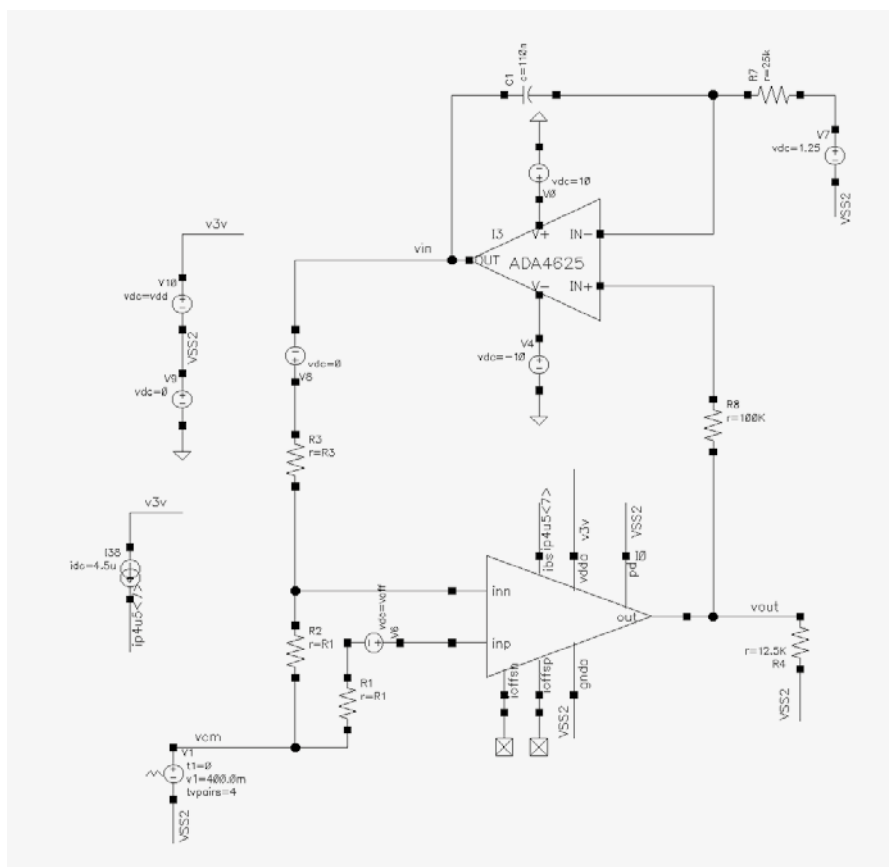
$$\frac{V_i - U_{xi}}{R_3} = \frac{G_1 - V_i}{R_1}$$

Выведем уравнение для  $U_{xi}$ :

$$U_{xi} = \frac{2(R_1 + R_3)}{(A_{cm} - 2A_d)R_1}G_3 - \left(1 + \frac{A_{cm}(R_1 + 2R_3)}{(A_{cm} - 2A_d)R_1}\right)U_i - \frac{(A_{cm} + 2A_d)(R_1 + R_3)}{(A_{cm} - 2A_d)R_1} \quad (2)$$

Для разности  $U_{xi}$  двух этапов измерения справедливо:

$$U_{x1} - U_{x2} = \left(1 + \frac{A_{cm}(R_1 + 2R_3)}{(2A_d - A_{cm})R_1}\right) \cdot (U_1 - U_2),$$



**Рис. 19.** Временной анализ (на графике красным цветом показано напряжение на выходе вспомогательного усилителя, синим – на входе синфазного уровня исследуемого усилителя)

Учитывая тот факт, что  $A_d \gg A_{cm}$  и  $R_3 \gg R_1$ :

$$U_{x1} - U_{x2} = \left( 1 + \frac{R_3 A_{cm}}{R_1 A_d} \right) \cdot (U_1 - U_2).$$

В итоге получаем:

$$CMRR = \frac{R_3}{R_1} \frac{U_1 - U_2}{(U_{x1} - U_{x2}) - (U_1 - U_2)}$$

Нужно отметить следующие моменты:

- из уравнения (2) видно, что на вклад постоянного напряжения выхода вспомогательного усилителя сильно влияет  $V_{os}$  с коэффициентом  $R_3/R_1$ ;
- для использования уравнения для  $CMRR$  необходимо, чтобы выполнялось условие:  $R_3 \gg R_1$ .

Для проведения моделирования создадим схему измерения с учетом цепи коррекции и однополярного питания исследуемого усилителя (рис. 18).

Проведем TRAN-анализ для измерения  $CMRR$ . Рассмотрим сигналы  $V_{cm}$  и  $V_{in}$  (рис. 19).

В аналоговой электронике существует тест методом Монте-Карло, который статистически «разбрасывает» параметры транзисторов, конденсаторов, резисторов. Именно из-за неидеальностей технологий появляется усиление  $A_{cm}$ . Проведем данный анализ и определим максимальное и минимальное значение  $CMRR$  (рис. 20).

Возможные трудности при измерениях:

- необходимо использовать биполярный усилитель для компенсации части  $U_{x1}$ , которую вносит смещение:  $R_3/R_1 \cdot V_{os}$ ;
- шум не сильно будет влиять при выполнении условия: для  $CMRR=66$  дБ значение  $dU_x = U_{x1} - U_{x2}$  больше 1,65 В.

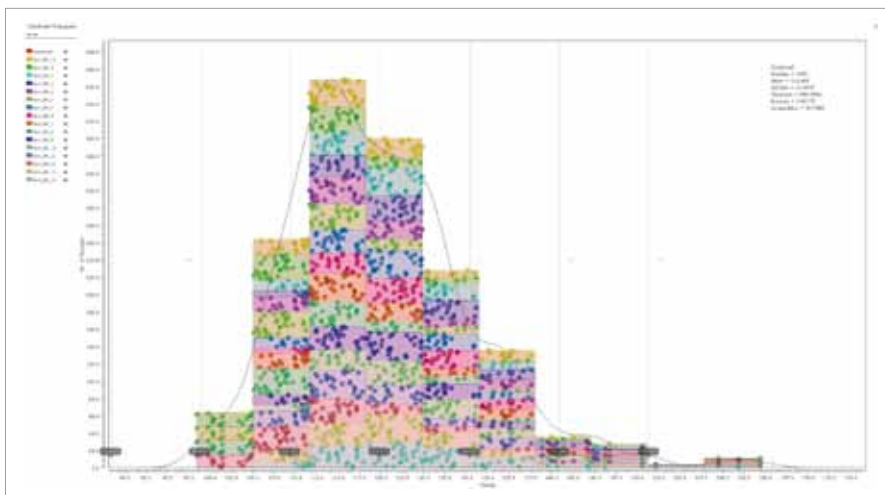


Рис. 20. Результаты по  $CMRR$  (дБ) для исследуемого усилителя

### Входные токи

Схема для измерения входных токов  $I_{in1}$ ,  $I_{in2}$  приведена на рис. 21.

Для измерения входных токов необходимо проводить три этапа измерений:

1.  $R_3, R_4$  – закорочены.  $PV_1 \rightarrow U_{x1}$ . Ключи  $S_2, S_1$  – замкнуты.
2.  $R_3$  – активный,  $R_4$  – закороченный.  $PV_1 \rightarrow U_{x2}$ . Ключ  $S_1$  – разомкнут,  $S_2$  – замкнут.
3.  $R_4$  – активный,  $R_3$  – закороченный.  $PV_1 \rightarrow U_{x3}$ . Ключ  $S_2$  – разомкнут,  $S_1$  – замкнут.

Получим формулы для определения входных токов. Эквивалентная схема при включении на первом этапе представлена на рис. 22. Запишем соответствующую систему уравнений:

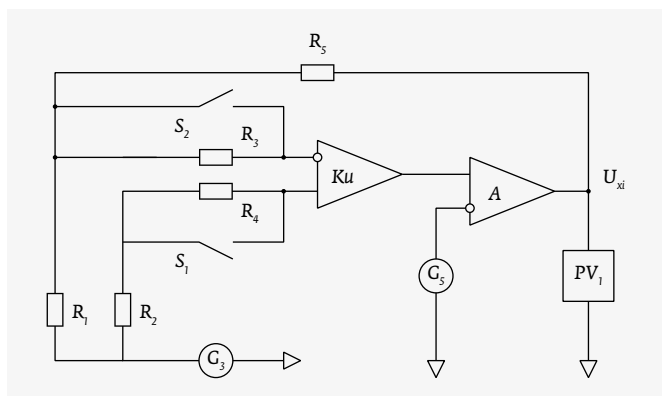


Рис. 21. Схема измерения входных токов ОУ

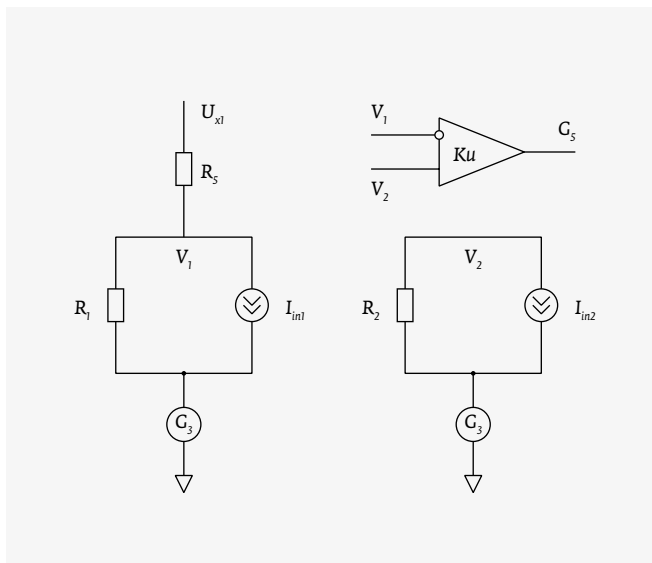


Рис. 22. Упрощенная схема измерения  $I_{in}$  – этап 1

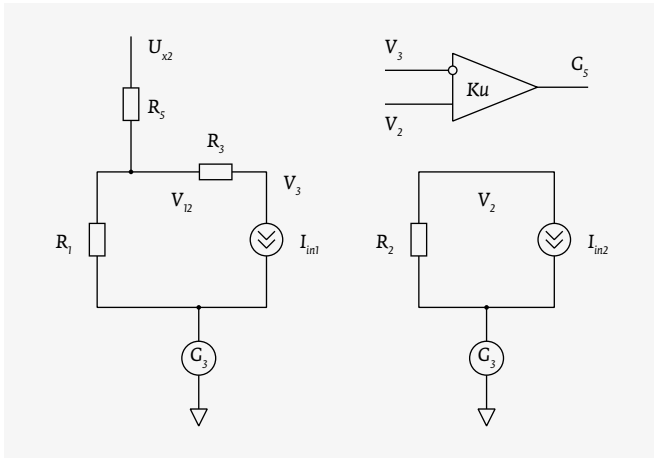


Рис. 23. Упрощенная схема измерения  $I_{in}$  - этап 2

$$\frac{U_{x1} - V_1}{R_5} = \frac{V_1 - G_3}{R_1} + I_{in1}$$

$$I_{in2} \cdot R_2 = G_3 - V_2$$

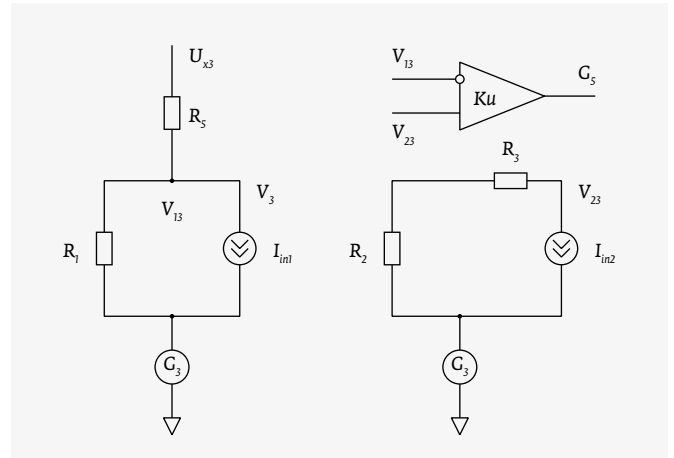


Рис. 24. Упрощенная схема измерения  $I_{in}$  - этап 3

$$(V_2 - V_1) \cdot Ku = G_5.$$

Для эквивалентной схемы включения на втором этапе (рис. 23) уравнения будут иметь вид:

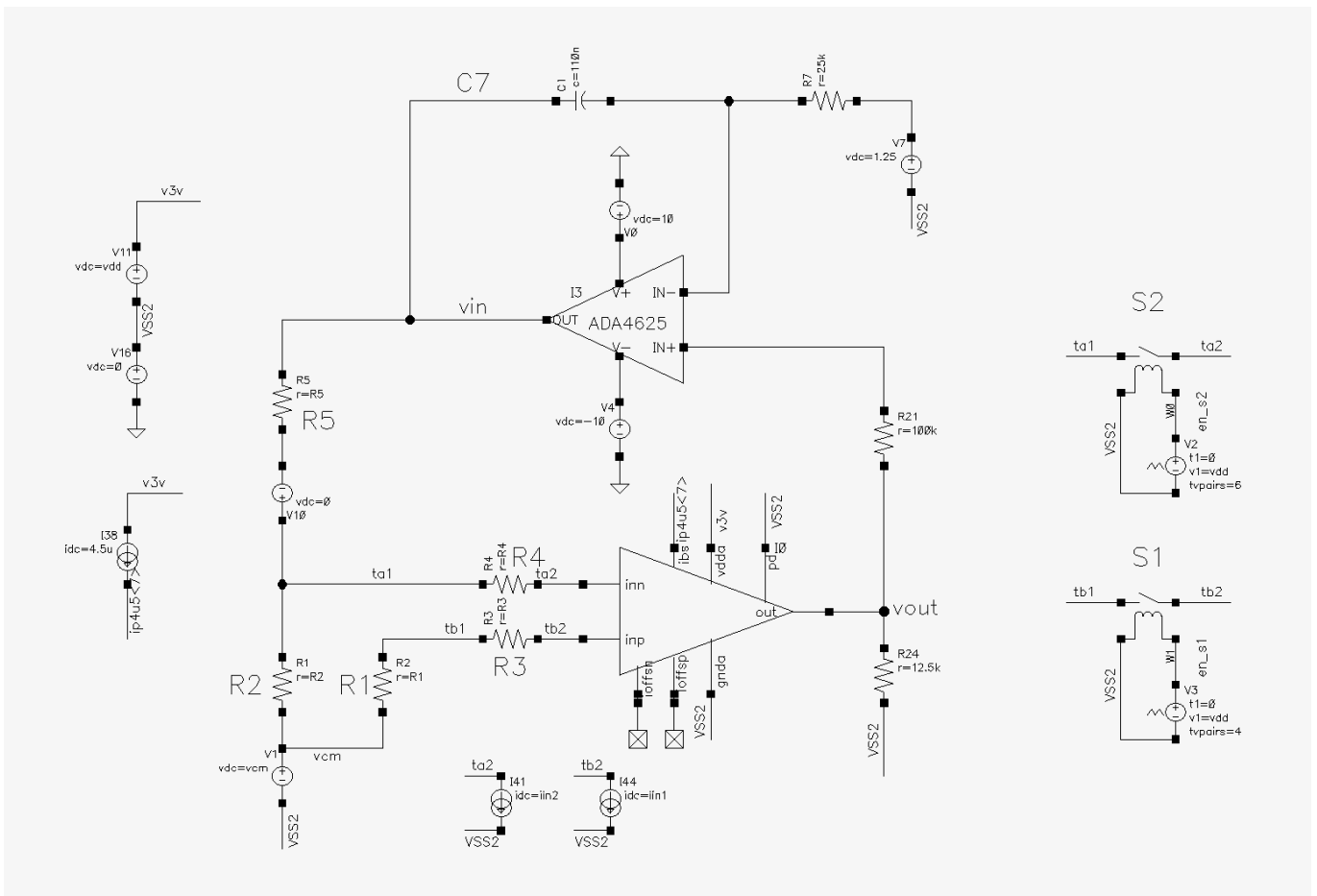


Рис. 25. Схема измерения входных токов ОУ, собранная в симуляторе

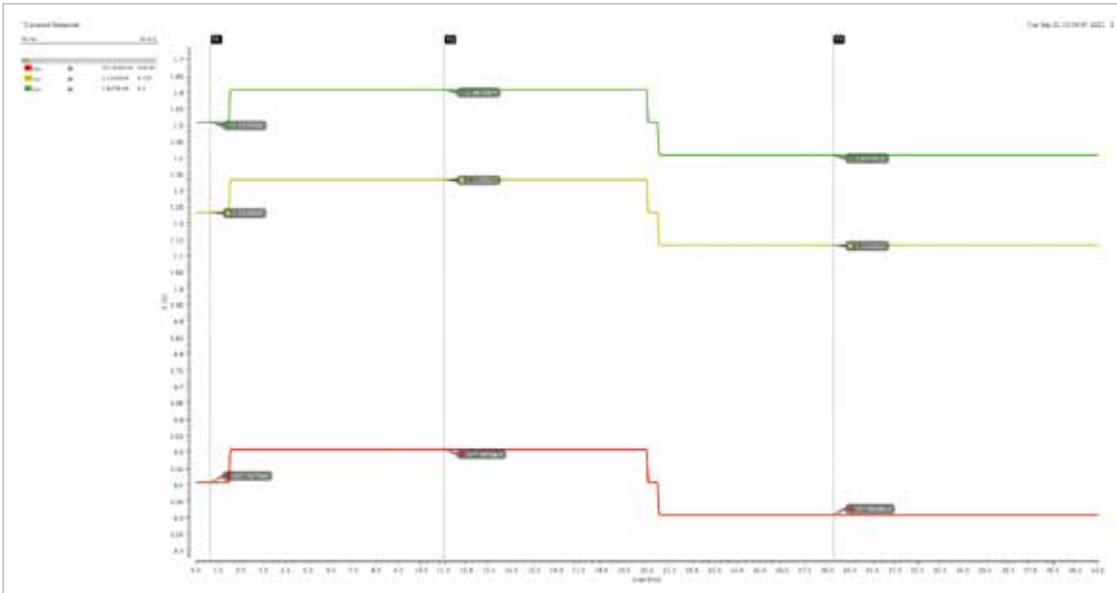


Рис. 26. Временная диаграмма выходов вспомогательного усилителя для различных  $G_3$

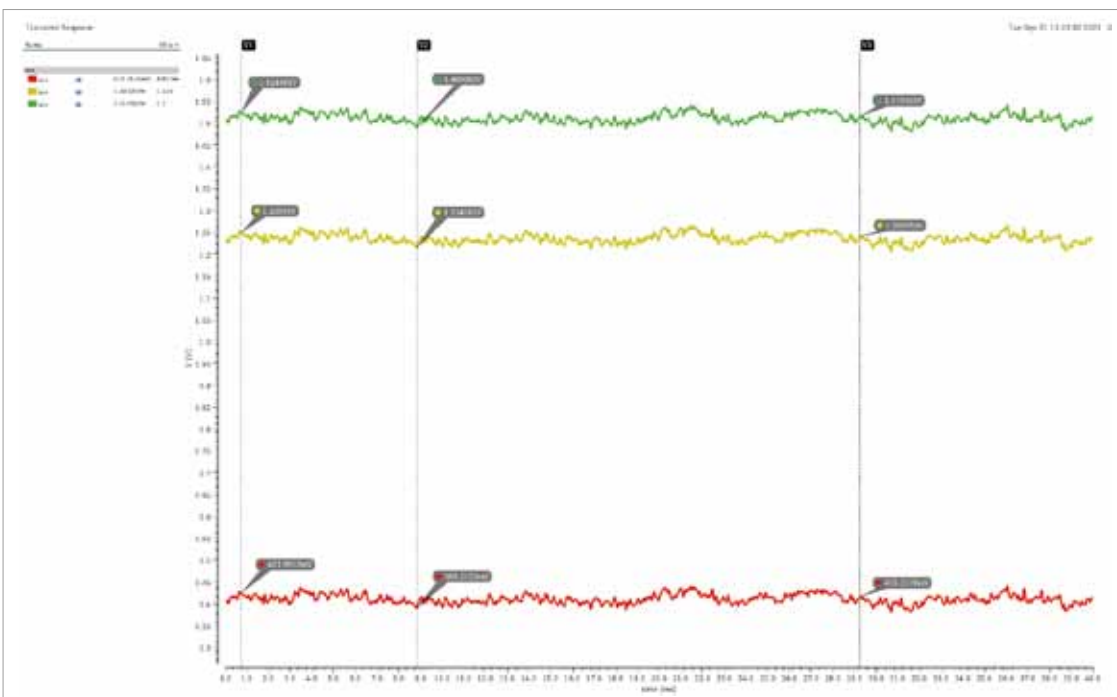


Рис. 27. Временная диаграмма выхода вспомогательного усилителя при входном токе 1 нА с учетом шума

$$\frac{U_{x2} - V_{12}}{R_5} = \frac{V_{12} - G_3}{R_1} + I_{in1}$$

$$\frac{V_{12} - V_3}{R_3} = I_{in1}$$

$$(V_2 - V_3) \cdot Ku = G_5.$$

$$\frac{V_{12} - V_3}{R_3} = I_{in1}$$

$$G_3 - V_{23} = I_{in2} \cdot (R_2 + R_3).$$

Итого получаем девять уравнений. Неизвестные:  $V_1, V_{12}, V_{13}, V_3, V_2, V_{23}, I_{in1}, I_{in2}, Ku$ .

Решая систему уравнений, получаем следующие формулы для входных токов:

Уравнения для схемы включения на третьем этапе (рис. 24) будут следующими:

$$\frac{U_{x3} - V_{13}}{R_5} = \frac{V_{13} - G_3}{R_1} + I_{in1}$$

$$I_{in1} = \frac{R_1}{R_1 + R_5} \cdot (U_{x2} - U_{x1}) \cdot \frac{1}{R_3}$$

# ВТОРИЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ (ВИП) малой и средней мощности

Типономинал модуля	$U_{вх}$ (В)	$U_{вых}$ (В)	$I_{н}$ (А)	$P_{вых}$ (Вт)
<b>ВИП ММ</b>				
ВИП 5-1/1	5	1	1	1
ВИП 5-1/3	5	1	3	3
ВИП 5-1,8/2	5	1,8	2	3,6
ВИП 5-2,5/1	5	2,5	1	2,5
ВИП 12-1,2/1	12	1,2	1	1,2
ВИП 12-1,2/3	12	1,2	3	3,6
ВИП 12-1,8/2	12	1,8	2	3,6
ВИП 12-2,5/2	12	2,5	2	5
<b>ВИП СМ</b>				
ВИП 5-1/12	5	1	12	12
ВИП 12-0,9/12	12	0,9	12	10,8
<b>ВИП ММР с гальванической развязкой</b>				
ВИП 24-3,3/1,3Р	24	3,3	1,3	4,3
ВИП 24-3,3/1Р	24	3,3	1	3,3
<b>ВИП СМР с гальванической развязкой</b>				
ВИП 24-3,3/3Р	24	3,3	3	9,9



Модули ВИП серий ММ, СМ являются импульсными неизолированными источниками вторичного электропитания, ММР и СМР — с гальванически изолированным выходом. Предназначены для организации питания современных и перспективных высокопроизводительных процессоров.

- Защита от включения при пониженном входном напряжении
- Плавный выход на рабочий режим (soft-start)
- Защита от перегрузки по току

## СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДУЛЕЙ ВИП



Космос и авиа-  
приборостроение



Автомобиле-  
строение



Короблестроение

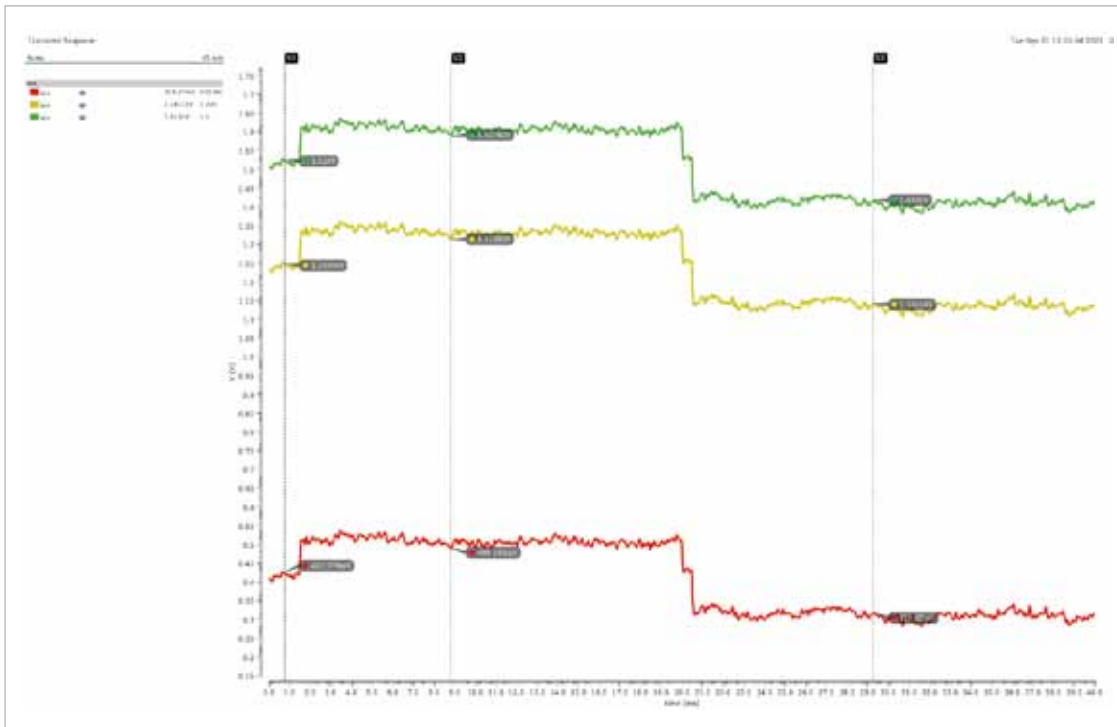
+7 (495) 981-54-33 / [rea@milandr.ru](mailto:rea@milandr.ru) / [WWW.MILANDR.RU](http://WWW.MILANDR.RU)

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА**

+7 (495) 221-13-55 / [forum.milandr.ru](http://forum.milandr.ru) / [support@milandr.ru](mailto:support@milandr.ru)



**МИЛАНДР**  
ГРУППА КОМПАНИЙ



**Рис. 28.** Временная диаграмма выхода вспомогательного усилителя при входном токе 100 нА с учетом шума

$$I_{in2} = -\frac{R_1}{R_1 + R_5} \cdot (U_{x3} - U_{x1}) \cdot \frac{1}{R_4}$$

Примечания к схеме моделирования:

- при выводе формул считается, что входной ток усилителя не зависит от входного напряжения. Этот факт дает небольшую погрешность в измерениях;
- для повышения точности измерений необходимо увеличивать сопротивления резисторов  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ . Также необходимо, чтобы выполнялось соотношение:  $R_1 \ll R_5$ .

Перейдем к моделированию. Соберем схему измерения с учетом цепи коррекции и однополярного питания исследуемого усилителя (рис. 25).

Из-за низкого входного тока, для проверки работоспособности схемы используем входные источники тока, подключенные к выводам  $ta2$  и  $tb2$ . По методологии,

описанной ранее, изменяя положение ключей, рассчитываем входной ток. На рис. 26 изображен выход вспомогательного усилителя для максимальных входных токов 100 нА.

Были проведены тесты для различных  $G_3$  и в итоге получены значения, представленные в табл. 4.

Возможные трудности при измерениях:

- при смещении нуля исследуемого усилителя  $-5$  мВ напряжение на выходе вспомогательного усилителя по DC становится равным  $-4,7$  В. Проблема устраняется при использовании биполярного питания;
- при моделировании с включенным шумом внутренних компонентов усилителя, его уровень становится сопоставимым с разницей напряжений при маленьком входном токе 1 нА (рис. 27).

Точно маленькие токи данным методом не измерить, однако для отбраковки при усреднении необходимо задетектировать токи в 100 нА, что с текущим уровнем шума довольно легко сделать (рис. 28).

В заключение отметим, что рассмотренные в статье схемы измерения не требуют создания стенов с дорогостоящим оборудованием и могут использоваться разработчиками и радиолюбителями в случае необходимости проверить заявленные характеристики усилителя. ●

**Таблица 4.** Значения входных токов

Параметр	Мин.	Макс.	Среднее	Медиана	Среднеквадратичное отклонение
$I_{in1}$ , нА	99,85	99,87	99,86	99,87	9,782 пА
$I_{in2}$ , нА	99,85	99,87	99,86	99,87	9,801 пА

В рамках  
Российской  
промышленной  
недели

# SEMIEXPO RUSSIA

**МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА  
ТЕХНОЛОГИИ | МАТЕРИАЛЫ | ОБОРУДОВАНИЕ  
В ОБЛАСТИ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

**19 – 20 октября 2021**  
ЦВК «Экспоцентр», Москва



## ОТРАСЛЕВЫЕ ОБЗОРЫ

Конкурентный анализ рынка  
и стандарты, маркетинговые  
исследовательские программы



## ИННОВАЦИИ

Новые разработки, международные  
проекты и локальные компетенции



## СОТРУДНИЧЕСТВО

Стратегические инициативы,  
международные институты развития  
и ведущие мировые ассоциации



## БИЗНЕС

Локальные партнеры, новые  
заказчики и поставщики,  
старт-апы и консорциумы



Организатор:  
Business Media Russia

**bmr**

+7 495 649 69 11

Подробная информация  
и бесплатный билет

[www.semiexpo.ru](http://www.semiexpo.ru)



@semiexporussia