

# Методы по увеличению подавления синфазного напряжения

Андрей ВИКТОРОВ

В статье кратко рассматриваются некоторые способы, позволяющие увеличить подавление синфазного напряжения в операционных усилителях, а также кратко упоминаются особенности граничного графика, на которые стоит обратить внимание при выборе инструментального операционного усилителя.

## Введение

При выборе компонентов для построения аналогового тракта разработчики нередко не уделяют должного внимания двум параметрам: синфазному напряжению и пульсациям на шинах питания. В некоторых случаях, когда разрядность АЦП тракта не превышает 12 бит, такой подход вполне приемлем. Однако если разрядность АЦП составляет не менее 18 бит, обоими этими параметрами едва ли стоит пренебрегать.

Влияние синфазного напряжения определяется коэффициентом ослабления синфазного напряжения (КОСС), или CMRR в англоязычной транскрипции. Величина КОСС определяется следующим соотношением (1):

$$\text{КОСС} = 20 \lg \left( \frac{A_D}{A_{CM}} \right) \quad (1)$$

где:  $A_D$  – коэффициент усиления дифференциального сигнала;  $A_{CM}$  – коэффициент усиления синфазного сигнала.

Ошибка, вызванная синфазным напряжением, вычисляется по приведенной ниже формуле (2):

$$V_{\text{OUT}} = A_{\text{CL}} \cdot \left[ V_{\text{IN}} + \left( \frac{V_{\text{IN}}}{\text{КОСС}} \right) \right] \quad (2)$$

К сожалению, величина КОСС заметно уменьшается по мере возрастания частоты синфазного сигнала. Действие синфазного напряжения в наибольшей мере влияет на работу инструментальных и дифференциальных усилителей. Ниже мы рассмотрим оба эти случая.

Влияние пульсаций напряжения на шинах питания оценивается формулой (3):

$$\text{КОНИП} = \frac{\Delta V_{\text{CC}}}{\Delta V_{\text{OS}}} \quad (3)$$

где:  $\Delta V_{\text{CC}}$  – амплитуда пульсации напряжения на шине питания;  $\Delta V_{\text{OS}}$  – изменение напряжения смещения на входе.

Мы ограничимся рассмотрением синфазного напряжения, а способы увеличения КОНИП представим в следующей статье нашего небольшого цикла публикаций.

## Примеры методов увеличения КОСС

Одним из наиболее эффективных способов увеличить КОСС является бутстреппинг (bootstrapping) питания, когда напряжение питания плавают и следует за изменением синфазного напряжения. Применение метода схематично показано на рис. 1. Увы, такой метод снижает устойчивость ОУ и может привести к ухудшению его параметров.

В [1] предложен способ, позволяющий отчасти преодолеть эти ограничения. Используя ОУ общего назначения, авторам [1] удалось построить дифференциальный ОУ с КОСС = 130 дБ на низких частотах и КОСС = 90 дБ на частоте 1 кГц. На рис. 2 показана практическая реализация метода бутстреппинга питания с использованием серийно производимых ОУ. Микросхемы LM358 FD усилителя питались напряжением  $\pm 5$  В, которое формировалось стабилитронами LM385. Это напряжение буферизовалось двумя ОУ LF353. Режим бутстреппинга включался и выключался с помощью переключателя SW. Экспериментально полученная зависимость величины КОСС от частоты схемы на рис. 2 показана на рис. 3.

Предложенный метод бутстреппинга очень хорошо работает на низких частотах, в данном случае до нескольких килогерц. При дальнейшем увеличении частоты могут возникнуть проблемы с устойчивостью из-за положительной связи по питанию. Особенно велика вероятность возникновения этих проблем при приближении частоты синфазного сигнала к частоте среза используемых ОУ. Для

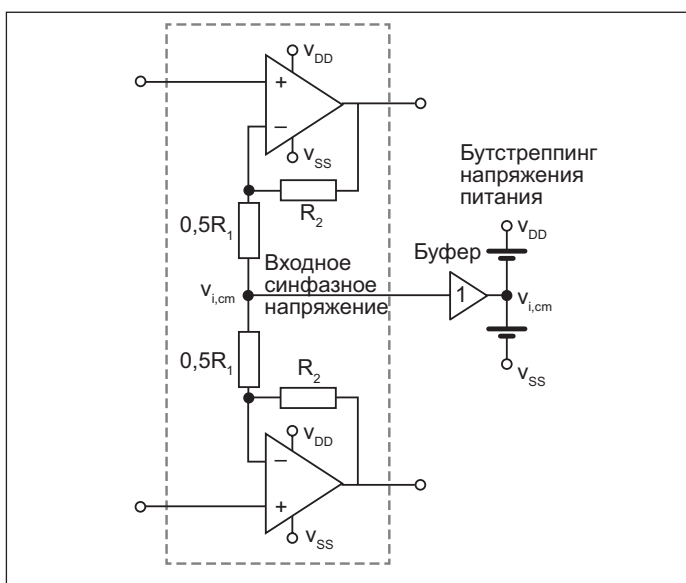


Рис. 1. Метод бутстреппинга напряжения питания

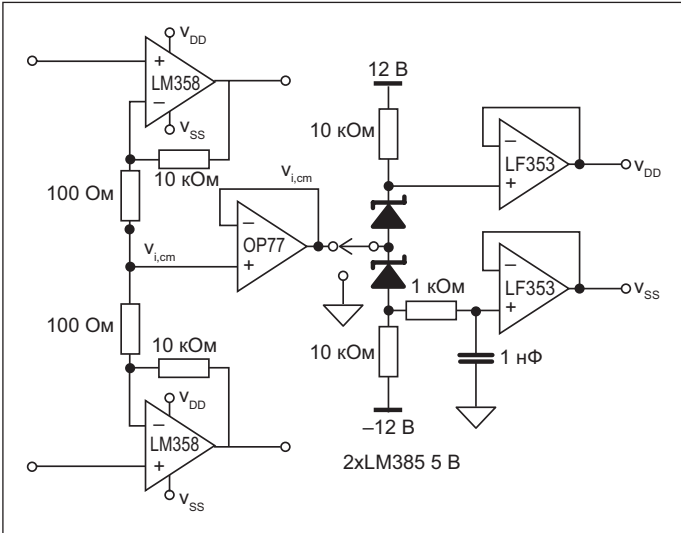


Рис. 2. Практическая реализация метода бутстреппинга питания с использованием серийно выпускаемых ОУ

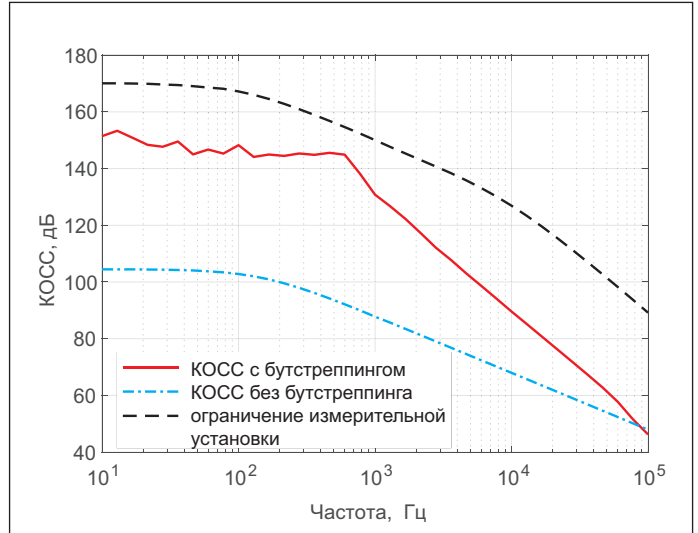


Рис. 3. Экспериментально полученная зависимость величины КОСС от частоты схемы на рис. 2

Таблица. Размеры транзисторов в схеме на рис. 5

Транзистор	W/L, мкм
M1, M2, M3, M4	5/0,18
M5, M6, M7, M8, M12, M13, M14, M15, M20	3/0,18
M9, M10, M11, M16, M17, M18, M19	10/0,18
M1a, M1b, M1c, M1d	2/0,18
M2a, M2b, M2c, M2d	40/0,18
M3a, M3b, M3c, M3d, M4a, M4b, M4c, M4d	0,27/0,3
M5a, M5b, M5c, M5d	0,4/0,18

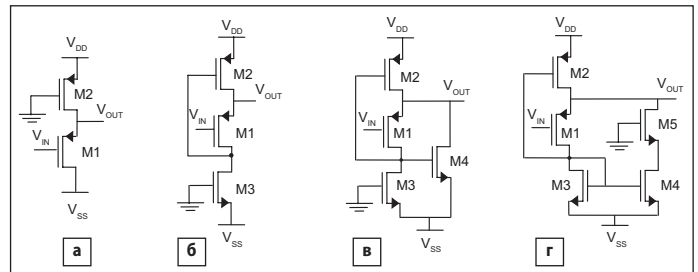


Рис. 4. а) стандартный истоковый повторитель; б) перевернутый повторитель напряжения; в) сложный перевернутый повторитель напряжения; г) модифицированный сложный перевернутый повторитель напряжения

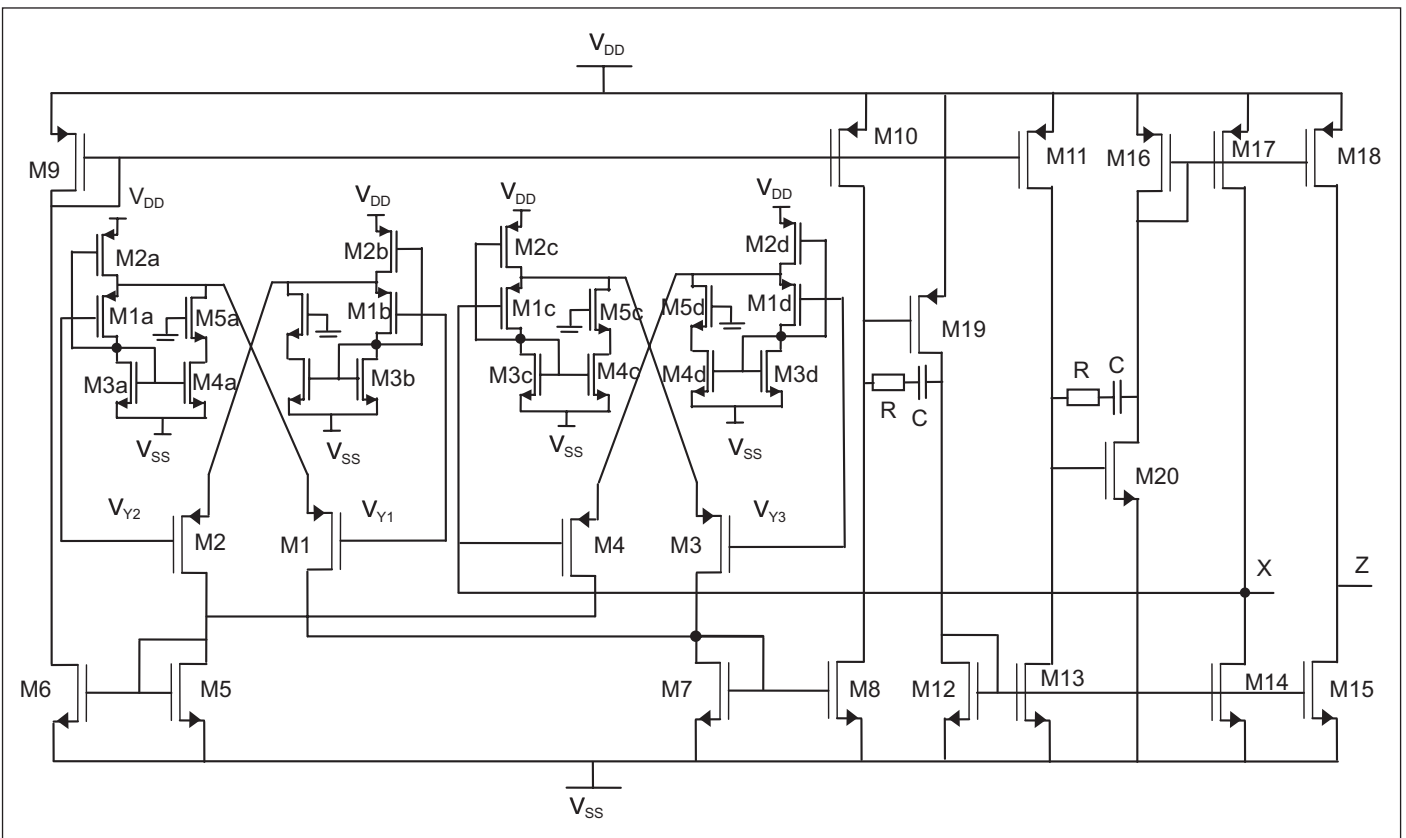


Рис. 5. Предложенный в [2] токовый конвейер DDCC

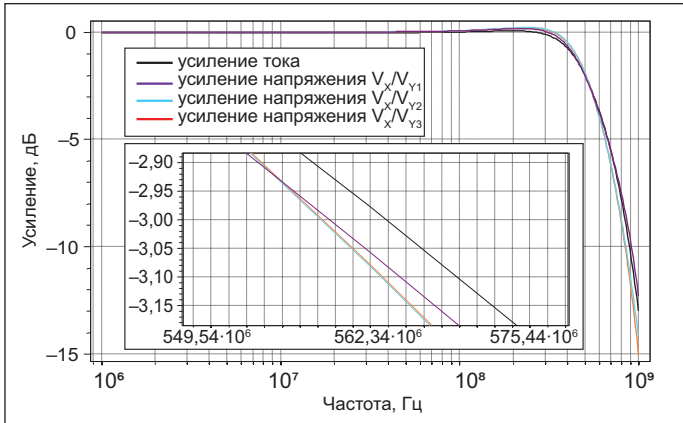


Рис. 6. Частотные характеристики токового конвейера

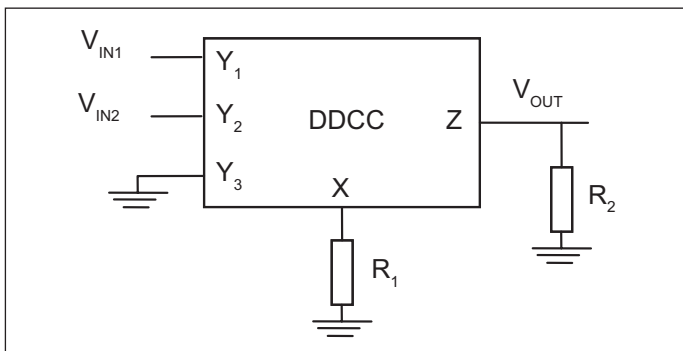


Рис. 7. Схема операционного инструментального усилителя на основе токового конвейера

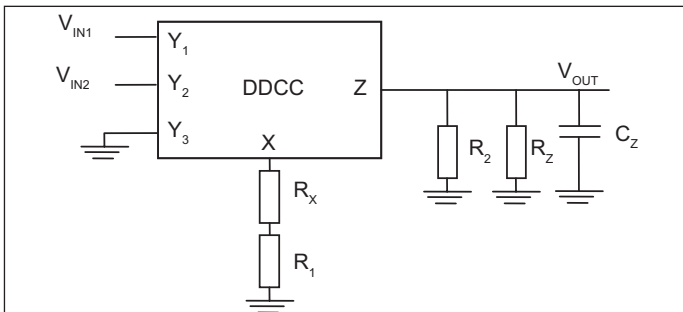


Рис. 8. Схема операционного инструментального усилителя на основе токового конвейера учетом паразитных импедансов

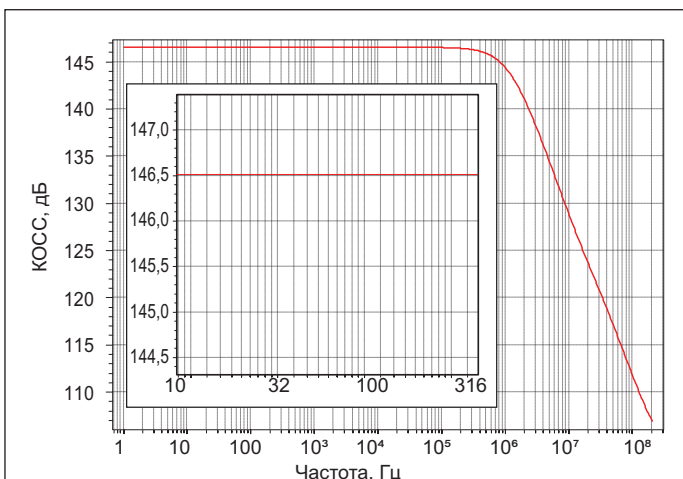


Рис. 9. Частотная зависимость КОСС операционного инструментального усилителя на основе токового конвейера

увеличения КОСС с помощью метода бутстреппинга на более высоких частотах следует выбирать ОУ с более широкой полосой пропускания.

В [2] удалось получить высокий КОСС в инструментальном ОУ с полосой пропускания 560 МГц благодаря использованию модифицированной ячейки перевернутого повторителя напряжения (flipped voltage follower cell, FVF) в качестве схемы адаптивного смещения и дифференциально-разностного токового конвейера (differential difference current conveyor, DDCC). На рис. 4 приведены варианты ячейки перевернутого повторителя напряжения (folded flipped voltage follower, FFVF).

В перевернутом повторителе FVF (рис. 4б) ток через транзистор M1 остается постоянным, и не зависит от выходного тока благодаря использованию транзистора M3 в качестве источника тока смещения. В отличие от классического повторителя напряжения, эта схема способна формировать большой выходной ток, но ее ток ограничен током транзистора M1.

Сложенный/свернутый (Folded) перевернутый повторитель FFVF (рис. 4в) за счет введения дополнительного транзистора M4 способен формировать больший выходной ток, чем повторитель FVF. У него более широкий динамический диапазон даже при очень низком напряжении питания менее 1 В. Кроме того, он лучше подавляет пульсации напряжения на шине питания. В модифицированный повторитель FFVF введен дополнительный транзистор M5, благодаря которому заметно снижается выходной импеданс.

Схема предложенного токового конвейера DDCC показана на рис. 5. Он состоит из двух дифференциальных каскадов PMOS M1, M2 и M3, M4, смещенных с помощью перевернутых повторителей FFVF, показанных на рис. 4г, трех токовых зеркал (M5, M6), (M7, M8), (M9, M10) и выходного каскада на транзисторах M11 и M20 с токовыми зеркалами. Для стабилизации полосы пропускания использовались две пары RC-цепей.

Предложенная схема моделировалась при напряжении питания  $\pm 0,8$  В на TSPICE с учетом использования технологии 0,18 мкм. Размеры транзисторов приведены в таблице. Частотные характеристики, полученные в результате моделирования токового конвейера DDCC, представлены на рис. 6.

Схема операционного инструментального усилителя на основе токового конвейера, показана на рис. 7. К конвейеру DDCC добавляются два заземленных резистора. Схема этого же инструментального уси-

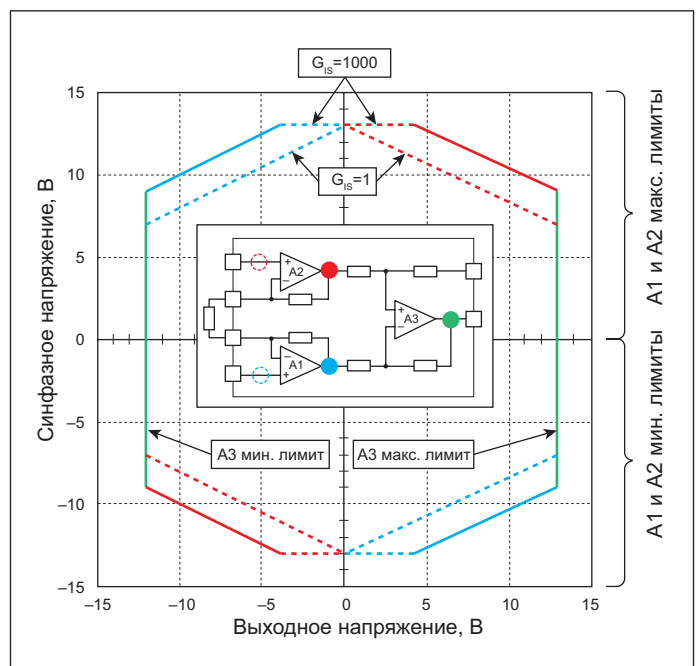


Рис. 10. Типовой граничный график синфазного напряжения для классического инструментального усилителя

лителя, но с учетом паразитных импедансов представлена на рис. 8. Зависимость КОСС от частоты приведена на рис. 9.

Моделирование показало, что у предложенного токового конвейера – значительный динамический диапазон по напряжению и току  $\pm 0,62$  В и  $\pm 0,35$  мА, соответственно, его частота среза составляет 560 МГц, а потребляемая мощность не превышает 472 мВт. КОСС на частотах до 1 МГц достигает 146 дБ, что является отличным результатом.

В заключение обратим внимание читателей на интерпретацию граничного графика для инструментальных усилителей, который приводит производитель. Пренебрежение им или неверная интерпретация могут привести к нелинейности выходного сигнала или к насыщению. Типовой граничный график для классического инструментального усилителя из трех операционных усилителей представлен на рис. 10.

Пунктирные линии синего и красного цвета представляют собой ограничения входного синфазного напряжения для А1 и А2, соответственно. Сплошные линии представляют ограничения размаха выхода для А1 (синий цвет), А2 (красный цвет) и А3 (зеленый цвет). Заметим, что наклон линий и, следовательно, область разрешенной работы зависит от коэффициента усиления. При расчете схемы выходной сигнал не должен всегда находиться внутри очерченной области! ■

### Литература

1. Enhancing CMRR in Fully Differential Amplifiers via Power Supply Bootstrapping // <https://www.mdpi.com>.
2. High CMRR Voltage Mode Instrumentation Amplifier Using a New CMOS Differential Difference Current Conveyor Realization // <https://www.researchgate.net>.