

УДК 615.471

В.В. Семенец, Д.А. Федотов, О.Я. Крук

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

ПРИНЦИП УПРАВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ АКТИВНЫХ СХЕМ ДЛЯ УБП ПРИ МУЛЬТИПЛИКАТИВНОМ ПОДАВЛЕНИИ СИНФАЗНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ И ИНВАРИАНТНОМ ВКЛЮЧЕНИИ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Рассмотрен подход к проектированию инвариантных схем усиления с мультипликативным подавлением синфазной составляющей на операционных усилителях. Предложен принцип управления коэффициентом усиления активных схем для усилителей биопотенциалов. Разработан ряд инвариантных схем усиления, имеющих существенные преимущества перед классическими схемами.

коэффициент усиления, операционный усилитель, погрешность преобразования, инвертирующий усилитель, обратная связь

Введение

Задание коэффициента усиления активной схемы является одним из основных условий качественного функционирования электронного узла преобразования. Установка коэффициента усиления приобретает особую актуальность при использовании операционных усилителей, собственный коэффициент усиления которых стремится к бесконечности. Применяемые цепи обратной связи и прямой передачи ограничивают этот коэффициент до заданного значения. Данная проблема приобретает принципиальное значение при построении УБП.

1. Расчет и описание погрешностей преобразования классических схем

Используемые на практике усилительные преобразователи в своем составе содержат инвертирующие либо не инвертирующие усилители, схемы включения которых представлены на рис. 1.

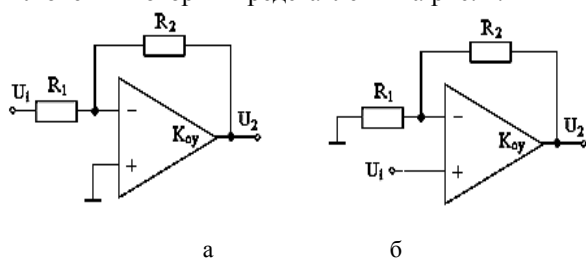


Рис. 1. Основные схемы включения операционных усилителей

Однако, для прецизионных измерений требуется учитывать погрешность преобразования. В классических схемах она принимает существенные значения. Так, для достижения коэффициента усиления

$K = -\frac{R_2}{R_1}$ или $K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ погрешность Δ составляет $\Delta = \frac{R_1 + R_2}{K_{Oy}}$, при этом R_1 определяет входное сопротивление схемы, а K_{Oy} – собственный коэффи-

циент усиления операционного усилителя. Стремление увеличить входное сопротивление вызывает необходимость использования сопротивления цепи обратной связи R_2 в K – раз больше, что приводит к росту погрешности в $K+1$ раз.

Для подтверждения этого рассмотрим схемы инвертирующего и не инвертирующего усилителей.

Для схемы рис.1, а инвертирующего усилителя связь входного напряжения U_1 и выходного U_2 можно установить:

$$U_2 = U_{\text{вих}} = -K_{Oy} \cdot U_{\text{диф}} = -K_{Oy} \cdot \times \times (U_1 - \frac{U_1 - U_2}{R_1 + R_2}) = -\frac{K_{Oy} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot \times \times U_1 - \frac{K_{Oy} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_2;$$

$$U_2(1 + \frac{K_{Oy} \cdot R_1}{R_1 + R_2}) = -\frac{K_{Oy} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_1; \quad U_2 = K \cdot U_1; \quad (2)$$

$$K = -\frac{R_2 \cdot K_{Oy}}{R_1 + R_2 + K_{Oy} \cdot R_1} = -\frac{R_2}{\Delta + R_1}.$$

Аналогично для рис.1, б схемы не инвертирующего усилителя входного напряжения U_1 , выходное напряжение U_2 можно записать:

$$U_2 = K_{oy}(U_1 - \frac{U_2}{R_1 + R_2} \cdot R_1) = +K_{oy}U_1 - \frac{K_{oy}R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_2; \quad (3)$$

$$U_2(1 + \frac{K_{oy}R_1}{R_1 + R_2}) = +K_{oy}U_1;$$

$$K = \frac{K_{oy}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + K_{oy}R_1} = \frac{R_1 + R_2}{\frac{R_1 + R_2}{K_{oy}} + R_1} = \frac{R_1 + R_2}{\Delta + R_1}; \quad (4)$$

$$K = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}; \quad \Delta = \frac{R_1 + R_2}{K_{oy}}. \quad (5)$$

Таким образом, погрешность преобразования классического способа при любом включении усилителя составляет $\Delta = \frac{R_1 + R_2}{K_{OY}}$. Такое условие является неприемлемым при построении усилителей биопотенциалов.

2. Разработка активных схем на операционных усилителях для УБП нового класса

Рассмотрим исходную схему универсального усилителя, который включает в себя активную схему на операционном усилителе, инвертирующий и не инвертирующий входы которого через первый и второй аналогичные резисторы связаны с соответствующими входами универсального усилителя, выход которого является выходом операционного усилителя, последний через третий резистор обратной связи связанный с инвертирующим входом операционного усилителя, дополнительно введен четвертый резистор, который подключен между выходом и не инвертирующим входом операционного усилителя, при этом, для резисторов первого и второго входов обеспечивается одновременное численное соответствие номиналов собственному коэффициенту усиления операционного усилителя, а третий и четвертый резисторы аналогичные, имеют одинаковый номинал, который численно определяет коэффициент усиления. Схема такого усилителя представлена на рис. 2.

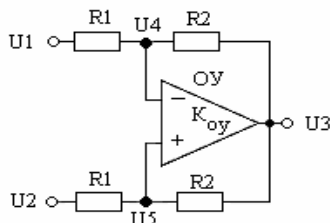


Рис. 2. Схема универсального усилителя с линейным формированием коэффициента усиления

Представим обоснование математической модели универсального усилителя, предложенного в данной работе. Предварительно определим напряжение входов операционного усилителя:

$$U_4 = U_1 - \frac{(U_1 - U_3) \cdot R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_1 \cdot R_1 + U_1 \cdot R_2 - U_1 \cdot R_1 + U_3 \cdot R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_1 \cdot R_2 + U_3 \cdot R_1}{R_1 + R_2}; \quad (6)$$

$$U_5 = U_2 - \frac{(U_2 - U_3) \cdot R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_2 \cdot R_1 + U_2 \cdot R_2 - U_2 \cdot R_1 + U_3 \cdot R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_2 \cdot R_2 + U_3 \cdot R_1}{R_1 + R_2}. \quad (7)$$

Определим коэффициент усиления схемы:

$$U_3 = U_{\text{вих}} = K_{OY} \cdot (U_5 - U_4) = K_{OY} \cdot \left(\frac{U_2 R_2 - U_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) = \frac{K_{OY} R_2}{R_1 + R_2} \cdot (U_2 - U_1) = K \cdot (U_2 - U_1). \quad (8)$$

Очевидно, что общий коэффициент усиления может быть представлен как

$$K = \frac{K_{OY} \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{\frac{R_1 + R_2}{K_{OY}}} = \frac{R_2}{\frac{R_1}{K_{OY}} + \frac{R_2}{K_{OY}}}. \quad (9)$$

На практике R_1 определяет входное сопротивление и K_{OY} – собственный коэффициент усиления операционного усилителя численно составляют $10^5 \dots 10^6$. Поэтому целесообразно обеспечить указанное численное равенство $R_1 = K_{OY}$. Это позволит уточнить:

- коэффициент усиления $K = \frac{R_2}{1 + \Delta}$;
- погрешность $\Delta = \frac{R_2}{K_{OY}}$, окончательно имеем $K = R_2$ (численно).

ем $K = R_2$ (численно).

Таким образом, придерживаясь численного равенства $K_{OY} = R_1$, можно получить для технического решения, представленного на рис 2.

1. Минимальную погрешность преобразования, существенно меньшую, чем в известных классических схемах

$$\frac{R_2}{K_{OY}} \ll \frac{R_1 + R_2}{K_{OY}}; \quad (10)$$

2. Линейно зависимый общий коэффициент усиления, $K = 0 \dots K_{\text{max}}$.

3. Номинал сопротивления резистора R_2 численно определяет упомянутый коэффициент, установка коэффициента – одним номиналом.

4. Прецизионный инвертирующий усилитель при фиксации потенциала U_2 ;

5. Прецизионный не инвертирующий усилитель при $U_1 = 0$;

6. Прецизионный усилитель разницы $U_1 - U_2$ или $U_2 - U_1$ в зависимости от порядка коммутации входных напряжений к операционному усилителю;

Приведенные преимущества исходного варианта универсального усилителя обоснованы аналитически и проверены экспериментально, доказывают возможность реализации поставленной задачи.

Другим вариантом исполнения универсального усилителя является устройство, которое включает активную схему на операционном усилителе, инвертирующий и не инвертирующий входы которого через аналогичные соответственно первый и второй резисторы подключены к первому и второму входу универсального усилителя, согласно изобретения, введен третий резистор двойного номинала, который подключен между инвертирующим и не инвер-

тирующим входами операционного усилителя. Схема представлена на рис. 3.

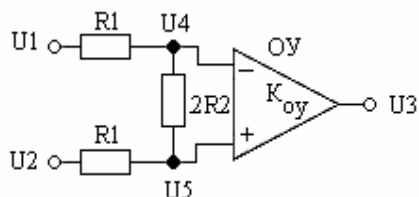


Рис. 3. Схема универсального усилителя с установкой коэффициента усиления одним регулирующим элементом

Обоснование работы варианта универсального усилителя по схеме на рис. 3:

$$U_4 = U_1 - \frac{(U_1 - U_2) \cdot R_1}{2(R_1 + R_2)} = \frac{2U_1 \cdot R_1 + 2U_1 \cdot R_2 - U_1 \cdot R_1 + U_2 \cdot R_1}{2(R_1 + R_2)} = \quad (11)$$

$$= \frac{U_1 \cdot R_1 + 2U_1 \cdot R_2 + U_2 \cdot R_1}{2(R_1 + R_2)};$$

$$U_5 = U_2 + \frac{(U_1 - U_2) \cdot R_1}{2(R_1 + R_2)} = \frac{2U_2 \cdot R_1 + 2U_2 \cdot R_2 + U_1 \cdot R_1 - U_2 \cdot R_1}{2(R_1 + R_2)} = \quad (12)$$

$$= \frac{U_2 \cdot R_1 + 2U_2 \cdot R_2 + U_1 \cdot R_1}{2(R_1 + R_2)};$$

$$U_3 = U_{\text{вих}} = K_{OY}(U_5 - U_4) = K_{OY} \left(\frac{2U_2 R_2 - 2U_1 R_2}{2(R_1 + R_2)} \right) = \quad (13)$$

$$= \frac{K_{OY} R_2}{R_1 + R_2} (U_2 - U_1) = K(U_2 - U_1),$$

Для схемы на рис. 3, общий коэффициент усиления K определяется:

$$K = \frac{K_{OY} \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{\frac{R_1}{K_{OY}} + \frac{R_2}{K_{OY}}}; \quad K = \frac{R_2}{1 + \Delta}, \quad (14)$$

а с погрешностью $\Delta = \frac{R_2}{K_{OY}}$, имеем $K=R_2$ (численно).

Кроме указанных выше преимуществ (1 – 6), следует для этого варианта указать следующее.

7. Схема полностью симметрична, что способствует подавлению синфазной составляющей входного сигнала.

8. Операционный усилитель может быть дополнительно использован для расширения функциональных возможностей за счет подключения других входных напряжений для выполнения операций суммирования и/или вычитания и т.д.

Наиболее целесообразным вариантом устройства является универсальный усилитель, который включает активную схему на операционном усилителе, инвертирующий и не инвертирующий входы которого через аналогичные соответственно первый и второй резисторы подключены к первому и вто-

рому входу универсального усилителя, третий резистор двойного номинала подключен между инвертирующим и не инвертирующим входами операционного усилителя. В третьем резисторе двойного номинала, выведена средняя точка, которая соединена с общим проводом нулевого потенциала. Схема данного варианта представлена на рис. 4.

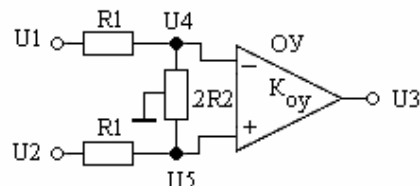


Рис. 4. Схема универсального усилителя с установкой коэффициента усиления одним регулирующим элементом и мультипликативным подавлением синфазной составляющей

Обоснование работы варианта универсального усилителя, выполненного по схеме рис. 4.

$$U_4 = U_1 - \frac{(U_1 - 0)R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_1 R_1 + U_1 R_2 - U_1 R_1}{2(R_1 + R_2)} = \frac{U_1 R_2}{R_1 + R_2}; \quad (15)$$

$$U_5 = U_2 + \frac{(U_1 - 0)R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_2 R_1 + U_2 R_2 - U_1 R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_2 R_1}{R_1 + R_2}; \quad (16)$$

$$U_3 = U_{\text{вих}} = K_{OY}(U_5 - U_4) = K_{OY} \left(\frac{U_2 R_2 - U_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) = \quad (17)$$

$$= \frac{K_{OY} R_2}{R_1 + R_2} (U_2 - U_1) = K(U_2 - U_1);$$

Аналогично предыдущим вариантам, общий коэффициент усиления K определится:

$$K = \frac{K_{OY} \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_2}{\frac{R_1}{K_{OY}} + \frac{R_2}{K_{OY}}}; \quad K = \frac{R_2}{1 + \Delta},$$

с погрешностью $\Delta = \frac{R_2}{K_{OY}}$ имеем $K=R_2$ (численно).

Кроме вышеуказанных преимуществ (1-8) универсальных усилителей, данный предложенный вариант устройства рис. 4 характеризуется высоким качеством подавления синфазной составляющей, что выгодно отличает эту разработку от классических схем.

3. Описание предложенного способа линейного формирования коэффициента усиления активных схем на ОУ

Описанные выше разработки нового класса универсальных усилителей для применения в УБП, представляют собой реализацию обоснованного в диссертационной работе нового способа формирования коэффициента усиления активной схемы на ОУ.

Известны способы задания коэффициента усиления устройств на активных элементах, выполненных на операционных усилителях (ОУ) за счет установления соотношения сопротивлений элементов пассивных и активных цепей обратной связи [1].

Недостатками классических способов формирования коэффициента усиления является нелинейная их зависимость и существенная погрешность за счет номиналов резисторов входной цепи и цепи обратной связи, которые приводят к низкой достоверности, например в процессе определения биопотенциалов. Решение проблемы достигается следующим образом.

В способе задания коэффициента усиления активной схемы на операционном усилителе, в котором указанный коэффициент устанавливается соотношением сопротивления резистора обратной связи и сопротивления входного резистора прямой передачи для инвертирующего или неинвертирующего усиления, дополнительно, любым образом, устанавливают номиналы сопротивления входных резисторов прямой передачи инвертирующего и неинвертирующего входов численно равными собственному коэффициенту усиления операционного усилителя, а номиналом сопротивления резистора обратной связи задают численное значение коэффициента усиления активной схемы на операционном усилителе.

Рассмотренный способ задания коэффициента усиления активной схемы на ОП и варианты предложенных по нему устройств могут быть использованы в области электроники, как основа схемотехнических решений для разных применений, например для регистрации биопотенциалов в медицине.

4. Разработка и обоснование инвариантных схем усиления

Способ задания коэффициента усиления инвариантной активной схемы на операционном усилителе относятся к области электроники, аналоговой схемотехники и может быть применен в широком классе усилителей разнообразного предназначения, например для усилителей биопотенциалов.

Известны способы задания коэффициента усиления устройств на активных элементах, выполненных на операционных усилителях (ОУ) за счет установления соотношения сопротивлений элементов пассивных и активных цепей обратной связи [1].

Недостатками таких способов является ограниченность в определении коэффициента усиления, обязательная привязка к инвертирующему или неинвертирующему входу активной схемы на ОУ.

В известных способах формирования коэффициента преобразования активной схемой на операционном усилителе предусматривает обязательное применение инвертирующего или неинвертирующего входов операционного усилителя для соответствующего включения.

Недостатками такого классического способа задания коэффициента усиления являются ограниченные схемотехнические возможности, присутствующая ошибка одного знака за счет номиналов примененных резисторов во входной цепи и цепи обратной связи, нелинейная зависимость коэффициента усиления устройств на ОУ. Так, для достижения коэффициента K усиления $K = -\frac{R_2}{R_1}$ или $K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ погрешность Δ составляет $\Delta = \frac{R_1 + R_2}{K_{Oy}}$, при этом R_1 определяет входное сопротивление, R_2 – выходное сопротивление схемы, а K_{Oy} – собственный коэффициент усиления операционного усилителя.

Технической задачей разработки явилось расширение схемотехнических возможностей, повышение точности усиления.

Указанная задача достигнута тем, что в способе задания коэффициента усиления инвариантной активной схемы на операционном усилителе, который предусматривает применение инвертирующего или неинвертирующего входов операционного усилителя для соответствующего включения, упомянутый коэффициент усиления устанавливают для неинвертирующего/инвертирующего включения альтернативным применением инвертирующего/неинвертирующего вида входов или, вообще, без учета их вида.

Обоснование инвариантного применения входов ОУ, можно привести на примере распространенных классических устройств.

Указанная техническая задача для K - коэффициента усиления решается следующим образом.

Для повторителя напряжения на рис. 5, связь входного напряжения U_1 и выходного напряжения U_2 операционного усилителя (ОУ) с собственным коэффициентом K_{Oy} усиления определяется с помощью следующих аналитических преобразований:

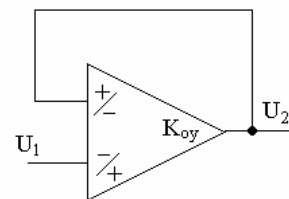


Рис. 5. Инвариантная схема повторителя

$$U_2 = K_{Oy} \cdot (\pm U_2 \mp U_1) = \pm K_{Oy} U_2 \mp K_{Oy} U_1; \quad (18)$$

$$U_2 \cdot (1 \mp K_{Oy}) = \mp K_{Oy} U_1;$$

$$U_2 = K \cdot U_1; \quad K = \frac{\mp K_{Oy}}{1 \mp K_{Oy}} = \frac{1}{\frac{1}{\mp K_{Oy}} + 1} = \quad (19)$$

$$= \frac{1}{\Delta + 1} = 1, \quad \Delta = \frac{\mp 1}{K_{Oy}};$$

очевидно, применение инвариантной схемы повторителя не зависит от вида инвертирующего / не ин-

вертирующего входов ОУ, в тоже время, позволяет учесть Δ -погрешность преобразования с разными знаками. Последнее обстоятельство может быть использовано для повышения точности схем повторения напряжения.

Для инвертирующего усилителя на рис. 6, связь входного U_1 и выходного U_2 напряжений операционного усилителя (ОУ) с собственным коэффициентом K_{oy} усиления определяется с помощью таких аналитических преобразований.

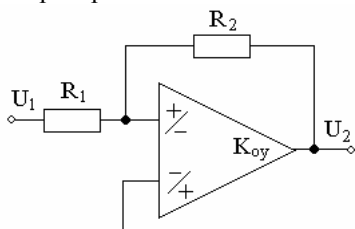


Рис. 6. Инвариантная схема инвертирующего усилителя

$$U_2 = K_{oy} \cdot (\pm(U_1 - \frac{U_1 - U_2}{R_1 + R_2} \cdot R_1)) = \pm K_{oy} \cdot \frac{U_1 R_1 + U_1 R_2 - U_1 R_1 + U_2 R_1}{R_1 + R_2} = \quad (20)$$

$$\pm \frac{K_{oy} \cdot R_2}{R_1 + R_2} U_1 \pm \frac{K_{oy} \cdot R_1}{R_1 + R_2} U_2;$$

$$U_2 \cdot (1 \mp \frac{K_{oy} \cdot R_1}{R_1 + R_2}) = \pm \frac{K_{oy} \cdot R_2}{R_1 + R_2} U_1;$$

$$U_2 = K \cdot U_1; \quad K = \frac{\pm K_{oy} \cdot R_2}{R_1 + R_2 \mp K_{oy} \cdot R_1} = \quad (21)$$

$$= \frac{R_2}{\frac{R_1 + R_2}{\pm K_{oy}} - R_1} = \frac{R_2}{\Delta - R_1};$$

откуда K - коэффициент усиления составляет

$$K = -\frac{R_2}{R_1}; \quad \Delta = \pm \frac{R_1 + R_2}{K_{oy}}.$$

Как вытекает из математических преобразований (20, 21), инвертирующее усиление достигается за счет инвариантного формирования соответствующего коэффициента усиления. Погрешность Δ разная по знаку, в зависимости от вида применения входов, может быть использована для достижения большей точности.

Для схемы неинвертирующего усилителя на рис. 7, связь входного U_1 и выходного U_2 напряжений операционного усилителя (ОУ) с собственным коэффициентом K_{oy} усиления определяется с помощью K – коэффициента усиления.

$$U_2 = K_{oy} (\pm U_1 \mp \frac{U_2}{R_1 + R_2} \cdot R_1) =$$

$$= \pm K_{oy} U_1 \mp \frac{K_{oy} R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_2; \quad (22)$$

$$U_2 (1 \pm \frac{K_{oy} R_1}{R_1 + R_2}) = \pm K_{oy} U_1;$$

$$K = \frac{\pm K_{oy} (R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 \pm K_{oy} R_1} =$$

$$= \frac{R_1 + R_2}{\frac{R_1 + R_2}{\pm K_{oy}} + R_1} = \frac{R_1 + R_2}{\Delta + R_1}; \quad (23)$$

$$K = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}; \quad \Delta = \pm \frac{R_1 + R_2}{K_{oy}}. \quad (24)$$

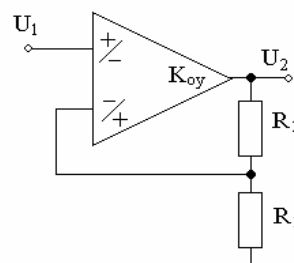


Рис.7. Инвариантная схема неинвертирующего усилителя

Т.е., не инвертирующее усиление также позволяет формировать инвариантный коэффициент усиления с возможностью дальнейшего повышения точности.

Таким образом, основные операции повторения, инвертирующего и не инвертирующего усиления, а на их основе все исходящие схемы являются инвариантными с точки зрения формирования коэффициента усиления. Это позволяет существенно расширить схемотехнические возможности применения операционных усилителей в разных устройствах, позволит, например, упростить разводку проводников печатных плат, а при создании интегральных схем обеспечить симметрию входов.

Предложенное решение позволяет на более высоком уровне, в сравнении с классическими схемами, выполнять проектирование новых технических решений, которые обеспечивают показатели точности недостижимые существующими схемами. Способ, который описан, по другому трактует принцип установления коэффициента усиления, который не привязан к виду входов операционного усилителя, а определяется разновидностью схемной реализации.

Таблица 1

Сравнение инвариантных схем

Инвариантная схема	Усиление	Погрешность
Повторитель	1	$\Delta = \frac{1}{\mp K_{oy}}$
Инвертирующий усилитель	$K = -\frac{R_2}{R_1}$	$\Delta = \pm \frac{R_1 + R_2}{K_{oy}}$
Неинвертирующий усилитель	$K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$	$\Delta = \pm \frac{R_1 + R_2}{K_{oy}}$

5. Сравнительный анализ разработанных активных схем для УБП

Проведем сравнительный анализ основных параметров рассмотренных вариантов схемотехнической реализации усилителей согласно предложенному способу установки коэффициента усиления. Условия проводимых сопоставлений основных параметров для рассматриваемых вариантов и результат сравнения представим в таблице 2. Представим также обоснование подавления синфазной составляющей классической и предложенной схем. В сравнении с классическими схемами, рассмотренная схема для выполнения операции инвертирования входного сигнала ($K = -1$) должна иметь сопротивление $R_2 = 1 \text{ Ом}$, и при $R_1 = 10^5 \dots 10^6 \text{ Ом}$ коэффициент подав-

ления синфазной составляющей, в худшем случае, составит в абсолютных величинах 10^5 , или в относительных -100 дБ. Кроме того, подавление операционным усилителем составит классические -60...-80 дБ, поэтому общее значение коэффициента подавления синфазного напряжения одного каскада предложенной схемы составит -160...-180 дБ. Как описано выше, такое подавление синфазной составляющей, является мультипликативным, обосновано и предложено в работе. Диапазон абсолютных значений входных напряжений с учетом соотношений R_1 и R_2 может составлять десятки тысяч вольт (реально – с необходимым учетом мощностей рассеивания на указанных резисторах).

Таблица 2

Сравнение параметров классических и предложенных схем

Параметр	Классический вариант	Предложенный вариант	Результат сравнения
Погрешность	$\Delta = \frac{R_1 + R_2}{K_{Oy}}$	$\Delta = \frac{R_2}{K_{Oy}}$	$\Delta_{предл.} \ll \Delta_{класс.}$
Коэф. усиления инвертирующего усилителя	$K = -\frac{R_2}{R_1}$	$K = -R_2$	Обеспечение линейной зависимости коэффициента усиления и прецизионный усилитель разности одной схемой
Коэф. усиления неинвертирующего усилителя	$K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$	$K = R_2$	
Дополнительные возможности усиления		$U_{вых} = R_2(U_1 - U_2);$ $U_{вых} = R_2(U_2 - U_1)$	
Входное сопротивление при равном усилении	$R_{вх} = R_1 = \frac{R_2}{K}$	$R_{вх} = R_1 = K_{Oy} \approx 10^6$	Входное сопротивление не зависит от усиления схемы
Подавление синфазной составляющей	$K_{сф} = 60 \text{ дБ}$	$K_{сф} \cdot K_{сф.пасс.} = 160 \text{ дБ}$	$60 \text{ дБ} \ll 160 \text{ дБ}$
Дополнительные характеристики	В принципе, несимметричная схема	Полностью симметричная схема	Преимущества симметричности схемы
Вывод	Параметры предложенного класса усилителей недостижимы классическими схемами		

Выводы

Таким образом, представленный способ установки коэффициента усиления активной схемы на операционном усилителе и варианты предложенных устройств действительно имеют существенные преимущества перед существующими схемами на операционных усилителях, позволяют достичь высокой точности преобразования, линейности коэффициента усиления в рамках от 0 до K_{Oy} – (диапазон от $0 \dots 10^6$); имеют большие функциональные возможности, позволяют достичь наивысших показателей в подавлении синфазной составляющей, что может служить основой при построении прецизионных усилителей биопотенциалов.

Список литературы

1. Остапенко Г.С. Усилительные устройства. – М. Радио и связь, 1992. – 300 с.

2. Шелестов И.П. Операционные усилители. – М.: Солон-Р, 1999. – 172 с.

3. Грицевский П.М., Мамченко А.Е., Степенский Б.М. Основы автоматики, импульсной и вычислительной техники. – М.: Радио и связь, 1987. – 442 с.

4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. – М.: Мир, 1993. – 268 с.

5. Справочник: Интегральные микросхемы. Операционные усилители. Т. 1. – М.: Наука, 1993. – 688 с.

6. Тетельбаум И.М., Шнейдер Ю.Р. Практика аналогового моделирования динамических систем: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.

7. Сиберт У.М. Цепи, сигналы, системы. В 2 т. Пер. с англ. – М., Мир, 1988. – Т. 1. – 162 с.

8. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Пер. с нем. – М.: Наука, 1972. – 334 с.

Поступила в редколлегию 2.12.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Стасев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.