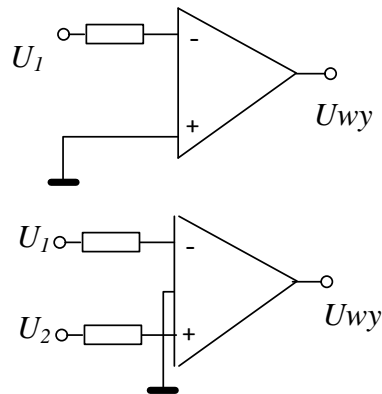


Wzmacniacze operacyjne i instrumentalne



Rys. 1. Wzmacniacz niesymetryczny i symetryczny (róźnicowy)

We wzmacniaczu niesymetrycznym

$$U_{wy} = U_1 \cdot K_u$$

Podczas gdy we wzmacniaczu różnicowym

$$U_{wy} = (U_1 - U_2) \cdot K_u$$

Parametry wzmacniacza zależą od jego elementów w sprzężeniu zwrotnym. Wzmacniacz operacyjny (OpAmp) jest wzmacniaczem bez elementów sprzężenia zwrotnego – jest więc w zasadzie półfabrykatem – użytkownik dodaje do niego sprzężenie zwrotne w zależności od tego co chce otrzymać.

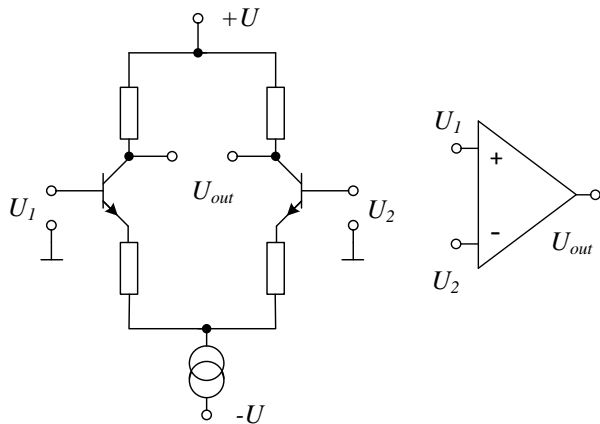
Z kolei wzmacniacz instrumentalny jest to gotowy do użycia wzmacniacz napięcia w którym producent umieścił elementy sprzężenia zwrotnego w strukturze.

Wzmacniacz operacyjny jest wzmacniaczem różnicowym. Zaletą wzmacniacza różnicowego jest większa odporność na zakłócenia, gdyż jeśli pojawi się zakłócenie ΔU to

$$U_{out} = K_u [(U_1 + \Delta U) - (U_2 + \Delta U)] = K_u (U_1 - U_2)$$

Struktura wzmacniacza operacyjnego

Rys. 2. Struktura wzmacniacza operacyjnego



Sercem wzmacniacza operacyjnego jest para dwóch tranzystorów jak wyżej – pozostałe elementy spełniają rolę pomocniczą.

W idealnym przypadku obie połówki wzmacniacza powinny być identyczne, wówczas tłumienie zakłócenia (składowej wspólnej) jest bliskie nieskończoności.

Na skutek defektów struktury nigdy tak nie jest i dlatego bardzo ważnym parametrem wzmacniacza jest stosunek wzmocnienia obu połówek – common mode rejection

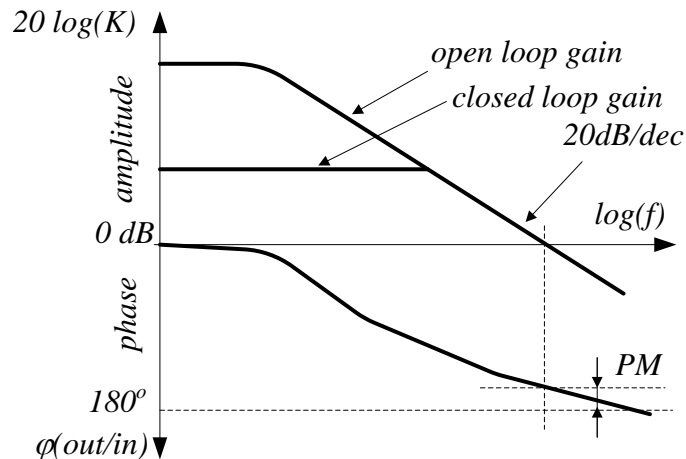
$$CMR = 20 \log \frac{K_u^+}{K_u^-}$$

$$U_{out} = (U_1 - U_2) K^- \left[1 + \frac{1}{CMRR} \frac{\Delta U}{(U_1 - U_2)} \right]$$

W dobrych wzmacniaczach CMR jest powyżej 100 dB.

Charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza

Rys. 3. Typowa charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza



Ważnym parametrem jest PM – phase margin na charakterystyce fazowej – a więc ile mamy zapasu do wzbudzenia się układu (gdy $\varphi > 180^\circ$)

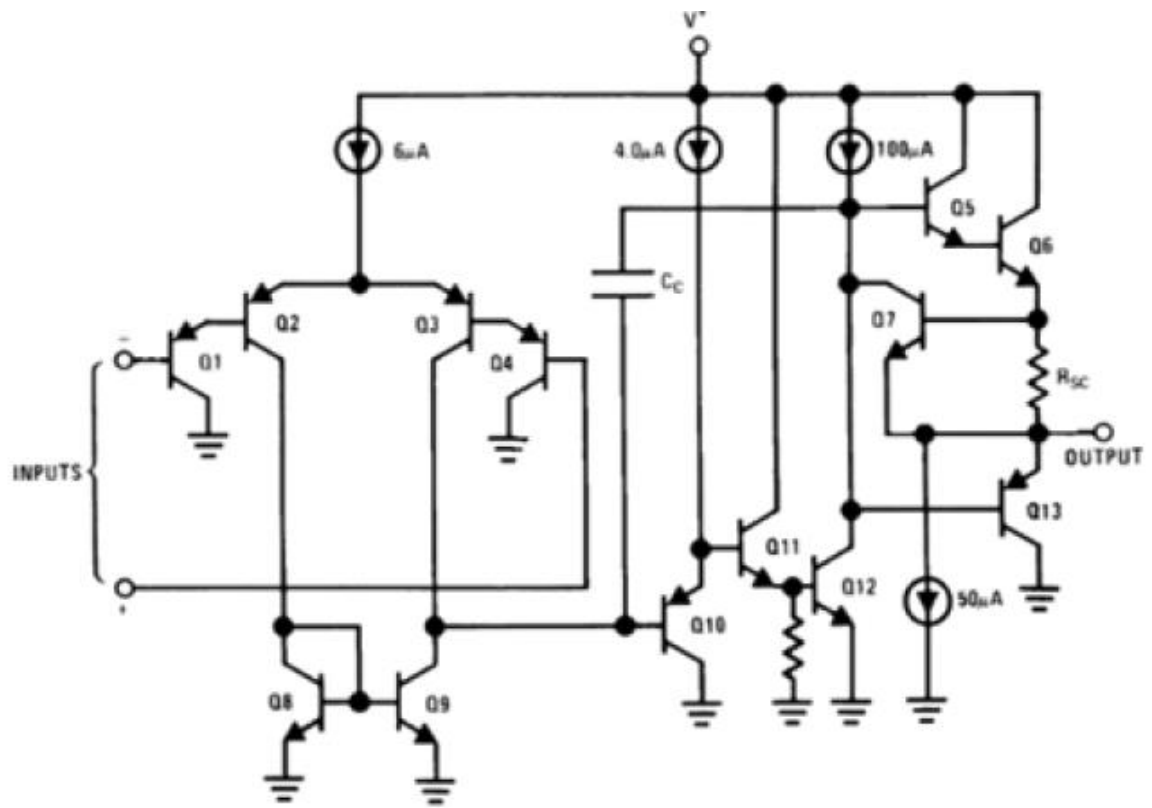
Charakterystyka amplitudowa składa się z części płaskiej i opadającej z szybkością 20 dB/dec . Oczywiście do utku jest tylko część płaska – pasmo przenoszenia (bandwidth).

Pasmo jest najmniejsze przy największym wzmocnieniu – open loop gain – wzmacniacz bez sprzężenia zwrotnego.

Im mniejsze wzmocnienie tym większe pasmo a więc nie opłaca się nadmiernie zwiększać wzmocnienia. Można napisać że

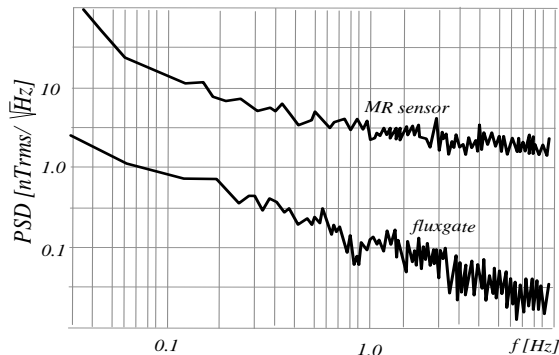
$$\text{wzmocnienie} \cdot \text{pasmo} = G \cdot BW = \text{const}$$

A więc pasmo BW największe jest dla wzmocnienia (gain) $G = 1$. Producenci często podają parametr GBW co oznacza właśnie pasmo dla wzmocnienia 1. Dla innych wzmocnień można wtedy łatwo określić pasmo częstotliwości.

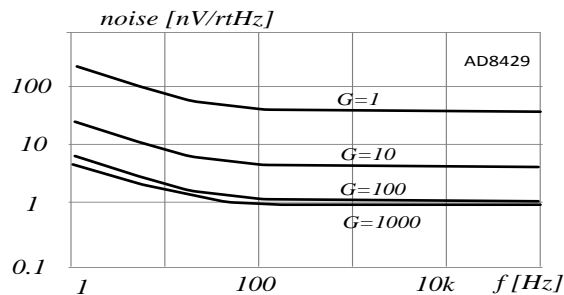


Szumy

Rys. 4. Typowe spektralne charakterystyki szumu dwóch czujników



Rys. 5. Typowe charakterystyki szumowe wzmacniacza



Szumy zazwyczaj wzrastają wraz ze zmniejszaniem się częstotliwości i ustalają się powyżej 1 kHz. Dlatego zazwyczaj podaje się dwa rodzaje szumów - niskoczęstotliwościowe (dla $f < 10$ Hz) oraz szumy dla 1 kHz.

Szumy niskoczęstotliwościowe podaje się jako wartość międzyszczytowa sygnału uV_{pp} .

Szumy zależą od pierwiastka z pasma

$$U_{sz} = k \cdot \sqrt{\Delta f}$$

A więc zazwyczaj podaje się je jako $nV / \sqrt{\Delta f}$

i użytkownik musi je sama przeliczyć znając pasmo.

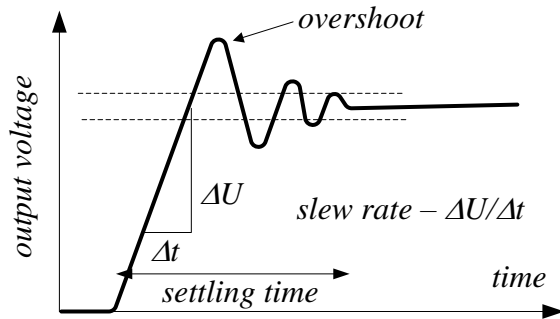
Dodatkowo użytkownik powinien przeliczyć szumy wg zależności

$$U_N = \sqrt{(U_{Ni})^2 + (U_{No} / G)^2 + (R_s I_{Ni})^2}$$

Gdzie U_{Ni} – szumy napięciowe wejściowe, U_{No} – szumy napięciowe wyjściowe, I_{Ni} – szumy prądowe, R_s – rezystancja źródła.

Szybkość wzmacniacza

Rys. 6. Charakterystyka czasowa wzmacniacza



Oczywiście im większe pasmo wzmacniacza tym jest on szybszy.

Szybkość wzmacniacza określa się też z charakterystyki czasowej a mianowicie:

- Szybkość narastania sygnału – slew rate –

$$\text{slew rate} = \Delta U / \Delta t$$

- czas ustalania się wartości – settling time

- Przeregulowanie przy pracy oscylacyjnej – overshoot.

Dobre (szybkie) wzmacniacze mają slew rate powyżej 10 kV/us a settling time poniżej 2 ns.

Rodzaje wzmacniaczy

Tabela 1. Parametry trzech typowych wzmacniaczy operacyjnych ogólne

	LM358	TL071	LM833
GBW	0.7 MHz	3 MHz	16 MHz
Slew rate	0.3 V/ μ s	13 V/ μ s	7 V/ μ s
Bias current	250 nA	200 pA	700 nA
Offset	7 mV	10 mV	2 mV
Offset drift	7 μ V/ $^{\circ}$ C	18 μ V/ $^{\circ}$ C	2 μ V/ $^{\circ}$ C
Noise 1 kHz	40 nV/rtHz	18 nV/rtHz	5 nV/rtHz
CMR _{min}	65dB	70 dB	80 dB

Nie ma jednego dobrego wzmacniacza bo poprawa jednego parametru często prowadzi do pogorszenia drugiego.

Dlatego dzielimy wzmacniacze na „ogólnego zastosowania - general purpose” gdzie wszystkie parametry są niezłe, ale żaden nie jest szczególnie dobry, oraz wzmacniacze specjalizowane:

- Low bias – mały prąd wejściowy, a więc duża rezystancja wejściowa
- Low noise – małe szумы
- Low drift – małe temperaturowe pełzanie zera.

Z tabeli 1 widać jak znacznie mogą różnić się parametry. Najbardziej krytycznym parametrem jest pełzanie zera offset drift ponieważ są to błędy rzędu μ V, podczas gdy szумы są rzędu nV.

Wzmacniacze specjalizowane

Tabela 1. Parametry trzech typowych wzmacniaczy operacyjnych ogólne

	LM358	TL071	LM833
GBW	0.7 MHz	3 MHz	16 MHz
Slew rate	0.3 V/ μ s	13 V/ μ s	7 V/ μ s
Bias current	250 nA	200 pA	700 nA
Offset	7 mV	10 mV	2 mV
Offset drift	7 μ V/ $^{\circ}$ C	18 μ V/ $^{\circ}$ C	2 μ V/ $^{\circ}$ C
Noise 1 kHz	40 nV/ $\sqrt{\text{rtHz}}$	18 nV/ $\sqrt{\text{rtHz}}$	5 nV/ $\sqrt{\text{rtHz}}$
CMR _{min}	65dB	70 dB	80 dB

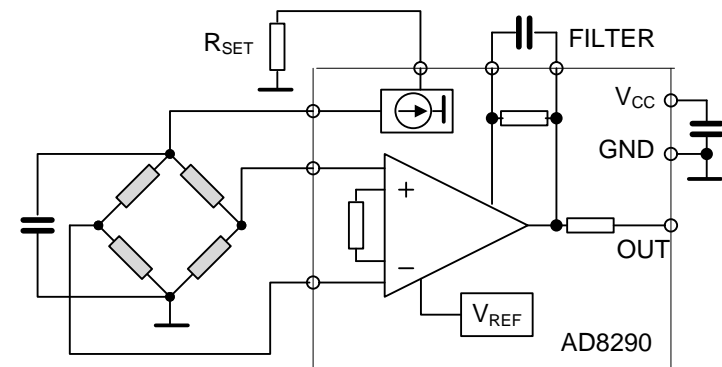
Tabela 2. Parametry wzmacniaczy specjalizowanych

	AD549 Low bias I	AD8630 Low drift	AD797 Low noise
Bandwidth	1 MHz	2.5 MHz	8 MHz
Slew rate	3 V/ μ s	1 V/ μ s	20 V/ μ s
Bias current	0.04 pA	30 pA	250 nA
Offset	0.3 mV	1 μ V	25 μ V
Offset drift	5 μ V/ $^{\circ}$ C	2 nV/ $^{\circ}$ C	0.2 μ V/ $^{\circ}$ C
Noise 1 kHz	35 nV/ $\sqrt{\text{rtHz}}$	22 nV/ $\sqrt{\text{rtHz}}$	0.9 nV/ $\sqrt{\text{rtHz}}$
Noise < 10Hz	4 μ V _{pp}	0.5 μ V _{pp}	0.05 μ V _{pp}

Obok siebie umieszczono dla porównania dwie tabele – wzmacniacze ogólnego zastosowania oraz specjalizowane „the best of”.

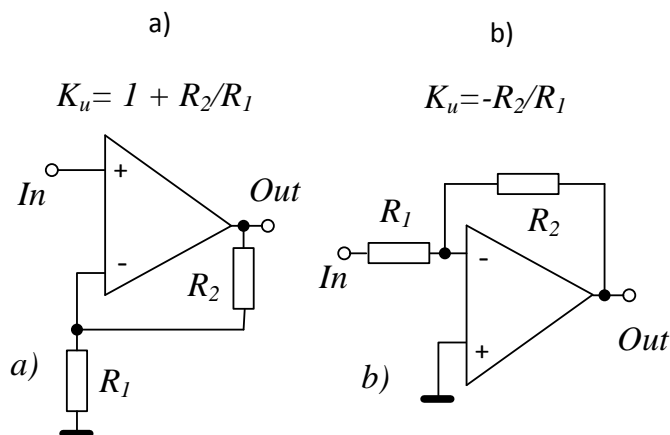
Widać jak bardzo można wyśrubować poszczególne parametry – kosztem innych

Rys. 7. Specjalizowany wzmacniacz AD8290 do współpracy z układem mostkowym – „na pokładzie” obok wzmacniacza jest układ zasilania i filtr wyjściowy

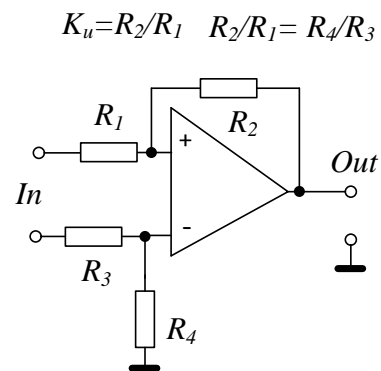


Podstawowe struktury wzmacniaczy

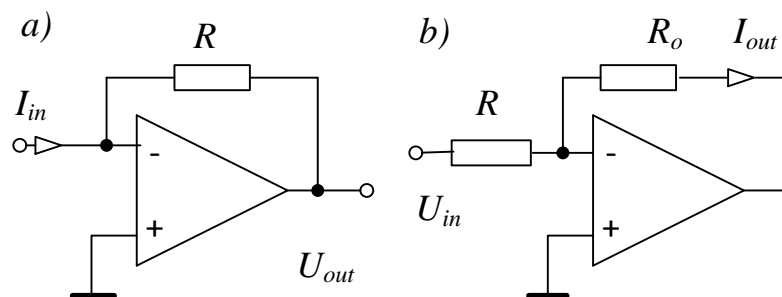
Rys. 7. Wzmacniacze niesymetryczne - wzmacniacz nieodwracający fazy (a) i odwracający fazę (b)



Rys. 8. Wzmacniacz symetryczny

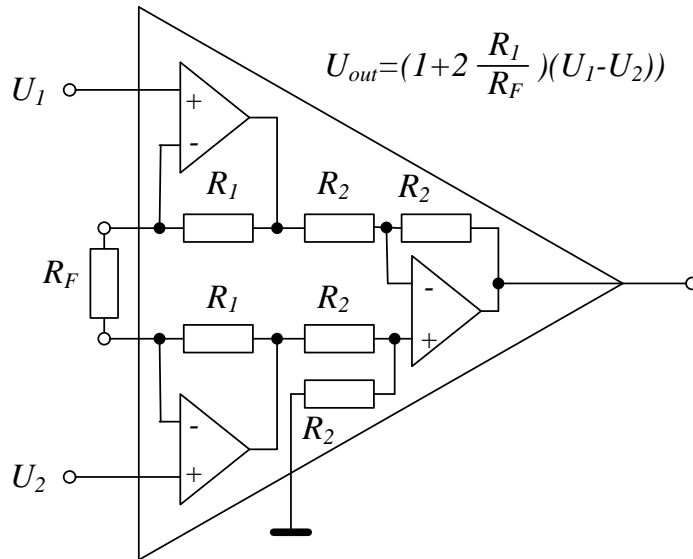


Rys. 9. Przetworniki: prąd-napięcie (a). Napięcie-prąd (b)



Wzmacniacze instrumentalne

Rys. 10. Struktura typowego wzmacniacza instrumentalnego



Wzmacniacz instrumentalny składa się de facto z trzech wzmacniaczy operacyjnych – po jednym na oba sygnały wejściowe i sumującym.

Wzmacniacz ma wejście symetryczne a wyjście niesymetryczne (są też wzmacniacze z wejściem i wyjściem symetrycznym).

Oporniki sprzężenia zwrotnego są zintegrowane z układami z wyjątkiem jednego opornika R_F służącego do ustalania wzmocnienia.

Ostatnio rezygnuje się nawet z tego opornika bo może być on źródłem błędów – zamiast tego oferuje się wzmacniacze o ustalonym wzmocnieniu lub z możliwością zmiany wzmocnienia przez software.

Parametry wzmacniaczy instrumentalnych

Tabela 3. Parametry typowych wzmacniaczy instrumentalnych ogólnego zastosowania

	AD620 G = 1	AD620 G =100	AD8228 G=100
Bandwidth	1 MHz	120 kHz	110 kHz
Offset drift	0.1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0.1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Bias current	0.5 nA	0.5 nA	0.4 nA
Gain error	0.01%	0.15%	0.05%
Gain(T)	10 ppm/ $^\circ\text{C}$	10 ppm/ $^\circ\text{C}$	1 ppm/ $^\circ\text{C}$
Noise 1 kHz	9 nV/rtHz	9 nV/rtHz	8 nV/rtHz
Noise 1/f	3 μVpp	0.3 μVpp	0.3 μVpp
Nonlinearity	10 ppm	10 ppm	5 ppm
CMRR	90 dB	130 dB	120 dB
R_{in}	10 G Ω	10 G Ω	100 G Ω
Slew rate	1.2 V/ μs	1.2 V/ μs	2.5 V/ μs

W porównaniu z tabelą 1 pojawiły się nowe parametry określające błędy przetwarzania. Niektóre parametry zależą od wartości wzmocnienia.

Tabela 4. Specjalizowane wzmacniacze instrumentalne –"the best of"

TABLE 3.9
The best parameters of instrumentation amplifiers.

	AD8429 G =100	AD8230 G =100	AD8220 G=100
Bandwidth	1.2 MHz	2 kHz	120 kHz
Offset drift	0.1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	50 nV/$^\circ\text{C}$	5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Bias current	150 nA	0.15 nA	10 pA
Gain error	0.3%	0.01%	0.2%
Gain(T)	5 ppm/ $^\circ\text{C}$	14 ppm/ $^\circ\text{C}$	3 ppm/ $^\circ\text{C}$
Noise 1 kHz	1 nV/rtHz	240 nV/rtHz	14 nV/rtHz
Noise 1/f	0.1 μVpp	3 μVpp	0.8 μVpp
Nonlinearity	2 ppm	20 ppm	30 ppm
CMRR	90 dB	120 dB	100 dB
R_{in}	1.5 G Ω		10 ⁴ G Ω
Slew rate	22 V/ μs	2 V/ μs	2 V/ μs

Podobnie jak w przypadku wzmacniaczy operacyjnych także i wzmacniacze instrumentalne mają swoje wersje specjalizowane.

Error budget of AD 620 IA for input values $R_s = 350 \Omega$, $U_{in} = 100$ mV, gain 100, temp.; 25°C [after MT-066]

		Error [ppm]
Offset U_{os}	55 μ V	550
Offset I_{os}	350 $\Omega \times 0.5$ nA	1.8
Gain error	0.15%	1500
Nonlinearity	40 ppm	40
CMRR error	120 dB, 1 ppm \times 5 V	50
1/f noise	280 nV	2.8
Total unadjusted error		2145
Resolution		42.8

Easy to use

Gain set with one external resistor

(Gain range 1 to 10,000)

Wide power supply range (± 2.3 V to ± 18 V)

Higher performance than 3 op amp IA designs

Available in 8-lead DIP and SOIC packaging

Low power, 1.3 mA max supply current

Excellent dc performance (B grade)

50 μ V max, input offset voltage

0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, input offset drift

1.0 nA max, input bias current

100 dB min common-mode rejection ratio (G = 10)

Low noise

9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz, input voltage noise

0.28 μ V p-p noise (0.1 Hz to 10 Hz)

Excellent ac specifications

120 kHz bandwidth (G = 100)

15 μ s settling time to 0.01%