

RANGKAIAN ELEKTRONIKA II

Penguat Operasional



Mifta Nur Farid, S.T., M.T.
miftanurfarid@lecturer.itk.ac.id

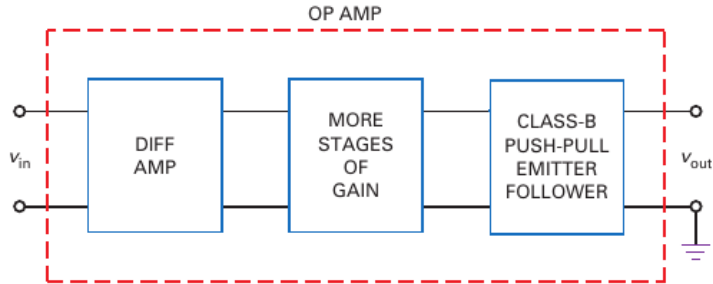
Teknik Elektro
Institut Teknologi Kalimantan
Balikpapan, Indonesia

Maret 8, 2021

Mahasiswa mampu menganalisis rangkaian penguat operasional (C4, P3, A3)

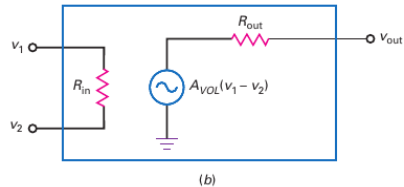
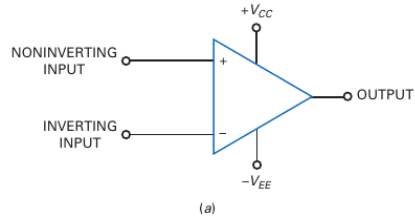
Bahan Kajian

1. Konsep dasar penguat operasional;
2. Inverting amplifier;
3. Noninverting amplifier;
4. The Summing Amplifier;
5. Voltage Follower.



Gambar. 1: Blok diagram sebuah op amp

Pengantar



Gambar. 2: (a) Simbol dari op amp dan (b) rangkaian ekivalen dari op amp

| Summary Table 16-1 | | Typical Op-Amp Characteristics | | |
|-----------------------------|----------------|--------------------------------|--------------|---------------------------|
| Quantity | Symbol | Ideal | LM741C | LF157A |
| Open-loop voltage gain | A_{VOL} | Infinite | 100,000 | 200,000 |
| Unity-gain frequency | f_{unity} | Infinite | 1 MHz | 20 MHz |
| Input resistance | R_{in} | Infinite | 2 M Ω | 10 ¹² Ω |
| Output resistance | R_{out} | Zero | 75 Ω | 100 Ω |
| Input bias current | $I_{in(bias)}$ | Zero | 80 nA | 30 pA |
| Input offset current | $I_{in(off)}$ | Zero | 20 nA | 3 pA |
| Input offset voltage | $V_{in(off)}$ | Zero | 2 mV | 1 mV |
| Common-mode rejection ratio | CMRR | Infinite | 90 dB | 100 dB |

Gambar. 3: Perbandingan karakteristik op amp ideal dan op amp standar

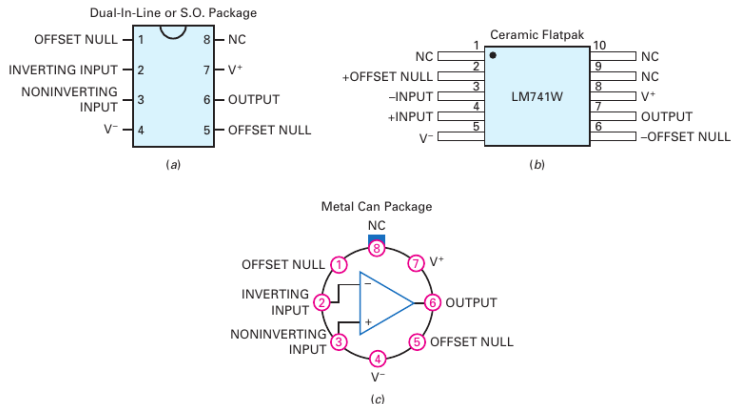
Op Amp 741

- Monolithic amp $\mu A709$ tahun 1965 oleh Fairchild Semiconductor
- $\mu A709$ memiliki kekurangan \rightarrow dibuatlah $\mu A741$
- Banyak manufaktur yang membuat $\mu A741$:
 - ON Semiconductor: MC1741
 - Texas Instruments: LM741
 - Analog Devices: AD741.
- Istilah umumnya op amp 741

Standar Industri

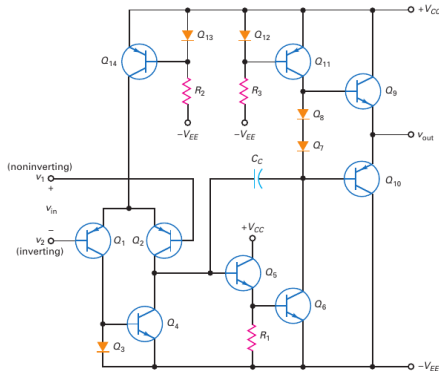
- Beberapa versi: 741, 741A, 741C, 741E, dan 741N
- Bergantung pada karakteristiknya (voltage gain, temp. range, noise level, dll)
- 741C (C = *Commercial grade*) → sedikit lebih murah dan paling banyak digunakan
- $A_{VOL} = 100000$, $z_{in} = 2 \text{ M}\Omega$, $z_{out} = 75 \Omega$

Standar Industri



Gambar. 4: Op amp 741 pinouts (a) dual-in-line, (b) ceramic flatpak, (c) metal can

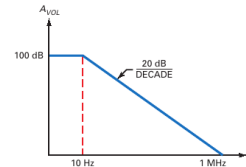
Rangkaian Ekuivalen dari Op Amp 741



Gambar. 5: Rangkaian ekuivalen dari op amp 741

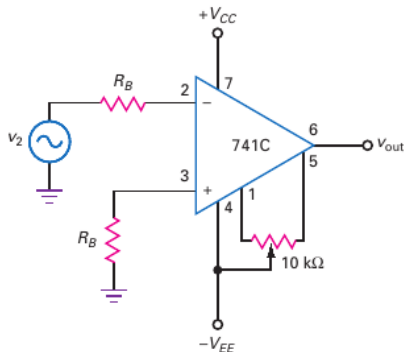
- Input diff amp
- Final Stage
- Active Loading
- Frequency Compensation

$$C_{in(M)} = (A_v + 1)C_c$$



Gambar. 6: Bode plot A_{VOL} 741C ideal

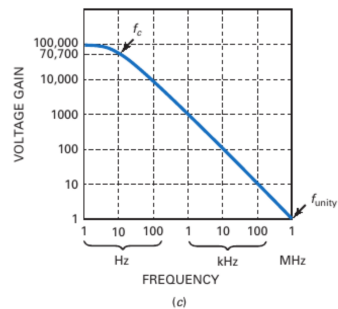
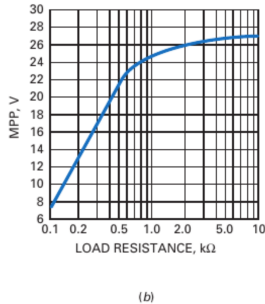
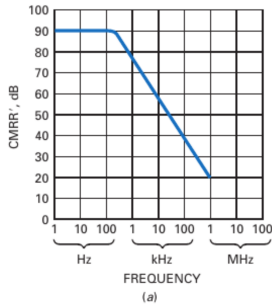
Bias & Offset



- Tidak ada input signal \rightarrow input bias dan offset \rightarrow error output
- Error output berkurang \leftarrow base resistor yang sama \rightarrow hanya menghilangkan arus bias tapi tidak arus offset dan tegangan offset
- Solusi: menggunakan rangkaian nulling di datasheet

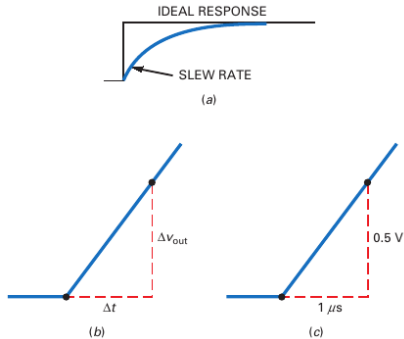
Gambar. 7: Penggunaan compensation dan nulling 741C

CMRR, MPP, dan A_{VOL}



Gambar. 8: Grafik (a) Common-Mode Rejection Ratio (CMRR), (b) Maximum Peak-to-Peak Output (MPP), dan (c) Open-Loop Voltage Gain A_{VOL} dari 741C

Slew Rate



Gambar. 9: (a) Respon ideal dan aktual terhadap tegangan step input, (b) ilustrasi definisi slew rate, (c) $S_R = 0.5 \text{ V}/\mu s$

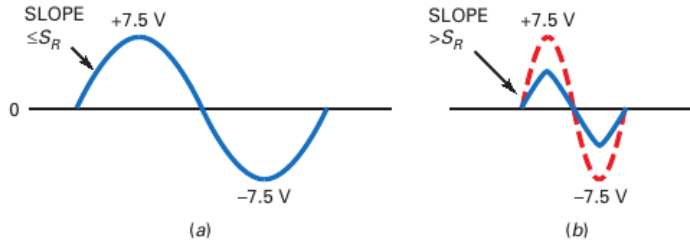
- Persamaan slew rate, S_R

$$S_R = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} \quad (1)$$

- Exponential wave meningkat 0.5 V selama 1 mikrodetik pertama:

$$\begin{aligned} S_R &= \frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} \\ &= \frac{0.5 \text{ V}}{1 \mu s} \\ &= 0.5 \text{ V}/\mu s \end{aligned}$$

Slew Rate



Gambar. 10: (a) Initial slope dari gelombang sinus, (b) distorsi terjadi jika initial slope melebihi slew rate

Slew Rate

- Sinyal dan frekuensinya sangat kecil \rightarrow slew rate bukan masalah
- Sinyal dan frekuensinya sangat besar \rightarrow slew rate akan mendistorsi sinyal output

$$S_S = 2\pi f V_p$$

- S_S : initial slope dari gelombang sinus, f : frekuensi, V_p : nilai peak

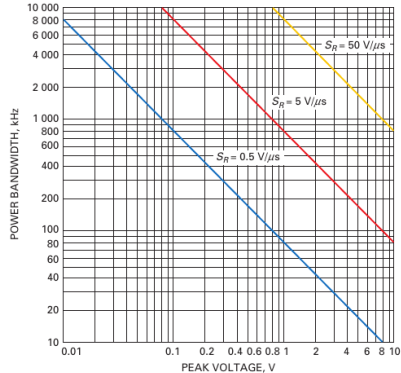
$$S_S \leq S_R$$

$$2\pi f V_p \leq S_R$$

$$f \leq \frac{S_R}{2\pi V_p}$$

$$f_{max} = \frac{S_R}{2\pi V_p} \quad (2)$$

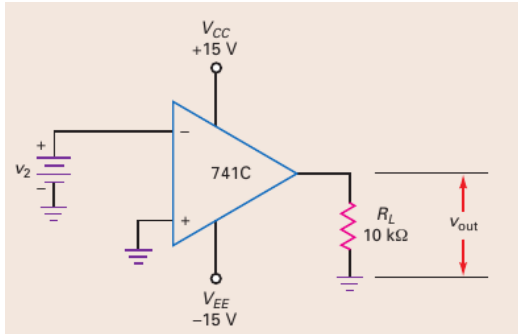
Slew Rate



- f_{max} : power bandwidth atau large-signal bandwidth
- $S_R = 0.5 \text{ V}/\mu\text{s} \rightarrow 741\text{C}$
- $S_R = 50 \text{ V}/\mu\text{s} \rightarrow \text{LM318}$

Gambar. 11: Grafik power bandwidth vs. peak voltage

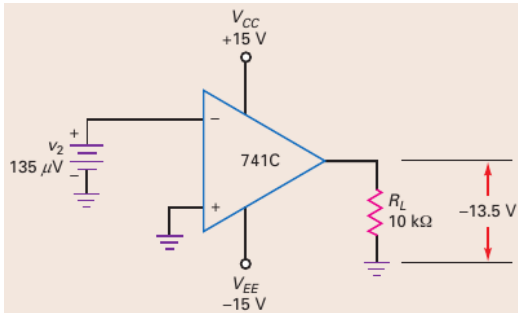
Contoh Soal 2.1



■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan inverting input yang dibutuhkan untuk men-drive op amp 741C hingga saturasi negatif?

Contoh Soal 2.1

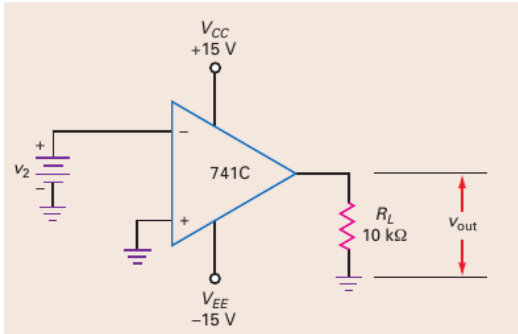


■ Jawaban:

- Berdasarkan Gambar 8 (b),
MPP = 27 V untuk $R_L = k\Omega$
- Sehingga tegangan output negatif saturasinya = - 13.5 V
- Karena $A_{VOL} = 100000$, maka tegangan input yang dibutuhkan:

$$\begin{aligned}
 v_2 &= \frac{v_{out}}{A_{VOL}} \\
 &= \frac{13.5 \text{ V}}{100000} = 135 \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Latihan Soal 2.1



■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan inverting input yang dibutuhkan untuk men-drive op amp 741C hingga saturasi negatif jika $A_{VOL} = 200000$?

Contoh Soal 2.2

■ Pertanyaan:

- Berapa common-mode rejection ratio (CMRR) dari 741C ketika frekuensi input-nya adalah 100 kHz?

■ Jawaban:

- Berdasarkan Gambar 8 (a), $\text{CMRR}_{\text{dB}} \approx 40 \text{ dB}$

$$\text{CMRR} = 10^{(\text{CMRR}_{\text{dB}}/20)} = 10^{(40 \text{ dB}/20)} = 100$$

Latihan Soal 2.2

■ Pertanyaan:

- Berapa common-mode rejection ratio (CMRR) dari 741C ketika frekuensi input-nya adalah 10 kHz?

Contoh Soal 2.3

■ Pertanyaan:

- Berapa open-loop voltage gain dari 741C jika frekuensi input-nya adalah 1 kHz ? 10 kHz ? 100 kHz ?

■ Jawaban:

- Berdasarkan Gambar 8 (c), voltage gain-nya adalah 1000 untuk 1 kHz, 100 untuk 10 kHz, dan 10 untuk 100 kHz.

Contoh Soal 2.4

■ Pertanyaan:

- Tegangan input ke op amp adalah tegangan fungsi step. Output-nya adalah sebuah waveform eksponensial yang berubah ke 0.25 V dalam 0.1 μ s. Berapa slew rate dari op amp tersebut?

■ Jawaban:

- Berdasarkan Persamaan 1

$$S_R = \frac{\Delta v_{out}}{\Delta t} = \frac{0.25 \text{ V}}{0.1 \mu\text{s}} = 2.5 \text{ V}/\mu\text{s}$$

Latihan Soal 2.4

- Pertanyaan:
 - Tegangan input ke op amp adalah tegangan fungsi step. Output-nya adalah sebuah waveform eksponensial yang berubah ke 0.8 V dalam $0.2 \mu\text{s}$. Berapa slew rate dari op amp tersebut?

Contoh Soal 2.5

■ Pertanyaan:

- Op amp LF411A dengan slew rate $15 \text{ V}/\mu\text{s}$. Berapa power bandwidth dari tegangan peak output 10 V ?

■ Jawaban:

- Berdasarkan Persamaan 2

$$f_{max} = \frac{S_R}{2\pi V_p} = \frac{15 \text{ V}/\mu\text{s}}{2\pi(10 \text{ V})} = 239 \text{ kHz}$$

Latihan Soal 2.5

■ Pertanyaan:

- Op amp LF411A dengan slew rate $15 \text{ V}/\mu\text{s}$. Berapa power bandwidth dari tegangan peak output 200 mV ?

Contoh Soal 2.6

■ Pertanyaan:

- Berapa power bandwidth dari:
 - $S_R = 0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$ dan $V_p = 8 \text{ V}$
 - $S_R = 5 \text{ V}/\mu\text{s}$ dan $V_p = 8 \text{ V}$
 - $S_R = 50 \text{ V}/\mu\text{s}$ dan $V_p = 8 \text{ V}$

■ Jawaban:

- Berdasarkan Gambar 11
 - $f_{max} = 10 \text{ kHz}$
 - $f_{max} = 100 \text{ kHz}$
 - $f_{max} = 1 \text{ MHz}$

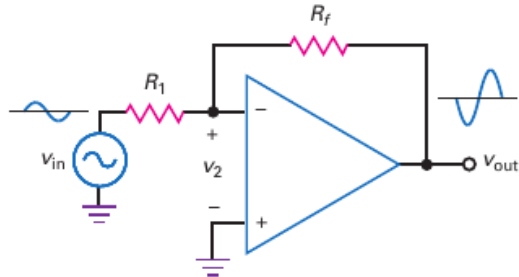
Latihan Soal 2.6

- Pertanyaan:
 - Berapa power bandwidth dari:
 - $S_R = 0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$ dan $V_p = 1 \text{ V}$
 - $S_R = 5 \text{ V}/\mu\text{s}$ dan $V_p = 1 \text{ V}$
 - $S_R = 50 \text{ V}/\mu\text{s}$ dan $V_p = 1 \text{ V}$

Pengantar Inverting Amplifier

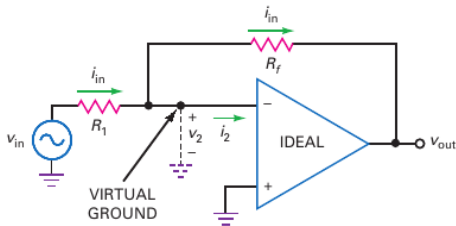
- Inverting amplifier: rangkaian op amp paling dasar
- Menggunakan negative feedback untuk menstabilkan keseluruhan voltage gain
- Keseluruhan voltage gain perlu distabilkan karena A_{VOL} sangat besar dan tidak stabil
- 741C memiliki A_{VOL} minimum sebesar 20000 dan A_{VOL} maksimum lebih dari 200000

Inverting Negative Feedback



Gambar. 12: Inverting amplifier

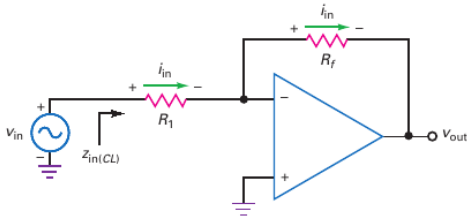
Virtual Ground



Gambar. 13: Konsep virtual ground

- Analisis inverting amplifier lebih mudah
- Berdasarkan op amp ideal:
 - $R_{in} = \infty \rightarrow i_2 = 0$
 - $A_{VOL} = \infty \rightarrow v_2 = 0 \rightarrow$
- Karena $i_2 = 0$ maka $i_{R_f} = i_{in}$

Voltage Gain & Impedansi Input



Gambar. 14: Inverting amplifier memiliki arus yang sama yang melewati kedua resistor

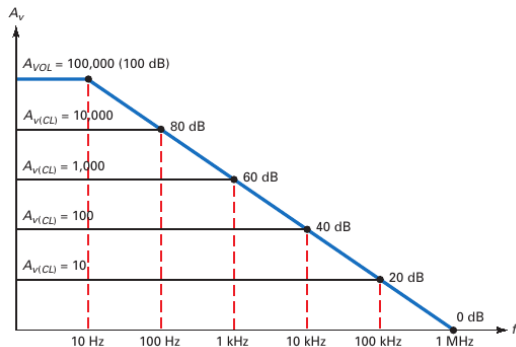
- Tegangan input: $v_{in} = i_{in}R_1$
- Tegangan output: $v_{out} = -i_{in}R_f$
- Penguatan tegangan closed-loop:

$$A_{v(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} \quad (3)$$

- Impedansi input:

$$z_{in(CL)} = R_1 \quad (4)$$

Bandwidth



- Closed-loop bandwidth:

$$f_{2(CL)} = \frac{f_{unity}}{dA_{v(CL)}} \quad (5)$$

- Gain-band-width product (GBW):

$$f_{unity} = A_{v(CL)} f_{2(CL)} \quad (6)$$

Gambar. 15: Voltage gain yang lebih kecil menghasilkan bandwidth yang lebih besar

Bias dan Offset

- Total error tegangan output:

$$V_{error} \cong \pm A_{v(CL)} (\pm V_{1err} \pm V_{2err} \pm V_{3err}) \quad (7)$$

- Error tegangan input:

$$V_{1err} = (R_{B1} - R_{(B2)}) I_{in(bias)} \quad (8)$$

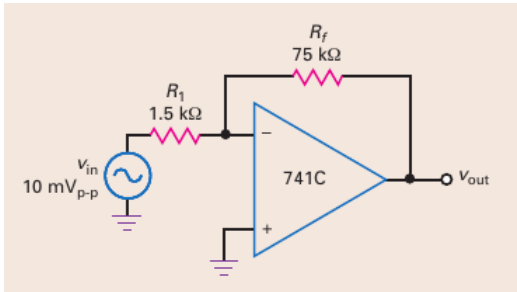
$$V_{2err} = (R_{B1} + R_{(B2)}) \frac{I_{in(off)}}{2} \quad (9)$$

$$V_{3err} = V_{in(off)} \quad (10)$$

- Resistor Thevenin

$$R_{B2} = R_1 \parallel R_f \quad (11)$$

Contoh Soal 2.7



■ Pertanyaan:

- Berapa penguatan tegangan closed-loop dan bandwidth?
- Berapa tegangan output di 1 kHz? dan di 1 MHz?

Non-inverting Amplifier

- Item

Aplikasi Op-Amp

- Item

TERIMA KASIH