

# О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВНОГО УСИЛИТЕЛЯ

## ABOUT CHOOSING COMPOSITE AMPLIFIER PARAMETERS

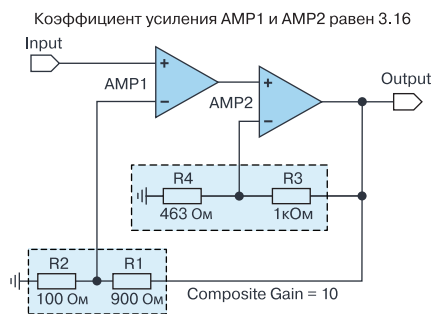
**В** статье приведена краткая информация о зависимости параметров составных усилителей от характеристик ОУ и коэффициентов усиления отдельных каскадов.

*Abstract* – The article provides brief information on the dependence of the parameters of composite amplifiers on the characteristics of the op-amp and the amplification factors of individual cascades.

В. Макаренко

V. Makarenko

В [1] показано, что использование составного усилителя позволяет расширить полосу пропускания такого устройства по сравнению с одиночным усилителем. На рис. 1 (рисунок 5 в [1]) приведена схема составного усилителя с общим коэффициентом усиления 10 и одинаковыми коэффициентами усиления обоих каскадов, равных 3.16.



**Рис. 1. Схема составного усилителя с коэффициентом усиления равным 10**

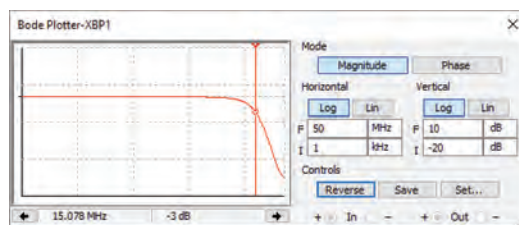
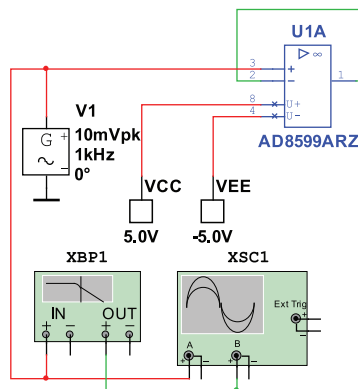
Автор не поясняет почему расширяется полоса пропускания составного усилителя и каким образом следует выбирать соотношение резисторов R3, R4 и как это соотношение влияет на АЧХ составного усилителя. В приведенном на рис. 1 примере соотношение  $R_3/R_4 = 2.16$ , что обеспечивает его коэффициент усиления 3.16.

Объяснение явления расширения полосы пропускания при использовании нескольких усилителей, соединенных последовательно, можно найти в различных источниках, например, в [2]. Для усилителей с внутренней коррекцией справедливо соотношение  $f_1 = \Delta f K_u = \text{Const}$ , где  $f_1$  – частота единичного усиления (BW – Band Width в зарубежных источниках),  $\Delta f$  – полоса пропускания усилителя,  $K_u$  – коэффициент усиления усилителя.

Из этого соотношения следует, что при использовании нескольких усилителей можно либо расширить полосу пропускания при сохранении коэффи-

циента усиления, либо увеличить коэффициент усиления при сохранении полосы пропускания. Это не сложно проверить путем моделирования.

Рассмотрим вариант соединения двух ОУ типа AD8599 с частотой единичного усиления 10 МГц [3]. Первоначально проверим соответствие модели этого ОУ в NI Multisim заявленным в [3] характеристикам. На рис. 2 приведена модель усилителя с коэффициентом усиления равным единице и результаты измерения его АЧХ с помощью Бодеплота XBP1. Как следует из рис. 2, значение частоты  $f_1$  на уровне -3 дБ составляет 15 МГц (10 МГц на уровне -20 дБ).

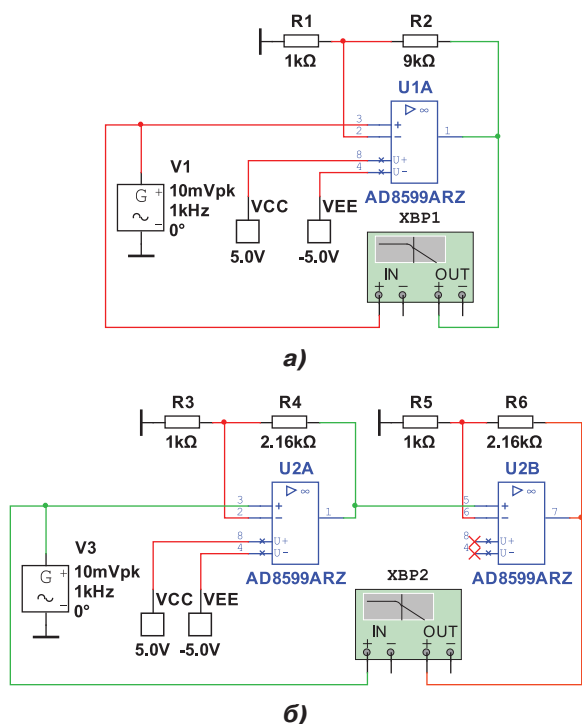


**Рис. 2. Модель для измерения частоты единичного усиления ОУ AD8599**

Рассчитаем ожидаемую полосу пропускания при коэффициенте усиления 10 для одиночного усилителя и для двух усилителей, соединенных последовательно.

Для одиночного усилителя  $\Delta f = f_i/K_u = 15/10 = 1.5$  МГц. При соединении двух усилителей последовательно (рис. 3), коэффициент усиления каждого из них должен составлять  $K_1 = \sqrt{10} = 3.162$ .

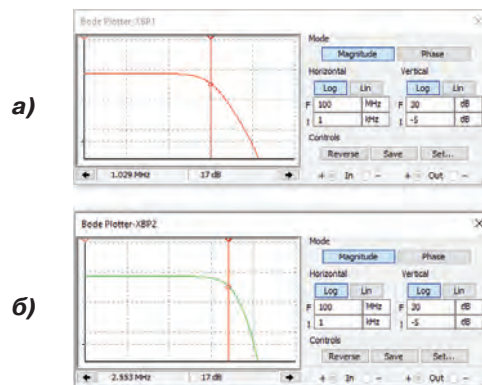
При неинвертирующем включении ОУ коэффициент усиления определяется соотношением  $1 + R_1/R_2$  (для схемы, представленной на рис. 1), откуда  $R_1/R_2 = 2.16$ .



**Рис. 3. Модель для проверки усилителя с коэффициентом усиления 10 на одиночном (а) и на двух соединенных последовательно (б) операционных усилителях**

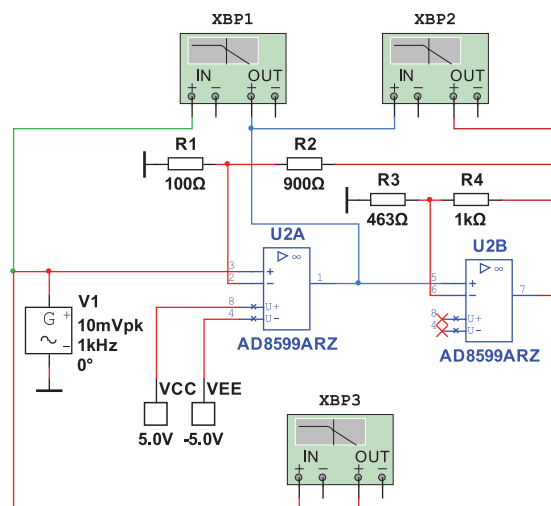
Результаты измерения АЧХ одиночного усилителя с коэффициентом усиления 10 приведены на рис. 4, а, а на двух усилителях – на рис. 4, б.

В случае одиночного усилителя верхняя частота в полосе с неравномерностью 3 дБ составляет 1 МГц, а при использовании двух усилителей – 2.55 МГц. Т.е. полоса расширилась, но не в 3.16 раза, как можно было ожидать из ориентировочного расчета. Это объясняется достаточно просто. АЧХ одиночного усилителя с внутренней коррекцией эквивалентна АЧХ ФНЧ первого порядка, скорость спада частотной характеристики вне полосы пропускания составляет 6 дБ/октава. При соединении последовательно двух усилителей скорость спада АЧХ на границе полосы пропускания возрастает до 12 дБ на октаву, и поэтому полоса пропускания оказывается уже ожидаемой.



**Рис. 4. Результаты измерения АЧХ усилителя с коэффициентом усиления 10 на одиночном (а) и двух соединенных последовательно (б) усилителях на ОУ AD8599**

Проведем моделирование составного усилителя на ИМС AD8599. Схема модели приведена на рис. 5.

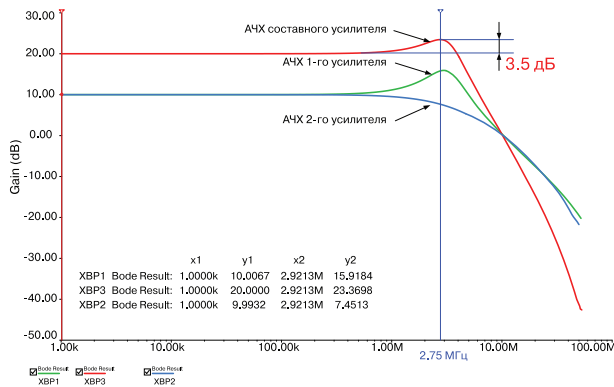


**Рис. 5. Неинвертирующий составной усилитель на ОУ AD8599 с коэффициентом усиления 10**

Для контроля АЧХ и коэффициента усиления каждого из усилителей и составного усилителя используется три Бode-плоттера. Результаты анализа АЧХ составного усилителя приведены на рис. 6.

Коэффициенты усиления каждого из каскадов равны 3.16 (10 дБ) на линейном участке АЧХ, а общий коэффициент усиления равен 10 (20 дБ). Но вот на частоте 2.75 МГц наблюдается выброс величиной 3.5 дБ, чего не было при последовательном соединении двух одиночных усилителей.

Это происходит потому, что два усилителя, связанные общей цепью обратной связи, образуют звено фильтра нижних частот второго порядка, ко-



**Рис. 6. Результаты анализа АЧХ составного усилителя на ОУ AD8599 при коэффициенте усиления равном 10**

торый характеризуется двумя параметрами – частотой и добротностью полюса. Причем параметры звена будут различны на различных выходах – на выходе первого усилителя и на выходе второго.

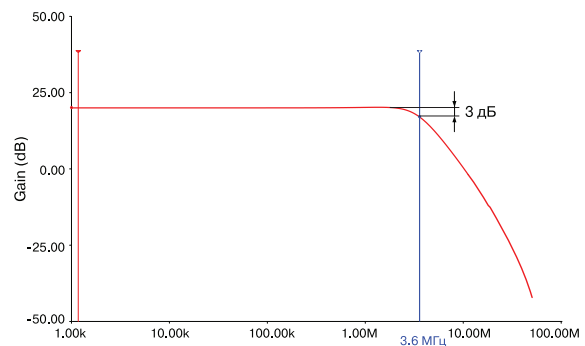
Первый усилитель имеет частоту полюса 2.97 МГц (на частоте полюса сдвиг фазы между входным и выходным сигналом составляет 45°), а его добротность приблизительно равна 1.6. Выброс АЧХ на частоте полюса составляет 5.9 дБ. Второй усилитель имеет частоту полюса 2.64 МГц и добротность приблизительно равную 0.78. На частоте полюса наблюдается спад АЧХ.

Можно ли убрать выброс в АЧХ? Для этого существует только одна возможность без применения корректирующих конденсаторов – изменить соотношение сопротивлений резисторов R3 и R4. Общий коэффициент усиления при этом не изменится, так как он определяется общей обратной связью. Очевидно, что для компенсации выброса нужно уменьшать добротность второго усилителя, т.е. уменьшать его коэффициент усиления. Зададим величину сопротивления R4 равным 500 Ом.

Измеренная при таких параметрах суммарная АЧХ усилителя приведена на рис. 7. Как следует из рисунка, АЧХ не имеет выбросов, а полоса пропускания по уровню -3 дБ составляет 3.6 МГц. В модифицированной схеме произошло перераспределение усиления между каскадами. Коэффициент усиления первого каскада составил 13.6 дБ, а второго – 6.4 дБ.

Если сравнить полученный результат с усилителем, приведенным на рис. 3, легко убедиться, что значительно более эффективно использовать составной усилитель, в котором полоса пропускания оказалась шире на 1 МГц.

Для того, чтобы убедиться в верности такого подхода для коррекции формы АЧХ составного усилителя,



**Рис. 7. АЧХ составного усилителя при уменьшенном в два раза коэффициенте усиления второго каскада**

проведем эксперимент с усилителем, имеющим значительно меньшую частоту единичного усиления.

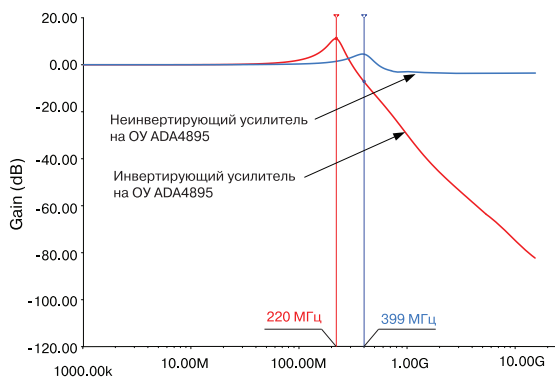
Используем для этих целей операционный усилитель ADA4091, как и в работе [1]. В соответствии с [4] частота единичного усиления этого ОУ составляет 1.2 МГц, что значительно расходится с результатами, приведенными в работе [1]. В составном усилителе с коэффициентом усиления 10 полоса пропускания оказалась равной 438 кГц (в работе [1] указана полоса пропускания 94 кГц), выбросов в АЧХ не наблюдается. Если сделать коэффициенты усиления каскадов вновь одинаковыми, то появляется выброс в АЧХ усилителя, как и в рассмотренном ранее примере.

Работает ли этот подход при использовании широкополосных усилителей с внутренней коррекцией, проверим с использованием ОУ ADA4895. Для корректного проведения эксперимента проверим частоту единичного усиления этого ОУ. В результате эксперимента выяснилось, что при использовании ОУ в инвертирующем и неинвертирующем включении с коэффициентом усиления, равным 1, получим совершенно разные результаты (рис. 8).

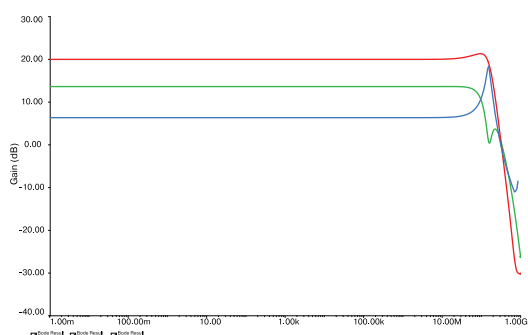
Такое же явление наблюдается и при использовании менее широкополосных усилителей. Например, для ОУ ADA4091 частота единичного усиления равна 675 кГц в инвертирующем включении и 1.88 МГц в неинвертирующем.

Результаты измерения АЧХ составного усилителя с использованием ОУ ADA4895 приведены на рис. 9.

Суммарная АЧХ составного усилителя на ОУ ADA4895 имеет небольшой выброс, а вот АЧХ каждого из усилителей значительно отличаются от АЧХ AD8599. В АЧХ первого усилителя наблюдается провал на частоте 158.5 МГц, а в АЧХ второго подъем на частоте 128.8 МГц, благодаря которому и выравнива-



**Рис. 8. АЧХ инвертирующего и неинвертирующего усилителя с единичным коэффициентом усиления на ОУ ADA4895**



**Рис. 9. Результаты анализа АЧХ составного усилителя на ОУ ADA4895 при коэффициенте усиления, равном 10**

ется суммарная АЧХ. Полоса пропускания составного усилителя на ОУ ADA4895 с неравномерностью 3 дБ составляет 165 МГц. Незначительного уменьшения выброса можно добиться, увеличивая коэффициент усиления второго каскада.

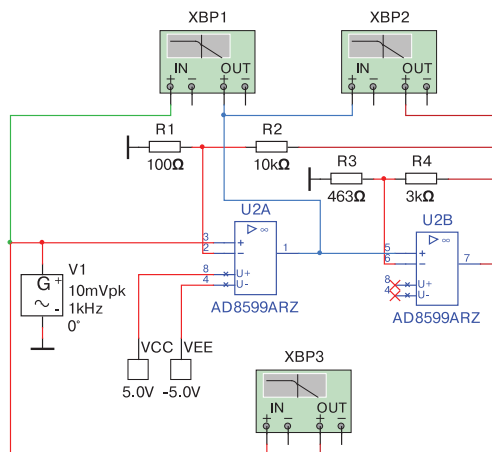
Из проведенных экспериментов можно сделать вывод, что при построении составных усилителей с коэффициентом усиления 10 и использовании ОУ с полосой пропускания до 50 МГц целесообразно устанавливать коэффициент усиления второго каскада равным 6.4 дБ, а для более высокочастотных усилителей необходима небольшая коррекция этого коэффициента усиления в сторону его увеличения.

А как нужно выбирать соотношении между коэффициентами усиления при большем значении коэффициента усиления составного усилителя? Проверим это на примере ОУ AD8599. Используем модель, приведенную на рис. 5, увеличив сопротивление резисторов обратной связи (R2 и R4) в 10 раз для получения суммарного коэффициента усиления равного 100 (40 дБ).

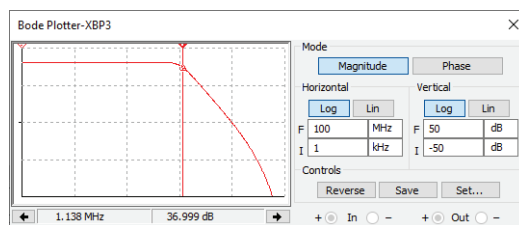
Для реализации коэффициента усиления 40 дБ и получения плоской АЧХ пришлось скорректировать

значение сопротивлений резисторов R2 и R4. Схема составного усилителя с коэффициентом усиления 100 приведена на рис. 10, а его АЧХ – на рис. 11.

Как следует из рис. 11, полоса пропускания составного усилителя на ОУ AD8599 при коэффициенте



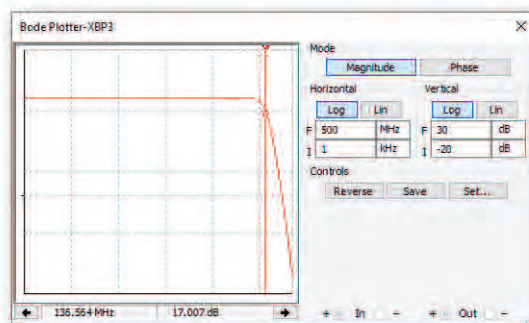
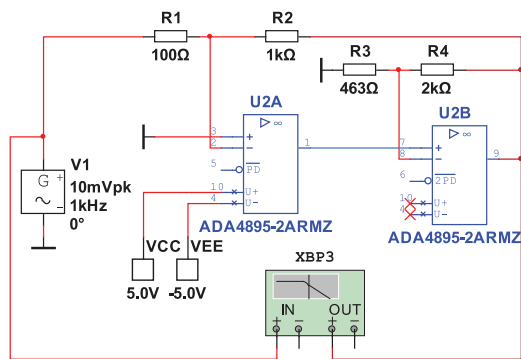
**Рис. 10. Неинвертирующий составной усилитель на ОУ AD8599 с коэффициентом усиления 100**



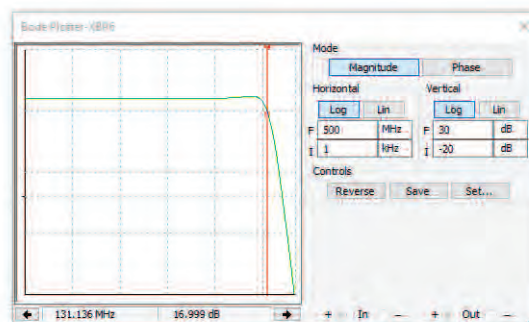
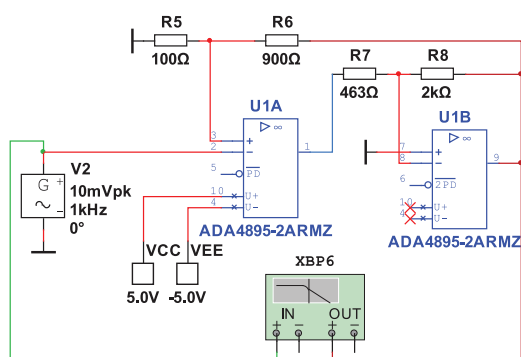
**Рис. 11. Результаты анализа АЧХ составного усилителя на ОУ AD8599 при коэффициенте усиления равном 100**

те усиления, равном 100, составляет 1.14 МГц, а если включить два каскада усиления последовательно, то полоса пропускания составит всего 665 кГц. Очевидно, что составной усилитель обладает значительно лучшими характеристиками и при больших коэффициентах усиления. При увеличении числа ОУ в составном усилителе до трех выигрыш становится совсем незначительным по сравнению со схемой с двумя ОУ и применение такого усилителя нецелесообразно.

А какие параметры обеспечивает составной инвертирующий усилитель по сравнению с неинвертирующим? Для ответа на этот вопрос проведено измерение АЧХ двух вариантов построения инвертирующего усилителя, выполненного на ОУ ADA4895. В первом варианте (рис. 12,а) второй усилитель включен как неинвертирующий, а во втором варианте (рис. 12,б) второй усилитель включен по инвертирующей схеме.



a)



b)

Рис. 12. Инвертирующий составной усилитель на ОУ ADA4895 с коэффициентом усиления 10

Сравнивая АЧХ этих составных усилителей, можно сделать вывод, что предпочтительнее вариант использования усилителя, собранного по схеме, рис. 12,а. В этом варианте схемы выброс АЧХ не превышает 0.5 дБ, а ширина полосы пропускания с неравномерностью 3 дБ составляет 136 МГц. Усилитель, собранный по схеме рис. 12,б, обеспечивает ширину полосы пропускания 131 МГц.

Напомним, что неинвертирующий составной усилитель на ОУ ADA4895 обеспечивает ширину полосы пропускания 165 МГц, что на 21% больше, чем у инвертирующего усилителя.

Из проведенных экспериментов следует вывод, что инвертирующий усилитель имеет более узкую полосу пропускания по сравнению с неинвертирующим

при одинаковых коэффициентах усиления, что необходимо учитывать при выборе схемы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Логвинарио Составной усилитель обеспечивает высокую точность и поддерживает функции мощного драйвера / Электронные компоненты и системы, №3, 2019. с. 28-32.
2. Соколов Л. Аналоговые интегральные схемы: Пер. с англ. – М. Мир, 1988. – 583 с.
3. [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8597\\_8599.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8597_8599.pdf).
4. [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4091-2\\_4091-4.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4091-2_4091-4.pdf).

**VD MAIS**  
Измерительные приборы

- Осциллографы • Генераторы
- Логические анализаторы
- Анализаторы спектра
- Измерители параметров видеосигналов
- Источники питания • Частотомеры
- Мультиметры • Тепловизоры
- Виброметры

Дистрибуция и прямые поставки:  
Tektronix, Fluke, Keithley, Rohde@Schwarz, Hameg, Uni-Trend

Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6  
тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110  
e-mail: info@vdmajs.ua, www.vdmajs.ua

**VD MAIS**  
Электромеханические компоненты и компоненты систем автоматизации

- Низковольтная коммутационная аппаратура
- Программируемые промышленные контроллеры и компьютеры, ПО
- Шкафы • Крейты • Соединители • Корпуса
- Вентиляторы • Инструмент • Кабельная продукция • СКС • Системы маркировки

Дистрибуция и прямые поставки:  
Acme-Portable, AMP Netconnect, Belden, Vopla, Eaton, EBM-Papst, HARTING, Hoffman, Kroy, Lapp Group, Molex, Phoenix Contact, Rittal, Schroff, Siemens, TE Connectivity, TKD, Wago

Украина, 03061 Киев, ул. М. Донца, 6  
тел.: (0-44) 201-0202, 492-8852, факс: (0-44) 202-1110  
e-mail: info@vdmajs.ua, www.vdmajs.ua