

10095

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



10095

Экз. чит. зала

P13 - 10095

Е.А.Силаев

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ  
С ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬЮ  
(Обзор)

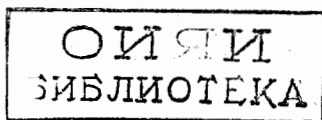
**1976**

P13 - 10095

Е.А.Силаев

СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ  
С ПОВЫШЕННОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬЮ  
(Обзор)

Направлено на 1 Всесоюзное совещание  
по автоматизации научных исследований в  
ядерной физике. Киев, 1976.



При создании систем сбора данных для диагностики параметров электрофизических установок часто возникает задача измерения слабых сигналов на фоне интенсивных помех. Ими могут являться наводки от силовых питающих сетей, от мощных электроагрегатов, уравнительные токи между точками заземления источников и приемников сигналов, пульсация тока питания измерительных цепей и т.п. Эти помехи могут действовать одновременно с сигналом и иметь перекрывающийся с ним частотный спектр.

Иногда источник сигнала вообще не имеет непосредственного соединения с землей и находится под постоянным или переменным потенциалом (измерительные диагонали мостов, шунты для измерения токов в незаземленных цепях и т.п.). Эти потенциалы также могут рассматриваться как помехи.

Во всех этих случаях большую помощь могут оказать специальные измерительные усилители постоянного тока, подавление помех которыми основано на том, что источники сигнала и помехи могут быть по-разному приложены к входным зажимам. По принципу действия можно выделить две группы этих устройств:

- 1) собственно измерительные усилители (ИУ), основанные на свойстве дифференциального усилителя усиливать разностные и подавлять синфазные сигналы;
- 2) развязывающие усилители (РУ), имеющие гальваническое разделение входных и выходных каскадов.

Параметром, определяющим их помехоустойчивость, является относительное ослабление синфазного сигнала

(ООСС), равное отношению коэффициентов передачи усилителя для разностного и синфазного сигналов.

На рис. 1 показаны типовые значения ООСС в зависимости от частоты для ИУ и РУ. В сравнении с аналогичной зависимостью для простого операционного усилителя (ОУ), включенного по схеме дифференциального усилителя (рис. 2), ИУ и РУ имеют реальный выигрыш по ООСС, соответственно на 20 и 60 дБ <sup>/3/</sup>.

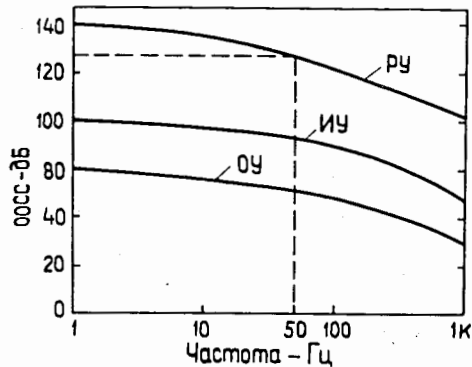


Рис. 1. Относительное ослабление синфазного сигнала (ООСС) усилителей в зависимости от частоты.

Существенным недостатком дифференциального усилителя (рис. 2) является влияние разброса сопротивлений внешних цепей на его помехоустойчивость. Если ООСС для собственно ОУ (ООСС<sub>ОУ</sub>) достигает весьма высоких величин (90 - 100 дБ и выше) <sup>/4-9/</sup>, этот же показатель для реального усилителя с подключенными внешними цепями (ООСС<sub>у</sub>) заметно ниже <sup>/5/</sup>.

$$ООСС_{у} = \frac{ООСС_{R} \cdot ООСС_{ОУ}}{ООСС_{R} + ООСС_{ОУ}},$$

где: ООСС<sub>Р</sub> - ослабление синфазного сигнала четырехплечим мостом R<sub>1</sub>R<sub>2</sub>.

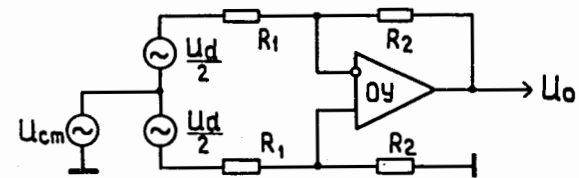


Рис. 2. Функциональная схема дифференциального усилителя на одном ОУ.

Другими недостатками усилителя (рис. 2) являются сложность регулировки усиления (при сохранении заданного ООСС<sub>у</sub>) и трудность получения высокого входного сопротивления (особенно при большом усилении).

Недостатки простого дифференциального усилителя привели к необходимости создания специального ИУ <sup>/3-5,7,8,10-13/</sup>.

Этот усилитель выполняется на базе трех или более ОУ (рис. 3).

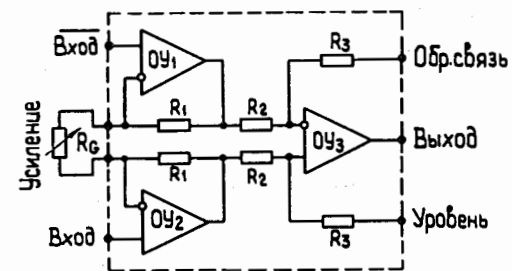


Рис. 3. Функциональная схема измерительного усилителя.

Первый каскад (ОУ<sub>1</sub>, ОУ<sub>2</sub>) - дифференциальный неинвертирующий с парафазным выходом. Коэффициент усиления

этого каскада, как правило, определяет усиление всего усилителя:

$$K = 1 + \frac{2R_1}{R_G}$$

Для синфазного входного сигнала первый каскад является повторителем.

Второй каскад (ОУ<sub>2</sub>) выполнен по схеме дифференциального усилителя с несимметричным выходом (зажимы "Выход" и "Обр.связь" соединены, зажим "Уровень" заземлен). Обычно он служит только для подавления синфазного сигнала на выходе первого каскада.

Достоинствами ИУ является высокое входное сопротивление (дифференциальное и синфазное), возможность широкодиапазонной (до 80 дБ) регулировки усиления с помощью одного резистора ( $R_G$ ). Однако при выполнении ИУ на автономных ОУ по-прежнему остро стоит проблема ухудшения ООССУ из-за рассогласования как параметров ОУ, так и внешних резисторов обратной связи. Частично проблема решается применением в качестве ОУ<sub>1</sub> и ОУ<sub>2</sub> (рис. 3) специальной пары ОУ, согласованных по напряжению смещения нуля и дрейфу, например, модели 3500 МР фирмы "Burr-Brown" /5,18,19/.

Полное свое решение проблема получения высокого ООССУ в ИУ получила после разработки и выпуска рядом фирм интегральных ИУ (гибридных и монокристаллических) /3-5,8,10-15/. Благодаря ряду технологических приемов (например, лазерной подстройки элементов схемы) были получены результаты, практически недостижимые при выполнении ИУ на дискретных компонентах.

Для ИУ допустимый диапазон синфазных напряжений не превышает  $\pm 10$  В. В некоторых случаях этого недостаточно.

Так, при измерении анодного тока мощных генераторных ламп, датчик сигнала (шунт) может находиться под напряжением в несколько тысяч вольт. В подобных случаях с успехом применяются развязывающие усилители (РУ) /3-5,9,14,15,20/. Развязка осуществляется применением трансформаторной или оптоэлектронной связи. Причем для усиления сигнала постоянного тока необходимо

в первом случае применение принципа "модуляция - демодуляция" /3,15/.

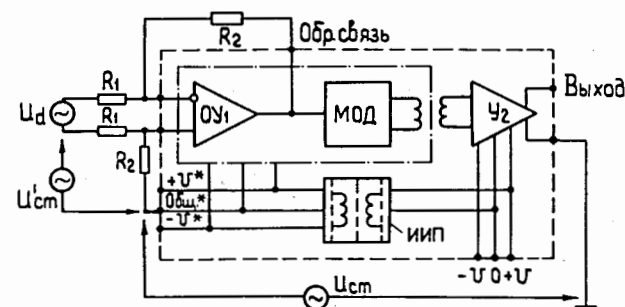


Рис. 4. Функциональная схема РУ фирмы "Burr-Brown".

На рис. 4 приведена типичная схема РУ с трансформаторной связью /5/. Первый каскад его выполнен на ОУ<sub>1</sub>, питаемого от встроенного "плавающего" источника питания ИИП. С его выхода сигнал поступает на модулятор МОД, а оттуда - на первичную обмотку изолирующего трансформатора. Эти узлы заключены в общий электростатический экран. Полюса "плавающего" источника питания выведены на внешние контакты, что позволяет применять его для питания внешних измерительных цепей, например, мостов.

Выходной сигнал снимается с демодулятора-усилителя У<sub>2</sub>, подключенного к вторичной обмотке трансформатора.

Недостатком этой схемы РУ, снижающим его возможности, является необходимость подключения внешних цепей обратной связи для стабилизации усиления и замыкания токов смещения входного ОУ.

Фирмой "Analog Devices" предложена модифицированная схема РУ (рис. 5), позволяющая получить высокое ООССУ (не менее 126 дБ) при максимально допустимом напряжении между входом и выходом (до 7500 В) /3,4,15/. В этом усилителе нет надобности подключать внешние цепи обратной связи. Источник сигнала здесь подключается между инвертирующим входом стабильного входно-

го предусилителя на полевых транзисторах и входом модулятора МОД. Входы предусилителя и модулятора имеют равные и противоположно-направленные токи смещения  $I_B$ , благодаря чему взаимно смещают друг друга /3/.

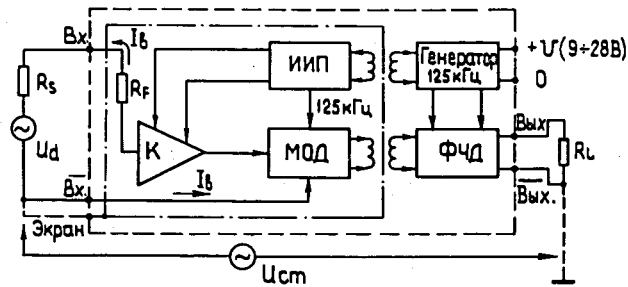


Рис. 5. Функциональная схема РУ фирмы "Analog Devices".

Недостатком РУ с трансформаторной связью является их низкое быстродействие. Обычное значение несущей частоты 125 - 150 кГц обеспечивает ширину полосы пропускания не выше 1,5 - 2 кГц (для малого сигнала).

Усилители с оптоэлектронной связью имеют более высокое быстродействие (полоса пропускания до 10 кГц), меньшие размеры и большую надежность. Первоначально выполнялись на базе обычных ОУ, связанных через фотодиодные, фототранзисторные или усилительные оптроны. Так как отдельно взятый оптрон является весьма нелинейным прибором, для использования в РУ ряд фирм, например "Monsanto" и "Hewlett Packard", выпускают их согласованные пары /17,20,21/. Включением одного из оптронов в цепь прямой связи, а другого - в цепь обратной, удается в значительной мере скомпенсировать нелинейность /20,21/.

Возможно также предварительное преобразование сигнала в частоту или скважность импульсов с последующей их передачей через оптрон на демодулятор. В этом слу-

чае нелинейность оптрона не имеет значения, однако неизбежен проигрыш в быстродействии.

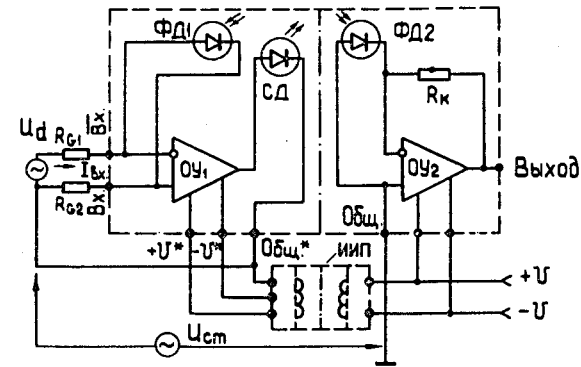


Рис. 6. Схема РУ с оптоэлектронной связью.

Недавно фирма "Burr-Brown" (США) предложила серию гибридных интегральных схем РУ с оптоэлектронной связью /5/. На рис.6 показана функциональная схема одного из них (модель "3650"). Это усилитель с токовым входом, содержащий два усилительных каскада, связанных через светодиод СД и согласованную пару фотодиодов ФД<sub>1</sub> и ФД<sub>2</sub>. Коэффициент передачи усилителя равен:

$$K_I = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{I_2 R_K}{I_1},$$

где:  $I_1$ ,  $I_2$  - токи в цепи фотодиодов ФД<sub>1</sub> и ФД<sub>2</sub>, соответственно.

Световой поток СД строго одинаково распределяется между ФД<sub>1</sub> и ФД<sub>2</sub>, благодаря чему токи  $I_1$  и  $I_2$  в цепях фотодиодов равны. Тогда  $K_I = R_K$ . Сопротивление  $R_K = 1 \text{ МОм}$ , поэтому  $K_I = 10^6 \text{ В/А}$ .

Питание первого каскада этого РУ рекомендуется осуществлять от "плавающего" источника - конвертора модели "700" этой же фирмы /5/.

Однако, несмотря на принимаемые меры, РУ с оптоэлектронной связью имеют несколько меньшую линейность по сравнению с трансформаторными.

В настоящее время уже известны многие десятки моделей ИУ и РУ, удовлетворяющие разнообразным требованиям потребителей. В сводной таблице приведены параметры некоторых усилителей (по три модели каждой разновидности), выпущенных известными фирмами США: "Burr-Brown" (BB) и "Analog Devices" (AD). Эти модели, с нашей точки зрения, наиболее полно соответствуют условиям работы в системах сбора данных, предназначенных для автоматизации электрофизических установок (ускорителей, сверхпроводящих устройств и т.п.). Они могут быть применены и во многих других случаях, когда требуется точная регистрация слабых сигналов на фоне интенсивных помех.

Таблица.  
Параметры некоторых моделей измерительных и развязывающих усилителей.

№ п/п	Параметры	Тип усилителя					
		605	AD521	3522	272	275	3650
1.	Усиление: величина дрейф температурный, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ мелочность, %	$1 \pm 1000$ $\pm 15$ $\pm 0,01$	$1 \pm 1000$ $\pm 10,05$ $\pm 0,1$	$1 \pm 1000$ $\pm 20$ $\pm 0,1$	1 $\pm 150$ $\pm 0,25$	$1 \pm 100$ $\pm 40$ $\pm 0,05$	$10^6 \text{ В/А}$ $\pm 100$ $\pm 0,25$
2.	Быстродействие: полоса частот (-3дБ), МГц скорость отклика, В/мкс	$0,3(k-1)$ 0,1	$2(k+1)$ 10	$2(k+100)$ 150	0,002	0,0015	0,01 0,8
3.	Входные напряжения: дифференциальное (макс. доп.) синфазное отн. выхода, В ослабление синф. сигнала, дБ.	$\pm 15$ $\pm 10$ 120	$\pm 30$ $\pm 10$ 110	$\pm 8$ $\pm 8$ 90	$\pm 2000$ $\pm 7500$ 125	$\pm 125$ $\pm 2500$ 120	1500 120
4.	Входной импеданс: дифференциальный, ГОм синфазный, ГОм	1 1	3 6	100 100	1000 100	0,1 100	250м 1
5.	Напряжение смещения нуля: величина мВ температурный дрейф, мкВ/ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,5$	$\pm 5$	$\pm 2,2$ $\pm 13$	$\pm 50$ $\pm 150$	$\pm 1,25$ $\pm 5$	$\pm 1$ $\pm 15$
6.	Входной ток: величина (макс.), нА. температурный дрейф, нА/ $^{\circ}\text{C}$	100 1	40 0,5	0,02 $k2/10^{\circ}\text{C}$	0,05 $k2/10^{\circ}\text{C}$	7 0,1	40 0,3
7.	Выходные параметры: диапазон напряжений, В импеданс, Ом	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 10$ 0,2	$\pm 3$ 1500	$\pm 10$ 1500	10
8.	Питание (ном.), В	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$	$\pm 15$
9.	Фирма - изготовитель	AD	AD	BB	AD	AD	BB
10.	Примечания	Большое ОС, Малый дрейф	Незарядной маналтная	Быстрый	Высокочастотный	Точный	Быстрый оптоэлектронный

## Литература

1. Дж.Грэм, Дж.Тоби, Л.Хьюлсман. Проектирование и применение операционных усилителей (пер.с англ.), "Мир", М., 1974.
2. В.Л.Шило. Линейные интегральные схемы. "Сов.Радио", М., 1974.
3. Isolation and Instrumentation Amplifiers (Application, Theory, Selection). "Analog Devices", 1975.
4. "Analog Devices" Product Guide, 1975.
5. "Burr-Brown" Catalogue, 1976.
6. Альтман. Электроника № 12 (1972), стр. 22.
7. Лайерли. Электроника № 23 (1972), стр. 58.
8. "Teledyne Philbrick" Product Guide, 1973.
9. Analog Product Log, No2, "Analog Devices", Norwood, July, 1975.
10. Data Conversion Products. "Teledyne Philbrick", Spring Edition, 1975.
11. Engineering Product Handbook. "Datel Systems", Canton, 1974.
12. "Zeltex" Catalogue, Concord, September, 1972.
13. "Function Modules" Product Catalog, California, 1974.
14. Opto-isolator Application Notes, "Monsanto", Palo Alto, 1973.
15. Зико. Электроника № 7 (1972), стр. 41.
16. Маттера. Электроника № 19 (1975), стр. 45.
17. Catalog of Optoelectronic Products. "Monsanto", Palo Alto, 1974.
18. Чойс. Электроника № 11 (1972), стр. 39.
19. Сейно. Электроника № 9 (1975), стр. 62.
20. Ходапп. Электроника № 5 (1976), стр. 33.
21. Френзел. Электроника № 15 (1975), стр. 57.

Рукопись поступила в издательский отдел  
8 сентября 1976 года.