

RANGKAIAN ELEKTRONIKA II

Penguat Operasional



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

Teknik Elektro
Institut Teknologi Kalimantan
Balikpapan, Indonesia

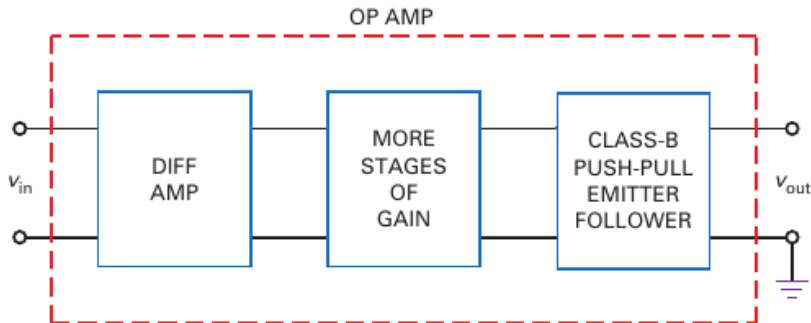
Maret 3, 2021

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.

Pengantar Op Amp



Gambar. 1: Blok diagram sebuah op amp

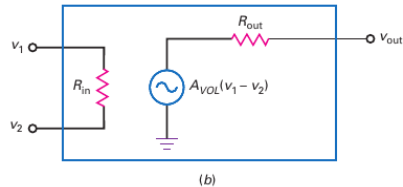
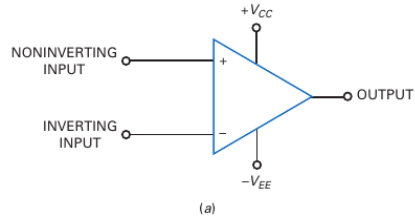
Pengantar Op Amp

- Gambar 1 adalah diagram blok dari sebuah op amp.
- Input stage-nya adalah diff amp, kemudian diikuti dengan lebih banyak tahapan-tahapan penguat dan sebuah Class-B push-pull emitter follower.
- Karena diff amp adalah tahapan pertamanya maka hal ini yang menentukan karakteristik input dari op amp.
- Sebagian besar op amp adalah single-ended output, seperti pada Gambar 1.
- Dengan supply positif dan negatif, single-ended output dirancang untuk memiliki nilai quiescent/ nilai diam sebesar nol.

Pengantar Op Amp

- Tidak semua op amp dirancang seperti Gambar 1.
- Beberapa op amp tidak menggunakan Class-B push-pull output, dan ada juga yang memiliki double-ended output.
- Op amp juga tidak sesederhana seperti pada Gambar 1.
- Rancangan internal dari monolithic op amp sangat rumit, menggunakan ribuan transistor sebagai current mirrors, active load, dan inovasi lainnya yang tidak mungkin di dalam rancangan diskret.
- Gambar 1 hanya menunjukkan 2 fitur penting yang umumnya digunakan di op amp, yaitu differential input dan single-ended output.

Pengantar Op Amp



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

Pengantar Op Amp

- Gambar 2a adalah simbol skematik dari sebuah op amp.
- Memiliki noninverting dan inverting input dan single-ended output.
- Idealnya, simbol ini menunjukkan amplifier memiliki voltage gain tak hingga, impedansi input tak hingga, dan nol impedansi output.
- Op amp ideal merepresentasikan voltage amplifier yang sempurna dan sering disebut sebagai voltage-controlled voltage source (VCVS).
- VCVS ditunjukkan oleh Gambar 2b, dimana R_{in} bernilai tak hingga dan R_{out} bernilai nol.

Pengantar 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

Pengantar Op Amp

- Tabel yang ditunjukkan oleh Gambar 3 adalah ringkasan dari karakteristik op amp ideal.
- Memiliki voltage gain, unity-gain frekuensi, input impedansi, dan CMRR yang bernilai tak hingga.
- Memiliki resistor output, arus bias, offset yang bernilai nol.
- Seperti itulah seharusnya manufaktur membuat op amp, jika mereka mampu.
- Namun kenyataannya mereka hanya mampu membuat yang mendekati nilai idealnya saja.

Pengantar Op Amp

- LM741C memiliki voltage gain sebesar 100000, unity-gain frekuensi sebesar 1 MHz, dan impedansi input sebesar $2\text{ M}\Omega$, dan seterusnya.
- Karena voltage gain yang sangat besar, input offset dapat dengan mudahnya memenuhi op amp.
- Sehingga diperlukan komponen eksternal antara input dan output op amp untuk menstabilkan voltage gain.
- Contohnya, menggunakan negative feedback untuk menyesuaikan voltage gain keseluruhan menjadi ke nilai yang lebih kecil sebagai ganti operasi linier yang stabil.

Pengantar Op Amp

- Ketika tidak ada jalur feedback yang digunakan, voltage gain bernilai maksimum yang disebut sebagai open-loop voltage gain, A_{VOL}
- Pada Gambar 3, A_{VOL} dari LM741C bernilai 100000.
- Meskipun bukan bernilai tak hingga, open-loop voltage gain ini sangat tinggi.
- Contohnya, sebuah input sekecil $10 \mu\text{V}$ akan menghasilkan output sebesar 1 V.
- Karena open-loop voltage gain sangat besar, kita dapat menggunakan heavy negative feedback untuk meningkatkan performa keseluruhan rangkaian.

Pengantar Op Amp

- 741C memiliki unity-gain frequency sebesar 1 MHz, artinya kita memperoleh voltage gain hingga 1 MHz.
- 741C memiliki input resistance sebesar $2\text{ M}\Omega$, output resistance sebesar $75\text{ }\Omega$, arus bias input sebesar 80 nA, arus offset input sebesar 20 nA, tegangan offset input sebesar 2 mV, dan CMRR sebesar 90 dB.
- Saat resistor yang lebih tinggi dibutuhkan, seorang designer dapat menggunakan op amp BIFET.
- JFET digunakan di input stage untuk mendapatkan input bias dan arus offset yang lebih kecil.
- Bipolar transistor digunakan pada stage selanjutnya untuk mendapatkan lebih banyak voltage gain.

Pengantar Op Amp

- LF571A adalah contoh dari op amp BIFET.
- Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3, arus bias inputnya hanya 30 pA dan input resistance adalah $10^{12} \Omega$.
- Memiliki voltage gain 200000 dan unity-gain frequency sebesar 20 MHz.
- Dengan menggunakan op amp ini kita bisa mendapatkan voltage gain hingga 20 MHz.

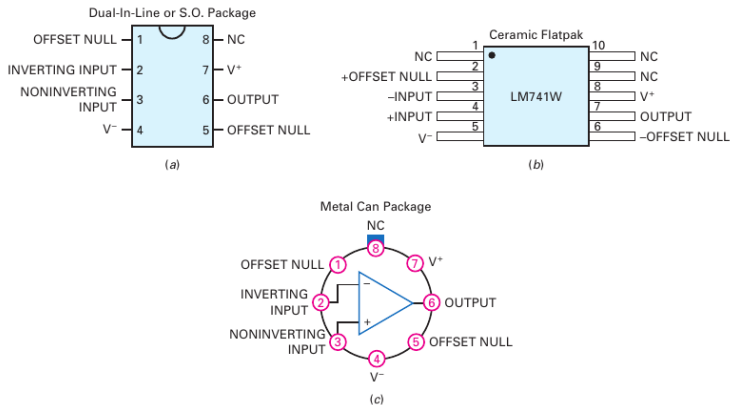
Pengantar Op Amp 741

- Monolithic amp $\mu A709$ dibuat tahun 1965 oleh Fairchild Semiconductor
- Meskipun tergolong sukses, generasi pertama op amp ini memiliki kekurangan maka dibuatlah $\mu A741$
- Karena harganya yang tidak mahal dan mudah digunakan, $\mu A741$ sangatlah sukses.
- Banyak manufaktur yang membuat $\mu A741$:
 - ON Semiconductor: MC1741
 - Texas Instruments: LM741
 - Analog Devices: AD741.
- Istilah umumnya op amp 741

Standar Industri

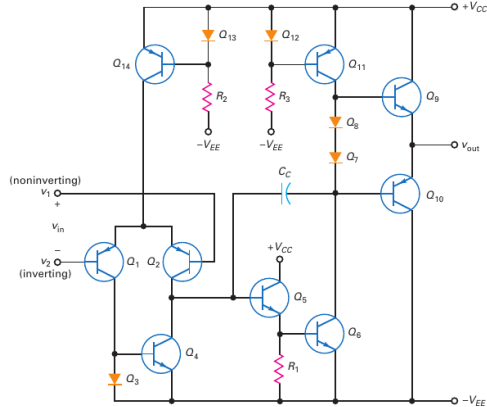
- Tipe 741 memiliki beberapa versi: 741, 741A, 741C, 741E, dan 741N
- Bergantung pada karakteristiknya (voltage gain, temp. range, noise level, dll)
- 741C (C = *Commercial grade*) → sedikit lebih murah dan paling banyak digunakan
- $A_{VOL} = 100000$, $z_{in} = 2 \text{ M}\Omega$, $z_{out} = 75 \Omega$
- Gambar 4 menunjukkan 3 package yang terkenal beserta pinoutnya

Standar Industri



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

Diagram skematik yang disederhanakan dari 741



Gambar. 5: Rangkaian ekivalen dari op amp 741

Input Diff Amp

- Gambar 5 adalah diagram skematik yang disederhanakan dari 741.
- Rangkaian ini merupakan ekivalen dari 741 dan op amp generasi-generasi selanjutnya.
- Tidak perlu memahami secara detail rangkaian tersebut, cukup pahami ide dasarnya saja.

Input Diff Amp

- Input stage yang digunakan adalah diff amp (Q_1 dan Q_2).
- Q_{14} adalah sumber arus yang menggantikan tail resistor.
- R_2 , Q_{13} , Q_{14} adalah current mirror yang menghasilkan tail current untuk Q_1 dan Q_2 .
- Daripada menggunakan resistor biasa sebagai resistor kolektor, 741 ini menggunakan active-load resistor.
- Active-load Q_4 bertindak sebagai seperti sumber arus dengan impedansi yang sangat tinggi.
- Akibatnya, voltage gain dari diff amp menjadi jauh lebih besar daripada menggunakan passive-load resistor.

Input Diff Amp

- Sinyal yang dikuatkan dari diff amp akan mendrive base dari Q_5 , sebuah emitter follower.
- Stage ini akan menaikkan level impedansi untuk menghindari loading down dari diff amp.
- Sinyal yang keluar dari Q_5 menuju ke Q_6 .
- Dioda Q_7 dan Q_8 adalah bagian dari bias untuk final stage.
- Q_{11} adalah active-load resistor untuk Q_6 , sehingga Q_6 dan Q_{11} seperti CE driver stage dengan voltage gain yang sangat besar.
- Simbol dioda digunakan ketika transistor memiliki base yang terhubung singkat dengan collector, seperti Q_3 .

Final Stage

- Sinyal yang dikuatkan yang keluar dari CE driver stage (Q_6) menuju ke final stage, yang merupakan Class-B push-pull emitter follower (Q_9 dan Q_{10}).
- Karena supply tegangan yang terbagi menjadi 2 (Positif V_{CC} dan negatif V_{EE}), quiescent output idealnya adalah 0 V ketika tegangan inputnya nol.
- Deviasi berapapun dari 0 V disebut tegangan error output (output error voltage).
- Jika $v_1 > v_2$, tegangan input v_{in} akan menghasilkan tegangan output v_{out} positif. Sebaliknya, jika $v_2 > v_1$, tegangan input v_{in} akan menghasilkan tegangan output v_{out} negatif.
- Idealnya, v_{out} bisa sama positifnya dengan $+V_{CC}$ dan sama negatifnya dengan $-V_{EE}$ sebelum clipping terjadi.
- Output swing normalnya dalam 1 hingga 2 V dari tiap tegangan supply karena tegangan drop di dalam 741.

Active Loading

- Pada Gambar 5, terdapat 2 active-loading (menggunakan transistor daripada resistor sebagai load atau bebannya).
- Pertama, ada active-load Q_4 di input diff.
- Kedua, ada active-load Q_{11} do CE driver stage.
- Karena sumber arus memiliki impedansi output yang besar, active-load menghasilkan voltage gain yang lebih besar daripada jika menggunakan resistor.
- Active-load ini umumnya menghasilkan voltage gain sebesar 100000 untuk 741C.
- Active-load sangat populer di dalam IC karena lebih mudah dan lebih murah untuk membuat transistor di dalam chip daripada membuat resistor.

Frequency Compensation

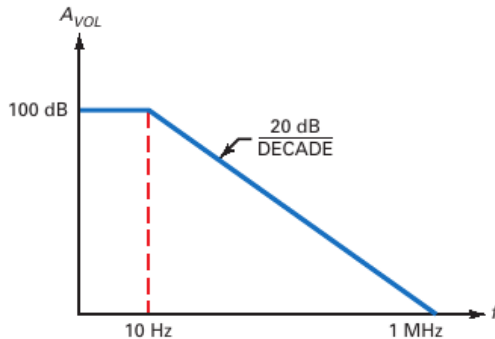
- Pada Gambar 5, C_c adalah compensating capacitor.
- Karena efek Miller, kapasitor kecil ini (umumnya 30 pF) dikalikan dengan voltage gain dari Q_5 dan Q_6 untuk mendapatkan kapasitansi ekuivalen yang lebih besar yaitu

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

di mana A_v adalah voltage gain dari stage Q_5 dan Q_6 .

- Resistansi yang berhadapan dengan kapasitansi Miller adalah impedansi output dari diff amp sehingga kita memiliki rangkaian lag.
- Rangkaian lag menghasilkan cut off frequency 10 Hz di 741C.
- Open-loop gain dari op amp adalah di bawah 3 dB di cut off frequency ini.
- Kemudian, A_{VOL} menurun sekitar 20 dB/decade hingga mencapai unity-gain frequency.

Frequency Compensation



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

Frequency Compensation

- Gambar 6 menunjukkan Bode plot ideal dari open-loop voltage gain terhadap frequency.
- 741C memiliki open-loop voltage gain sebesar 100000, ekivalen dengan 100 dB.
- Karena open-loop cut off frequency adalah 10 Hz, voltage gain akan berhenti di 10 Hz dan turun sebesar 20 dB/decade hingga 0 dB di 1 MHz.

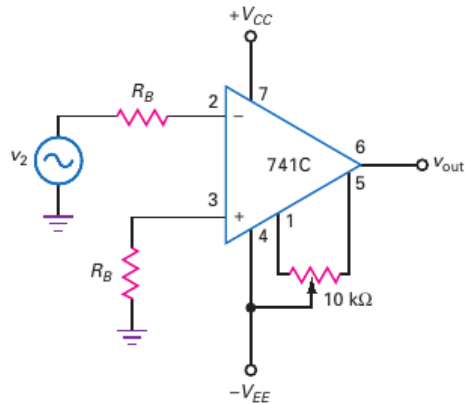
Bias & Offset

- Telah dijelaskan sebelumnya bahwa diff amp memiliki input bias dan offset yang menghasilkan error output ketika tidak ada input sinyal.
- Dalam beberapa aplikasi, output error adalah cukup kecil untuk diabaikan.
- Tapi ketika output error tidak bisa diabaikan, designer dapat mereduksinya dengan menggunakan base resistor yang bernilai sama.
- Cara ini dapat menghilangkan permasalahan dari arus bias tapi tidak untuk arus offset dan tegangan offset.

Bias & Offset

- Sehingga cara terbaik untuk menghilangkan error output adalah dengan menggunakan nulling circuit yang diberikan di datasheet.
- Nulling circuit dapat menghilangkan output error dan meminimalkan thermal drift, perubahan yang pelan di tegangan output yang disebabkan oleh perubahan temperatur pada parameter op amp.
- Terkadang datasheet tidak menyertakan nulling circuit, sehingga kita berikan tegangan input yang kecil untuk me-null-kan output.

Bias & Offset



Gambar. 7: Penggunaan compensation dan nulling 741C

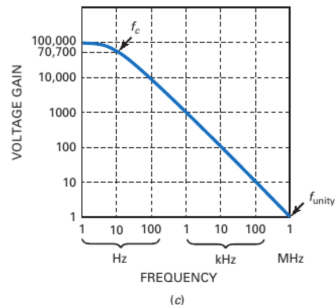
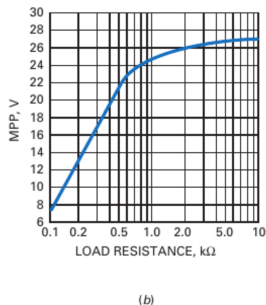
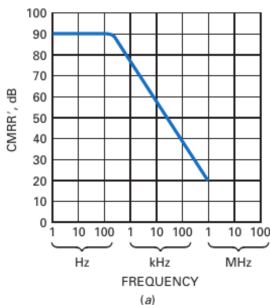
Bias & Offset

- Gambar 7 menunjukkan metode nulling yang disarankan oleh datasheet 741C.
- Sumber AC men-drive inverting input yang memiliki resistansi Thevenin R_B .
- Untuk menetralkan efek dari arus bias input (80 nA) yang mengalir melalui resistor ini, resistor diskret yang bernilai sama ditambahkan ke noninverting input seperti di gambar tersebut.

Bias & Offset

- Untuk menghilangkan efek dari arus offset input 20 nA dan tegangan offset input 2 mV, datasheet 741C merekomendasikan untuk menggunakan 10 k Ω potentiometer antara pin 1 dan pin 5.
- Dengan meng-adjust potentiometer ini dengan tanpa sinyal input, kita dapat membuat tegangan output menjadi nol.

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

Common-Mode Rejection Ratio

- Untuk 741C, CMRRnya adalah 90 dB di frekuensi rendah.
- Jika diberikan 2 sinyal yang sama, sinyal yang diinginkan dan yang tidak, sinyal yang diinginkan akan bernilai 90 dB lebih besar di output daripada common-mode signal-nya.
- Atau sinyal yang diinginkan 30000 kali lebih besar daripada common-mode signal.
- Pada frekuensi tinggi, efek reaktif menurunkan CMRR seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 8a.

Maximum Peak-to-Peak Output

- Nilai MPP dari amplifier adalah output peak-to-peak maksimum yang amplifier dapat hasilkan tanpa clipping.
- Karena quiescent output dari op amp idealnya bernilai nol, tegangan output ac dapat berayun secara positif atau negatif.
- Untuk resistansi beban yang lebih besar daripada R_{out} , tegangan output dapat berayun hampir ke tegangan supply.
- Contoh, jika $V_{CC} = +15\text{ V}$ dan $V_{EE} = -15\text{ V}$, nilai MPP dengan resistansi beban sebesar $10\text{ k}\Omega$ idealnya adalah 30 V .

Maximum Peak-to-Peak Output

- Dengan op amp yang tidak ideal, output tidak dapat berayun ke tegangan supply karena ada tegangan drop yang kecil di final stage op amp.
- Ketika resistansi beban tidak besar dibandingkan dengan R_{out} , beberapa tegangan yang dikuatkan akan drop di R_{out} , artinya tegangan output final lebih kecil.
- Gambar 8b menunjukkan MPP vs resistansi beban untuk 741C dengan tegangan supply +15 V dan -15 V
- Perhatikan bahwa MPP sekitar 27 V untuk R_L 10 k Ω .
- Artinya, output saturasi secara positif +13.5 V dan secara negatif -13.5 V.
- Ketika resistansi beban menurun, MPP juga menurun.
- Contohnya, jika resistansi beban 275 Ω , MPP menurun hingga 16 V, yang artinya output saturasi secara positif +8 V dan secara negatif -8 V.

Short-Circuit Current

- Di beberapa aplikasi, op amp mungkin men-drive resistansi beban sekitar nol.
- Pada kasus seperti ini, kita perlu mengetahui nilai dari short-circuit output current.
- Datasheet dari 741C menyatakan short-circuit output current sebesar 25 mA.
- Ini adalah arus output maksimum yang op amp hasilkan.
- Jika kita menggunakan resistor beban yang lebih kecil (kurang dari $75\ \Omega$), jangan harap untuk mendapatkan tegangan output yang besar karena tegangannya tidak akan lebih besar daripada 25 mA dikali dengan resistansi beban tadi.

Frequency Response

- Gambar 8c menunjukkan respon frekuensi dari sinyal yang kecil dari 741C.
- Pada frekuensi tengah, voltage gain sebesar 100000. 741C memiliki cutoff frequency f_c di 10 Hz.
- Seperti yang ditampilkan, voltage gain sebesar 70700 (menurun 3 dB) di 10 Hz.
- Di atas cutoff frequency, voltage gain akan menurun sebesar 20 dB/decade.

Frequency Response

- Unity-gain frequency adalah frekuensi dimana voltage gain bernilai 1.
- Pada Gambar 8c, f_{unity} adalah 1 MHz.
- Datasheet biasanya menspesifikkan nilai dari f_{unity} karena ini merepresentasikan batas atas pada gain yang dapat digunakan di op amp.
- Contoh, datasheet 741C menyatakan f_{unity} sebesar 1 MHz. Artinya 741C dapat menguatkan sinyal hingga 1 MHz.
- Di atas 1 MHz, voltage gain kurang dari 1 dan 741C tidak berguna.
- Jika menginginkan f_{unity} yang lebih tinggi, gunakan LM318 yang memiliki f_{unity} 15 Hz.

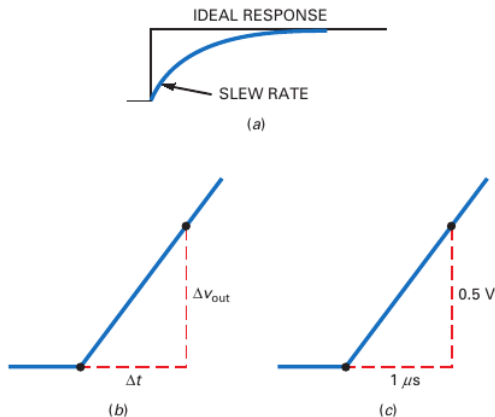
Slew Rate

- Compensating capacitor di dalam 741C memberikan fungsi yang sangat penting.
- Yaitu mencegah osilasi yang dapat menginterferensi sinyal yang diinginkan.
- Namun ada kekurangan, compensating capacitor perlu di-charge dan di-discharge.
- Hal ini membuat batasan pada seberapa cepat output op amp dapat berubah.

Slew Rate

- Tegangan input ke op amp adalah tegangan step positif, transisi tegangan yang mendadak dari satu level dc ke level dc yang lebih tinggi.
- Jika op amp nya sempurna, maka kita memperoleh respons ideal seperti pada Gambar 9a.
- Namun, output yang terjadi adalah sinyal eksponensial positif.
- Hal ini terjadi karena compensating capacitor harus di-charge terlebih dahulu sebelum tegangan output dapat berubah ke level yang lebih tinggi.

Slew Rate



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

Slew Rate

- Initial slope dari bentuk sinyal eksponensial disebut slew rate, S_R .
- Persamaan slew rate, S_R .

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

- Gambar 9b mengilustrasikan makna dari slew rate.
- Initial slope = perubahan vertikal dibagi dengan perubahan horizontal di antara 2 titik di bagian awal gelombang eksponensial.
- Exponential wave meningkat 0.5 V selama 1 mikrodetik pertama, maka

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

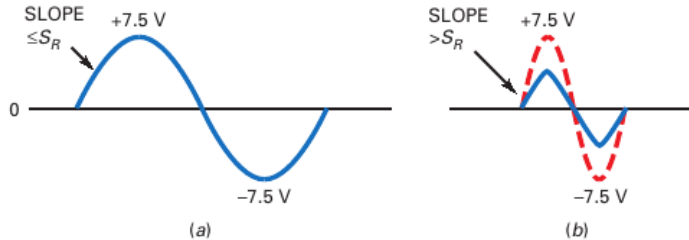
Slew Rate

- Slew rate merepresentasikan respon tercepat yang dimiliki oleh op amp.
- Contoh, slew rate dari 741C adalah $0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$.
- Artinya adalah output dari 741C dapat berubah tidak lebih cepat dari 0.5 V dalam 1 mikrodetik.
- Dengan kata lain, jika 741C di-drive oleh tegangan input step, maka kita tidak mendapatkan tegangan output step tapi kita mendapatkan gelombang output eksponensial.

Slew Rate

- Slew rate dapat dibatasi dengan sinyal sinusoidal.
- Gambar 10a, op amp dapat menghasilkan gelombang sinus output hanya jika initial slope dari gelombang sinus kurang dari slew rate.
- Contoh, jika gelombang sinus output memiliki initial slope $0.1 \text{ V}/\mu\text{s}$, 741C dapat menghasilkan gelombang sinus tanpa masalah sama sekali karena slew rate 741C adalah $0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$.
- Di lain sisi, jika gelombang sinus memiliki initial slope $0.1 \text{ V}/\mu\text{s}$, output lebih kecil dari pada initial slope gelombang sinus maka output akan terlihat triangular daripada sinusoidal seperti yang ditambihkan pada Gambar 10b.

Slew Rate



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

Slew Rate

- Datasheet op amp selalu menentukan slew rate karena nilai ini membatasi respon sinyal yang besar dari op amp.
- Jika gelombang sinus output sangat kecil atau frekuensinya sangat kecil maka slew rate bukan masalah.
- Namun jika sinyal output besar dan frekuensinya sangat besar maka slew rate akan mendistorsi sinyal output

Slew Rate

- Kita akan turunkan persamaan berikut ini:

$$S_S = 2\pi fV_p$$

- S_S : initial slope dari gelombang sinus, f : frekuensi, V_p : nilai peak.
- Untuk menghindari slew-rate distortion dari gelombang sinus, S_S harus lebih kecil atau sama dengan S_R , maka

$$\begin{aligned} S_S &\leq S_R \\ 2\pi fV_p &\leq S_R \\ f &\leq \frac{S_R}{2\pi V_p} \end{aligned}$$

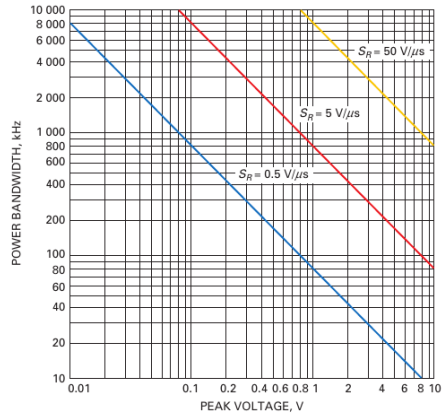
Slew Rate

- Sehingga

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

- f_{max} adalah frekuensi tertinggi yang dapat dikuatkan tanpa slew-rate distortion.
- f_{max} disebut juga power bandwidth.
- Gambar 11 menunjukkan grafik dari tiga slew rate. $S_R = 0.5 \text{ V}/\mu\text{S}$ untuk 741C dan

Slew Rate

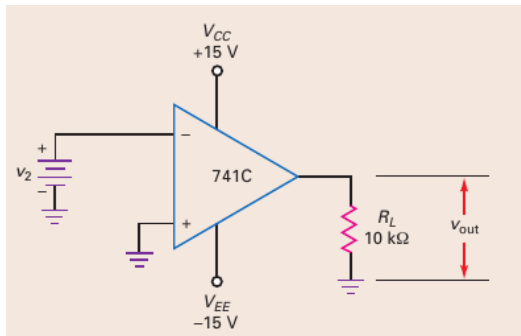


Gambar. 11: Grafik power bandwidth vs. peak voltage

Slew Rate

- Misalkan kita menggunakan 741C.
- Agar kita bisa mendapatkan tegangan peaaak output sebesar 8 V tanpa distorsi, frekuensi tidak boleh lebih besar daripada 10 kHz.
- Untuk meningkatkan f_{max} , kecilkan tegangan output.
- Misalkan, tegangan peak output 1 V maka f_{max} meningkat menjadi 80 kHz.

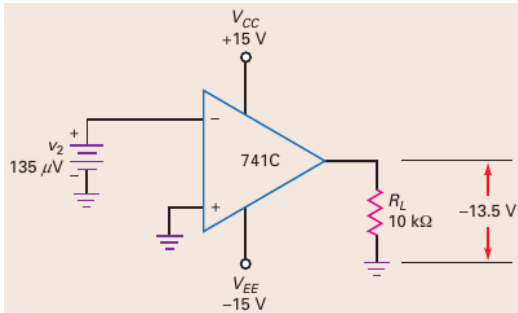
Contoh Soal 2.1



■ Pertanyaan:

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

Contoh Soal 2.1

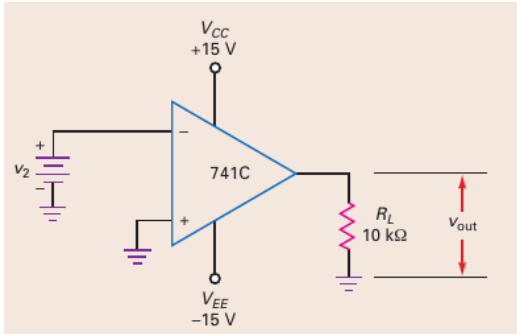


■ Jawaban:

- 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), $\text{CMRR}_{\text{dB}} \approx 40 \text{ dB}$ di 100 kHz.

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

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

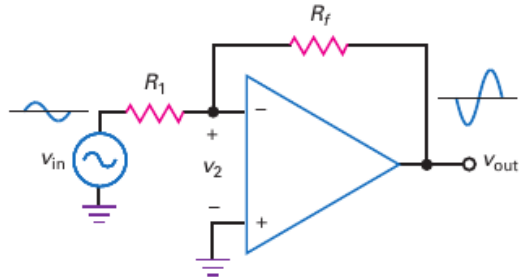
Latihan Soal 2.6

- 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 untuk digunakan tanpa feedback.
- Contohnya, 741C memiliki A_{VOL} minimum sebesar 20.000 dan A_{VOL} maksimum lebih dari 200.000.
- Voltage gain yang tidak dapat diprediksi dari magnitude dan variasi ini tidak berguna tanpa feedback.

Inverting Negative Feedback



Gambar. 12: Inverting amplifier

Inverting Negative Feedback

- Gambar 12 menunjukkan sebuah inverting amplifier.
- Tegangan power-supply tidak ditampilkan agar gambar lebih sederhana.
- Tegangan input v_{in} men-drive inverting input melalui resistor R_1 .
- Menghasilkan tegangan inverting output v_2 .
- Tegangan input dikuatkan oleh open-loop voltage gain untuk menghasilkan tegangan inverted output.
- Tegangan output diumpanbalik ke input melalui resistor feedback R_f .
- Menghasilkan negative feedback karena output memiliki beda fasa sebesar 180° dengan input.
- Dengan kata lain, setiap perubahan di v_2 yang dihasilkan oleh tegangan input berkebalikan dengan sinyal output.

Inverting Negative Feedback

- Bagaimana negative feedback dapat menstabilkan overall voltage gain?
- Jika open-loop voltage gain A_{VOL} meningkat dengan alasan apa pun, tegangan output akan meningkat dan memberikan tegangan feedback yang lebih banyak ke inverting input.
- Tegangan feedback yang berkebalikan ini akan mereduksi tegangan v_2 .
- Karena itu, meskipun A_{VOL} meningkat, v_2 menurun, dan output akhir meningkat jauh lebih sedikit daripada tanpa negative feedback.

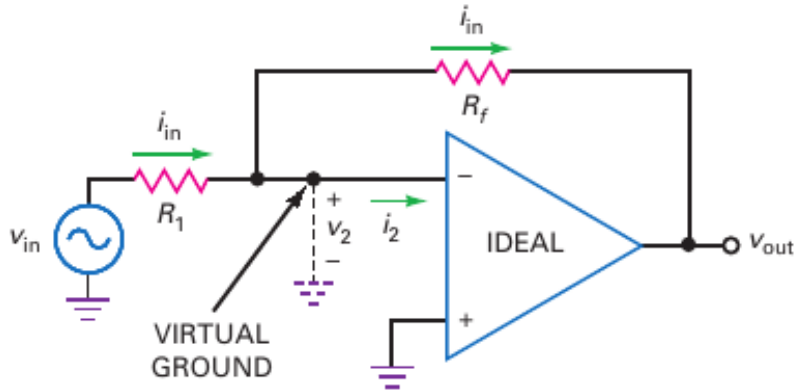
Virtual Ground

- Jika kita menghubungkan kabel antara suatu titik di dalam rangkaian ke ground, tegangan pada titik tersebut menjadi nol.
- Kabel tersebut memberikan jalur untuk arus mengalir ke ground.
- Mechanical ground (kabel yang menghubungkan titik ke ground) adalah ground untuk tegangan dan arus.
- Lain halnya dengan Virtual Ground, salah satu jenis ground yang digunakan untuk menganalisis inverting amplifier dengan lebih mudah.

Virtual Ground

- Konsep dari virtual ground berdasarkan op amp ideal.
- Op amp ideal memiliki open-loop voltage gain yang tak berhingga dan resistansi input tak berhingga.
- Karenanya, kita dapat menyimpulkan sebagai berikut (Gambar 13):
 - Karena I_{in} adalah tak berhingga maka i_2 adalah nol.
 - Karena A_{VOL} adalah tak berhingga, maka v_2 adalah nol.

Virtual Ground



Gambar. 13: Konsep virtual ground

Virtual Ground

- Karena $i_2 = 0$, arus yang melalui R_f pasti sama dengan arus input yang melalui R_1 .
- Karena $v_2 = 0$, virtual ground yang ditunjukkan pada Gambar 13 menunjukkan bahwa inverting input bertindak seperti ground untuk tegangan dan open untuk arus.

Voltage Gain

- Gambar 14 menunjukkan virtual ground pada inverting input.
- Sisi kanan dari R_1 adalah ground tegangan, maka dapat kita tulis:

$$v_{in} = i_{in}R_1$$

- Begitu juga sisi kiri dari R_f adalah ground tegangan, sehingga magnitude dari tegangan output adalah:

$$v_{out} = -i_{in}R_f$$

- Untuk mendapatkan voltage gain, maka v_{out} dibagi dengan v_{in} :

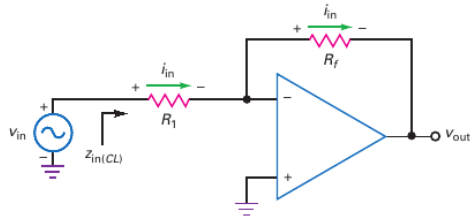
$$A_{v(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} \quad (3)$$

dimana $A_{v(CL)}$ adalah closed-loop voltage gain.

Voltage Gain

- Disebut closed-loop voltage gain karena merupakan tegangan ketika terdapat jalur feedback antara output dan input.
- Karena negative feedback, closed-loop voltage gain, $A_{v(CL)}$, selalu lebih kecil daripada open-loop voltage gain, A_{VOL} .
- Misalkan, jika $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ dan $R_f = 50 \text{ k}\Omega$, maka closed-loop voltage gain sebesar 50.
- Tanda negatif pada Persamaan 3 menunjukkan voltage gain memiliki beda fasa sebesar 180° .

Voltage Gain



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

Input Impedance

- Dalam beberapa hal, terkadang seorang engineer menginginkan impedansi input tertentu.
- Ini salah satu kelebihan dari inverting amplifier, mudah untuk mengatur impedansi input yang diinginkan.
- Karena sisi kanan dari R_1 adalah virtual ground, sehingga closed-loop input impedansinya adalah:

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

- Ini adalah impedansi input yang ada di sisi kiri dari R_1 seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 14.
- Misalkan, jika impedansi input sebesar $2 \text{ k}\Omega$ dan closed-loop voltage gain sebesar 50 yang dibutuhkan, maka engineer akan menggunakan $R_1 = 2 \text{ k}\Omega$ dan $R_f = 100 \text{ k}\Omega$.

Bandwidth

- Open-loop bandwidth atau frekuensi cut-off dari op amp sangat kecil.
- Disebabkan oleh internal compensating capacitor.
- Untuk 741C:

$$f_{2(OL)} = 10 \text{ Hz}$$

- Pada frekuensi ini, open-loop voltage gain akan berhenti dan turun dengan respon orde-1.

Bandwidth

- Ketika negative feedback digunakan, overall bandwidth akan meningkat.
- Karena, jika frekuensi input lebih besar daripada $f_2(OL)$, A_{VOL} menurun sebesar 20 dB/decade.
- Ketika v_{out} mencoba untuk turun, tegangan yang berkebalikan akan diumpan-balik ke inverting input.
- Sehingga, v_2 meningkat dan mengkompensasi penurunan A_{VOL} .
- Karena hal ini lah maka $A_{v(CL)}$ berhenti pada frekuensi yang lebih besar daripada $f_2(OL)$.
- Semakin besar negative feedback ($A_{v(CL)}$ lebih kecil) maka closed-loop bandwidth $f_2(CL)$ semakin besar.

Bandwidth

- Gambar ?? menunjukkan bagaimana closed-loop bandwidth meningkat dengan adanya negative feedback.
- Semakin besar negative feedback ($A_{v(CL)}$ lebih kecil), semakin besar closed-loop bandwidth $f_2(CL)$.

$$f_{2(CL)} = \frac{f_{unity}}{A_{v(CL)} + 1}$$

- Umumnya, $A_v(CL)$ lebih besar daripada 10, sehingga persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi

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

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

Bias dan Offset

- Negative feedback mengurangi error output yang disebabkan oleh arus bias input, arus offset input, dan tegangan offset input.
- Seperti yang telah didiskusikan pada bab sebelumnya, ketika tegangan error input dan persamaan tegangan error output total adalah:

$$V_{error} = A_{VOL}(V_{1err} + V_{2err} + V_{3err})$$

- Ketika negative feedback digunakan, persamaan di atas menjadi:

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

dimana V_{error} adalah tegangan error output total.

- Datasheet tidak menunjukkan tanda \pm karena hal ini dapat menunjukkan bahwa error bisa terjadi di kedua arah.

Bias dan Offset

- Error input sama seperti sebelumnya, yaitu:

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

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

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

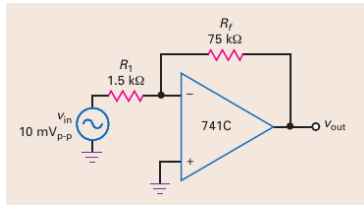
Bias dan Offset

- Saat $A_{v(CL)}$ kecil, error output total yang diberikan dari Persamaan 7 mungkin cukup kecil untuk diabaikan.
- Jika tidak, resistor compensation dan offset nulling menjadi perlu.
- Di dalam inverting amplifier, R_{B2} adalah resistor Thevenin.
- Resistor Thevenin:

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

- Jika perlu untuk mengkompensasi arus bias input, resistor R_{B1} yang bernilai sama dapat dihubungkan ke noninverting input.
- Resistor ini tidak berdampak pada teknik virtual ground karena tidak ada arus sinyal AC yang akan mengalir melaluinya.

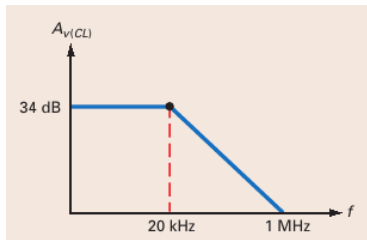
Contoh Soal 2.7



■ Pertanyaan:

- Berapa closed-loop voltage gain dan closed-loop bandwidth nya?
- Berapa tegangan output di 1 kHz? dan di 1 MHz?

Contoh Soal 2.7



■ Jawaban:

- Closed-loop voltage gain:

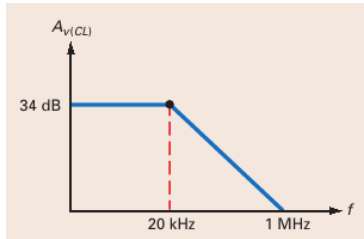
$$A_{v(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-75 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega} = -50$$

- Closed-loop bandwidth:

$$f_{2(CL)} = \frac{f_{unity}}{A_{v(CL)}} = \frac{1 \text{ MHz}}{50} = 20 \text{ kHz}$$

- Gambar di samping adalah ideal bode-plot dari closed-loop voltage gain, $A_{v(CL)}$.
- $A_{v(CL)} = 20 \times \log(50) = 34 \text{ dB}$

Contoh Soal 2.7



■ Jawaban:

- Tegangan output di 1 kHz:

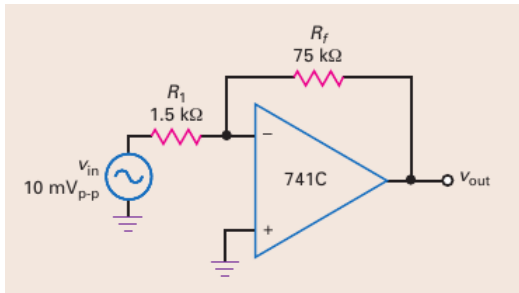
$$\begin{aligned} v_{out} &= (A_{v(CL)})(v_{in}) = (-50)(10 \text{ mVp-p}) \\ &= -500 \text{ mVp-p} \end{aligned}$$

- Tegangan output di 1 MHz. Karena 1 MHz adalah unity-gain frekuensinya, maka

$$v_{out} = -10 \text{ mVp-p}$$

- Tanda negatif menunjukkan phase-shift 180° antara input dan output

Latihan Soal 2.7

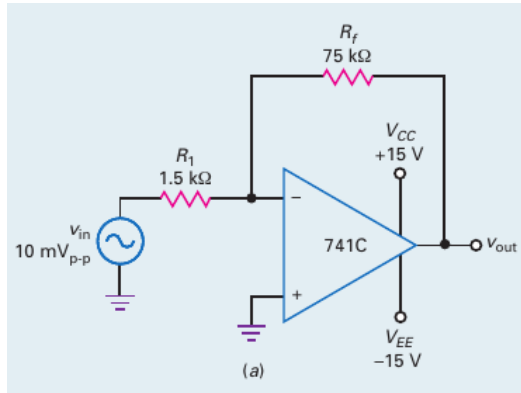


■ Pertanyaan:

- ☐ Berapa tegangan output di 100 kHz ?
- ☐ *Hint:* Gunakan Persamaan

$$A_v = \frac{A_{v(mid)}}{\sqrt{1 + (f/f_2)^2}}$$

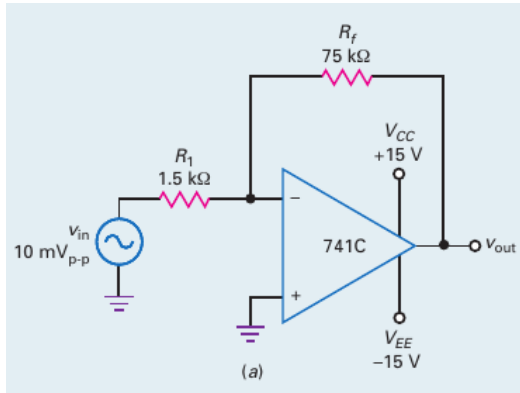
Contoh Soal 2.8



■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan output ketika $v_{in} = 0$?

Contoh Soal 2.8



■ Jawaban:

- Berdasarkan Tabel di Gambar 3, didapatkan:

$$I_{in(bias)} = 80 \text{ nA}$$

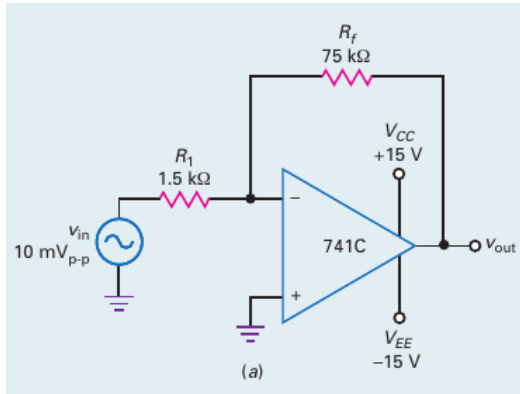
$$I_{in(off)} = 20 \text{ nA}$$

$$V_{in(off)} = 2 \text{ mV}$$

- Berdasarkan Persamaan 11:

$$\begin{aligned} R_{B2} &= R_1 \parallel R_f = 1.5 \text{ k}\Omega \parallel 75 \text{ k}\Omega \\ &= 1.47 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Contoh Soal 2.8



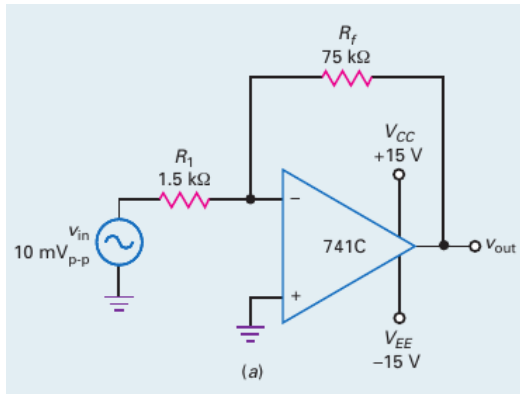
■ Jawaban:

- Karena menggunakan analisis virtual ground, maka R_{B1} tidak berpengaruh apa-apa.
- Sehingga ketiga tegangan error input:

$$\begin{aligned} V_{1err} &= (R_{B1} - R_{B2})I_{in(bias)} \\ &= (-1.47 \text{ k}\Omega)(80 \text{ nA}) \\ &= -0.118 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{2err} &= (R_{B1} + R_{B2})\frac{I_{in(off)}}{2} \\ &= (1.47 \text{ k}\Omega)(10 \text{ nA}) \\ &= 0.0147 \text{ mV} \end{aligned}$$

Contoh Soal 2.8



■ Jawaban:

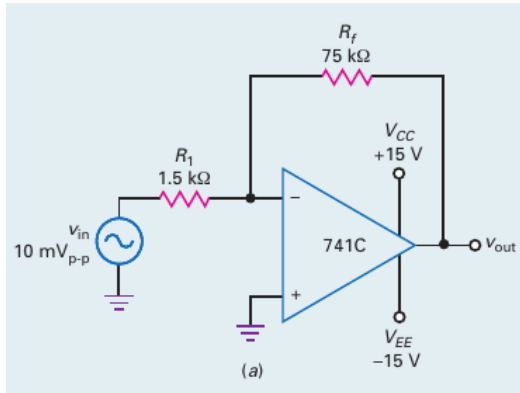
- Sehingga ketiga tegangan error input (lanjutan):

$$V_{3err} = V_{in(off)} = 2 \text{ mV}$$

- Closed-loop voltage gain:

$$A_{v(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-75 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega} = -50$$

Contoh Soal 2.8

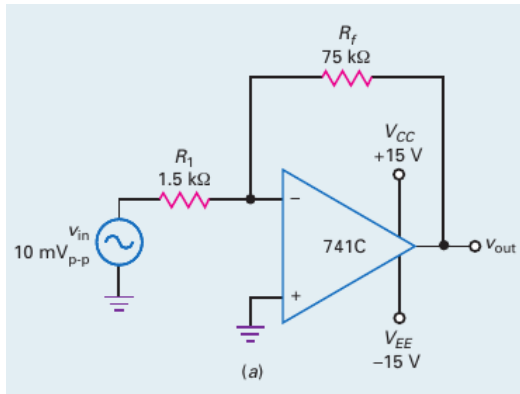


■ Jawaban:

□ Error tegangan output:

$$\begin{aligned}
 V_{error} &= \pm 50(V_{1err} + V_{2err} + V_{2err}) \\
 &= \pm 50(0.118\text{mV} + 0.0147\text{mV} + 2\text{mV}) \\
 &= \pm 107 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

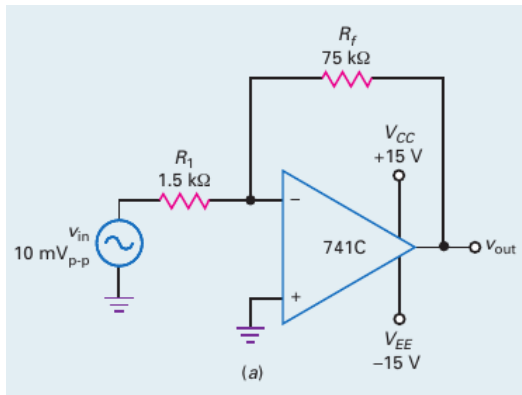
Latihan Soal 2.8



■ Pertanyaan:

- Jika op amp yang digunakan adalah LF157A, berapa tegangan output ketika $v_{in} = 0$?

Contoh Soal 2.9



■ Pertanyaan:

- Diketahui:

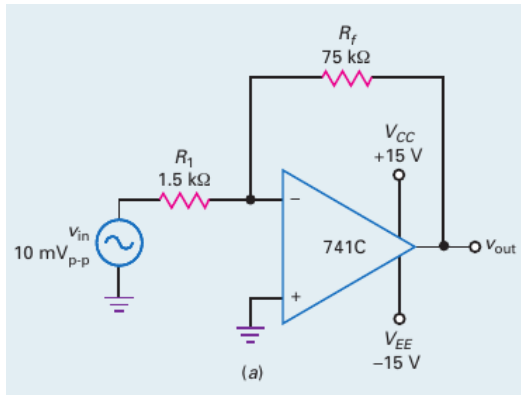
$$I_{in(bias)} = 500 \text{ nA},$$

$$I_{in(off)} = 200 \text{ nA}, \text{ dan}$$

$$V_{in(off)} = 6 \text{ mV}$$

- Berapa tegangan output jika $v_{in} = 0$?

Contoh Soal 2.9



■ Jawaban:

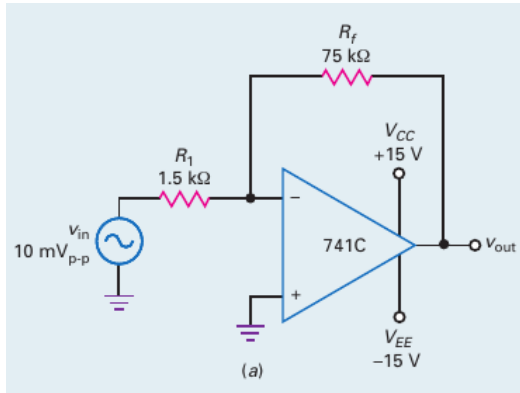
□ Tegangan error input:

$$\begin{aligned} V_{1err} &= (R_{B1} - R_{B2}) I_{in(bias)} \\ &= (-1.47 \text{ k}\Omega)(500 \text{ nA}) \\ &= -0.735 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{2err} &= (R_{B1} + R_{B2}) \frac{I_{in(off)}}{2} \\ &= (1.47 \text{ k}\Omega)(100 \text{ nA}) \\ &= 0.147 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$V_{3err} = V_{in(off)} = 6 \text{ mV}$$

Contoh Soal 2.9



■ Jawaban:

- Closed-loop voltage gain:

$$A_{v(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-75 \text{ k}\Omega}{1.5 \text{ k}\Omega} = -50$$

- Tegangan error output:

$$\begin{aligned} V_{error} &= \pm 50(V_{1err} + V_{2err} + V_{2err}) \\ &= \pm 50(0.735\text{mV} + 0.147\text{mV} + 6\text{mV}) \\ &= \pm 344 \text{ mV} \end{aligned}$$

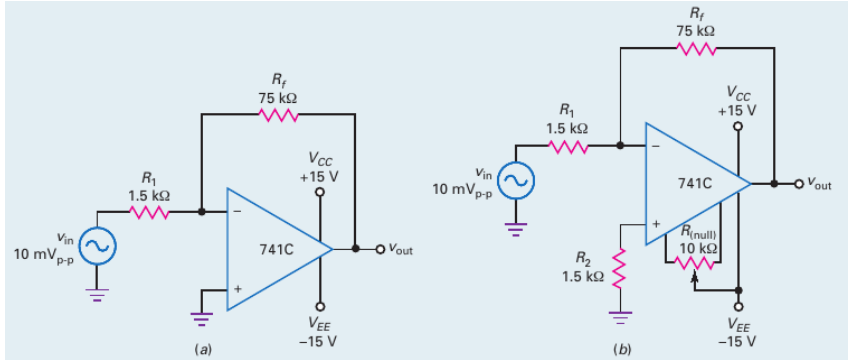
Contoh Soal 2.9

- Pada Contoh Soal 2.7, tegangan output yang diinginkan adalah 500 mVp-p.
- Bisakah kita mengabaikan tegangan error output yang besar?
- Terganti dalam pengaplikasiannya.
- Untuk amplifier sinyal suara, kita hanya butuh di rentang frekuensi suara yaitu 20 Hz hingga 20 kHz.
- Maka kita secara kapasitif memasang output ke resistor beban atau tahap berikutnya.
- Hal ini akan mem-blok tegangan error output DC tapi tetap mentransmisikan sinyal AC. Sehingga Error output menjadi tidak relevan lagi.

Contoh Soal 2.9

- Jika kita ingin menguatkan sinyal dengan frekuensi dari 0 Hz hingga 20 kHz, maka kita membutuhkan op amp yang lebih baik (bias dan offset yang lebih kecil), atau memodifikasi rangkaianannya seperti pada Gambar 15b.
- Pada Gambar 15b, kita menambahkan compensating resistor terhadap noninverting input untuk menghilangkan efek dari arus bias input.
- Digunakan juga potentiometer 10 k Ω untuk meniadakan efek dari arus offset input dan tegangan offset input.

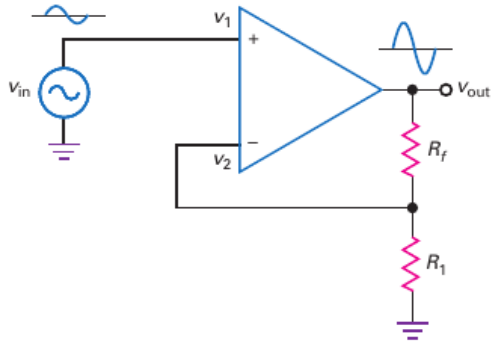
Contoh Soal 2.9



Gambar. 15: (a) Rangkaian op amp 741C dan (b) Rangkaian op amp 741C dengan penambahan compensating resistor dan potensiometer

Pengantar Non-inverting Amplifier

- Non-inverting amplifier adalah salah satu rangkaian op amp dasar.
- Non-inverting amplifier menggunakan negative feedback untuk menstabilkan overall voltage gain.
- Dengan amplifier jenis ini, negative feedback juga meningkatkan impedansi input dan menurunkan impedansi output.



Gambar. 16: Non-inverting amplifier

Rangkaian Dasar

- Gambar 16 menunjukkan rangkaian ekivalen ac dari noninverting amplifier.
- Tegangan input (v_{in}) men-drive noninverting input.
- Tegangan input ini dikuatkan untuk menghasilkan tegangan output se-fasa (Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 16).
- Tegangan output diumpanbalikan ke input melalui pembagi tegangan.
- Tegangan sepanjang R_1 adalah tegangan feedback yang diberikan ke inverting input.
- Tegangan feedback ini hampir sama dengan tegangan input.
- Karena open-loop voltage gain yang besar, perbedaan antara v_1 dan v_2 sangat kecil.
- Karena tegangan feedback berlawanan dengan tegangan input, maka kita mendapatkan negative-feedback.

Rangkaian Dasar

- Bagaimana negative-feedback dapat menstabilkan keseluruhan voltage gain?
- Jika open-loop voltage gain (A_{VOL}) meningkat, tegangan output akan meningkat dan lebih banyak tegangan feedback ke inverting input.
- Tegangan feedback yang berkebalikan ini yang akan mereduksi tegangan input ($v_1 - v_2$).
- Sehingga, meskipun A_{VOL} meningkat, $v_1 - v_2$ akan berkurang, dan output akhir meningkat jauh lebih sedikit daripada jika tidak ada negative feedback.
- Overall output (tegangan output) hanya sedikit peningkatan.

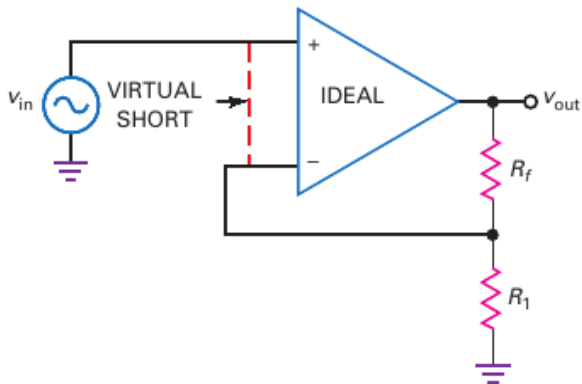
Virtual Short

- Saat kita menghubungkan dua titik dalam rangkaian dengan kabel, tegangan kedua titik tersebut terhadap ground akan bernilai sama.
- Kabel tersebut memberikan jalur kepada arus untuk mengalir antara dua titik tersebut.
- Mechanical short (kabel yang menghubungkan 2 titik) adalah hubungan singkat (short) untuk tegangan maupun arus.

Virtual Short

- Virtual short digunakan untuk menganalisis noninverting amplifier dengan cepat dan mudah.
- Virtual short menggunakan 2 sifat dari op amp ideal:
 1. Ketika R_{in} adalah tak hingga, kedua arus input adalah nol.
 2. Ketika A_{VOL} adalah tak hingga, $v_1 - v_2$ adalah nol.
- Gambar 17 menunjukkan virtual short antara terminal input op amp.

Virtual Short



Gambar. 17: Virtual short

Virtual Short

- Virtual short adalah short untuk tegangan tetapi open untuk arus.
- Garis putus-putus menandakan tidak ada arus yang mengalir.
- Meskipun virtual short merupakan pendekatan yang ideal, metode ini memberikan jawaban yang lebih akurat ketika digunakan dengan heavy negative feedback.

Virtual Short

- Bagaimana cara menggunakan virtual short?
- Kapan pun kita menganalisa inverting amplifier atau rangkaian yang semisal, kita dapat memvisualisasikan virtual short antara terminal input dari op amp.
- Selama op amp beroperasi secara linear (tidak saturasi positif maupun negatif), open-loop voltage gain mendekati tak hingga dan virtual short berada di antara kedua input terminal.
- Hal yang perlu diperhatikan: karena virtual short, tegangan input inverting mengikuti tegangan input noninverting. Jika tegangan noninverting input meningkat atau menurun, seketika tegangan input inverting akan meningkat atau menurun. Peristiwa ini disebut dengan **bootstrapping**

Voltage Gain

- Gambar 18 menunjukkan virtual short antara terminal input op amp.
- Artinya tegangan input ada di R_1 , sehingga dapat kita tuliskan:

$$v_{in} = i_1 R_1$$

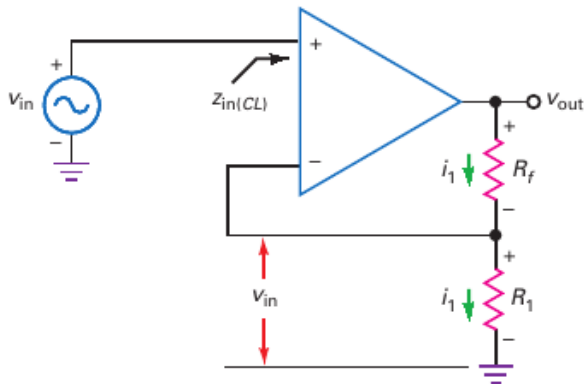
- Karena tidak ada arus yang mengalir melalui virtual short, arus i_1 juga mengalir di R_f , yang artinya tegangan output yang dihasilkan:

$$v_{out} = i_1 (R_f + R_1)$$

- Untuk mendapatkan voltage gain maka v_{out} dibagi oleh v_{in} :

$$A_{v(CL)} = \frac{R_f + R_1}{R_1} = \frac{R_f}{R_1} + 1 \quad (12)$$

Voltage Gain



Gambar. 18: Tegangan input ada di R_1 dan arus yang sama mengalir di R_1

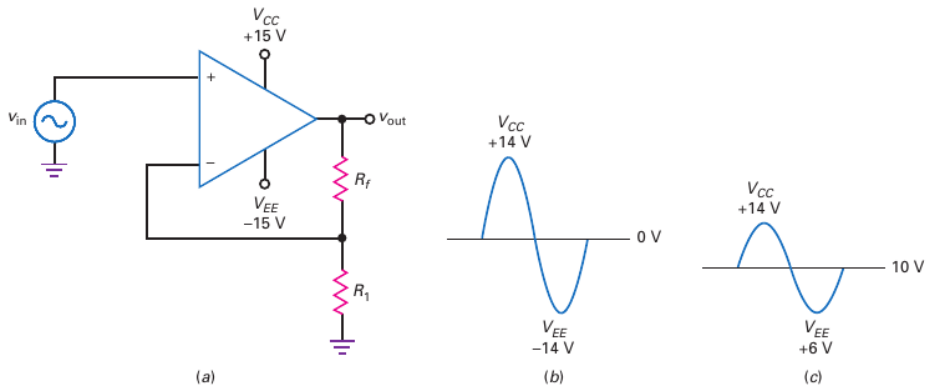
Impedansi Input, Bandwidth, Bias & Offset

- Karena impedansi input open-loop sudah sangat besar ($2\text{ M}\Omega$ untuk 741C), maka impedansi input closed-loop lebih besar lagi.
- Efek negative feedback terhadap bandwidth sama seperti di inverting amplifier

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

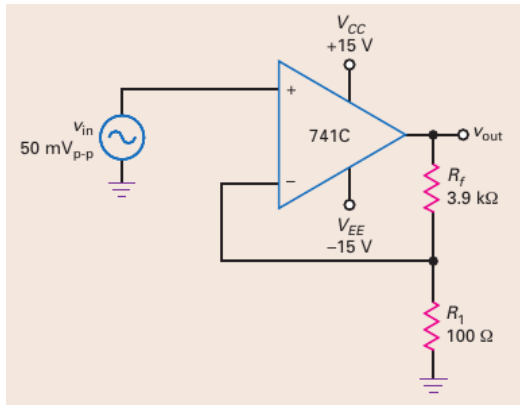
- Efek bias dan offset juga sama seperti di inverting amplifier

Error Tegangan Output Mereduksi MPP



Gambar. 19: Error tegangan output dapat mereduksi MPP

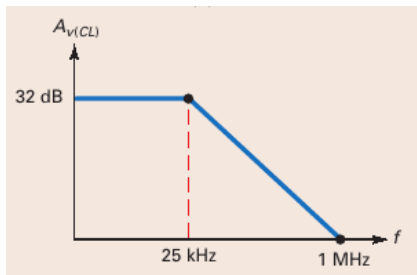
Contoh Soal 2.10



■ Pertanyaan:

- Berapa penguatan tegangan closed-loop dan bandwidth?
- Berapa tegangan output di 250 kHz?

Contoh Soal 2.10



■ Jawaban:

- Penguatan tegangan closed-loop:

$$A_{v(CL)} = \frac{R_f}{R_1} + 1 = \frac{3.9 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega} + 1 = 40$$

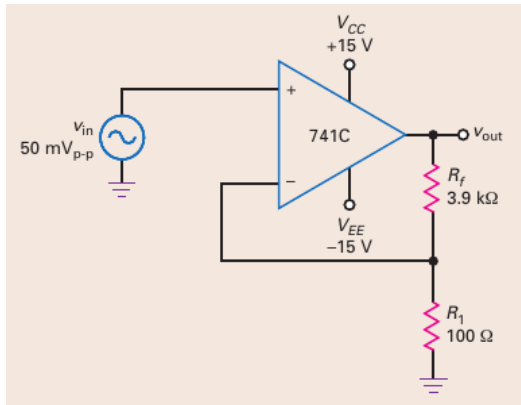
- Bandwidth:

$$f_{2(CL)} = \frac{f_{unity}}{A_{v(CL)}} = \frac{1 \text{ MHz}}{40} = 25 \text{ kHz}$$

- Tegangan output di 250 kHz

$$\begin{aligned} v_{out} &= A_{c(CL)} v_{in} = 4(50 \text{ mVp-p}) \\ &= 200 \text{ mVp-p} \end{aligned}$$

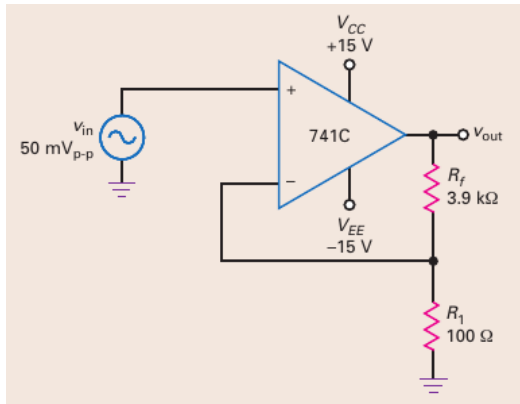
Latihan Soal 2.10



■ Pertanyaan:

- Jika $R_f = 4.9 \text{ k}\Omega$, tentukan $A_{v(CL)}$ dan v_{out} di 200 kHz.

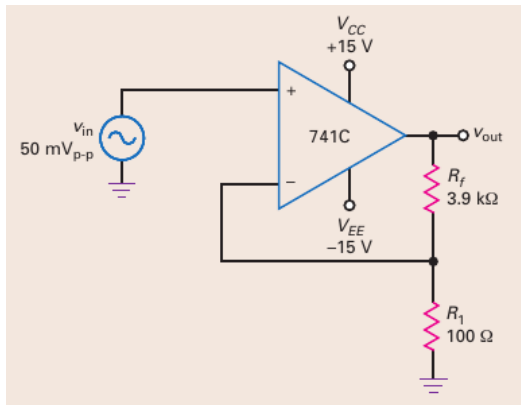
Contoh Soal 2.11



■ Pertanyaan:

- Jika $I_{in(bias)} = 500$ nA, $I_{in(off)} = 200$ nA, dan $V_{in(off)} = 6$ mV, berapa error tegangan output?

Contoh Soal 2.11



■ Jawaban:

- Resistor Thevenin:

$$R_{B2} = R_1 \parallel R_f = 3.9 \text{ k}\Omega \parallel 100 \text{ }\Omega$$

$$R_{B2} \approx 100 \text{ }\Omega$$

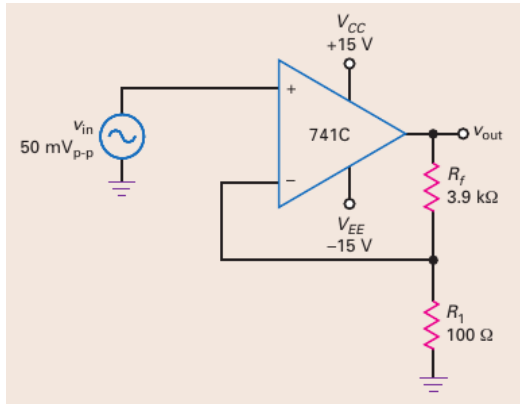
- Error tegangan input

$$\begin{aligned} V_{1err} &= (R_{B1} - R_{B2})I_{in(bias)} \\ &= (-100 \text{ }\Omega)(500 \text{ nA}) = -0.05 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{2err} &= (R_{B1} + R_{B2})I_{in(bias)} \\ &= (100 \text{ }\Omega)(100 \text{ nA}) = 0.01 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$V_{3err} = V_{in(off)} = 6 \text{ mV}$$

Contoh Soal 2.11



■ Jawaban:

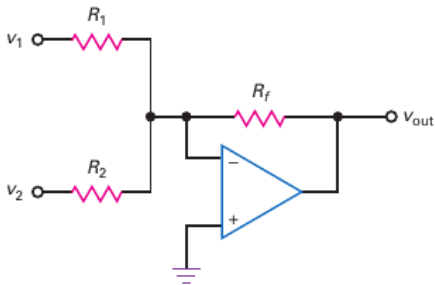
- Error tegangan output

$$\begin{aligned}
 V_{error} &= \pm A_{v(CL)} (\pm V_{1err} \pm V_{2err} \pm V_{3err}) \\
 &= \pm 40 (0.05 \text{ mV} + 0.01 \text{ mV} + 6 \text{ mV}) \\
 &= \pm 242 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

Pengantar Aplikasi Op-Amp

- Aplikasi dari op amp sangat luas sekali dan beraneka ragam
- Tidak mungkin menjelaskannya secara komprehensif
- Sementara kita fokus pada 2 rangkaian dulu.

The Summing Amplifier



Gambar. 20: Rangkaian umming amplifier

- Menggabungkan 2 atau lebih sinyal analog menjadi satu output

- Menguatkan setiap sinyal input
- Penguatan setiap channel atau input

$$A_{v1(CL)} = \frac{-R_f}{R_1}; \quad A_{v2(CL)} = \frac{-R_f}{R_2}$$

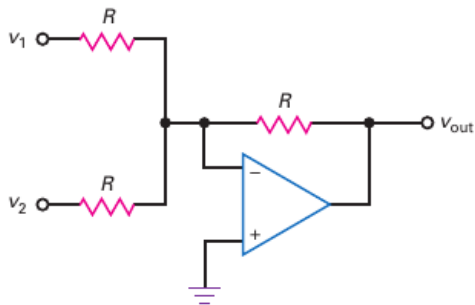
- Tegangan output

$$v_{out} = A_{v1(CL)}v_1 + A_{v2(CL)}v_2 \quad (13)$$

- Resistor Thevenin:

$$R_{B2} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_f \parallel \cdots \parallel R_n \quad (14)$$

The Summing Amplifier

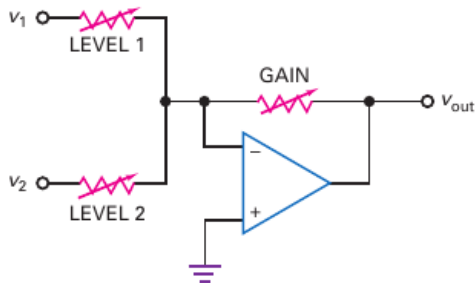


■ Tegangan output

$$v_{out} = -(v_1 + v_2 + \dots + v_n)$$

Gambar. 21: Rangkaian summing amplifier dengan resistor yang sama

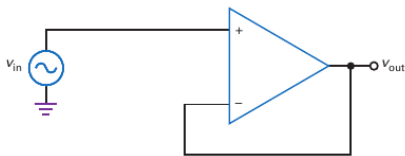
The Summing Amplifier



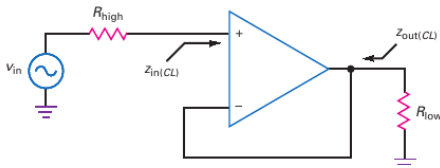
Gambar. 22: Rangkaian mixer

- Menggabungkan sinyal audio
- Menurunkan LEVEL 1 → sinyal v_1 semakin nyaring di output
- Menurunkan LEVEL 2 → sinyal v_2 semakin nyaring di output
- Meningkatkan GAIN → kedua sinyal semakin nyaring

Voltage Follower



(a)



(b)

- Penguatan tegangan closed-loop:

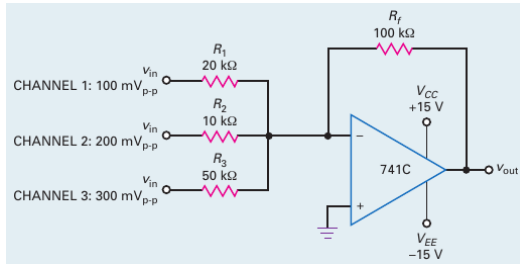
$$A_{v(CL)} = 1 \quad (15)$$

- Bandwidth closed-loop:

$$f_{2(CL)} = f_{unity} \quad (16)$$

Gambar. 23: Rangkaian voltage follower

Contoh Soal 2.12



■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan output ac?

■ Jawaban:

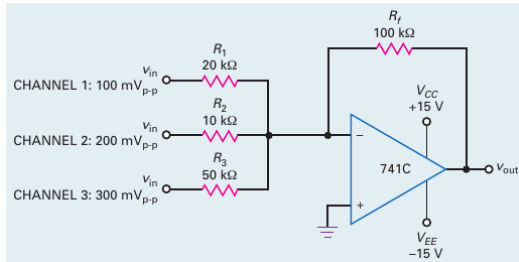
- Penguatan tegangan tiap channel:

$$A_{v1(CL)} = \frac{-R_f}{R_1} = \frac{-100 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega} = -5$$

$$A_{v2(CL)} = \frac{-R_f}{R_2} = \frac{-100 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = -10$$

$$A_{v3(CL)} = \frac{-R_f}{R_3} = \frac{-100 \text{ k}\Omega}{50 \text{ k}\Omega} = -2$$

Contoh Soal 2.12



■ Jawaban:

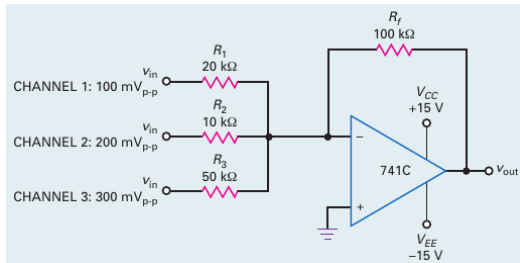
- Tegangan output:

$$v_{out} = A_{v1(CL)} v_1 + A_{v2(CL)} v_2 + A_{v3(CL)} v_3$$

- Jika diperlukan untuk mengkompensasi bias input dengan menambahkan R_B yang sama ke noninverting input

$$\begin{aligned} R_{B2} &= R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_f \\ &= 20 \text{ k}\Omega \parallel 10 \text{ k}\Omega \parallel 50 \text{ k}\Omega \parallel 100 \text{ k}\Omega \\ &= 5.56 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

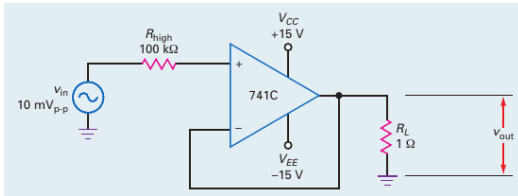
Latihan Soal 2.12



■ Pertanyaan:

- Jika tegangan input peak-to-peak diganti dengan tegangan positif dc, berapakah tegangan output dc-nya?

Contoh Soal 2.13



■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan output dan bandwidth?

■ Jawaban:

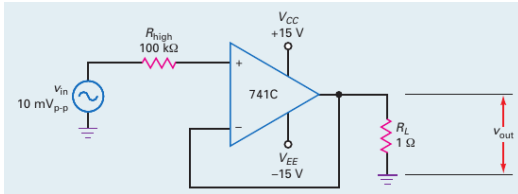
- Penguatan tegangan closed-loopnya adalah unity, sehingga:

$$v_{out} = A_{v(CL)} v_{in} = 1(10 \text{ mV}_{p-p})$$

- Bandwidthnya adalah:

$$f_{2(CL)} = f_{unity} = 1 \text{ MHz}$$

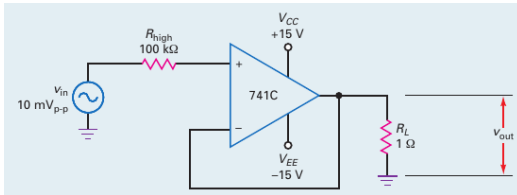
Latihan Soal 2.13



■ Pertanyaan:

- Berapa tegangan output dan bandwidth jika op amp yang digunakan adalah LF157A?

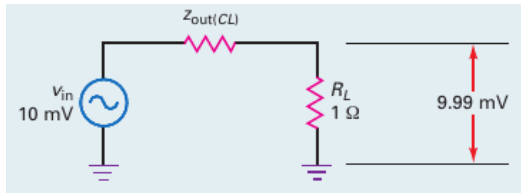
Contoh Soal 2.14



■ Pertanyaan:

- Jika rangkaian voltage follower di sampling dibuat dengan Multisim, tegangan output di 1Ω adalah 9.99 mV . Tentukan berapa impedansi output closed-loop?

Contoh Soal 2.14



■ Jawaban:

- Tegangan output:

$$v_{out} = 9.99 \text{ mV}$$

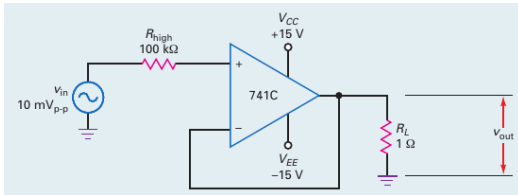
- Arus di beban adalah:

$$i_{out} = \frac{9.99 \text{ mV}}{1 \Omega} = 9.99 \text{ mA}$$

- Impedansi output closed-loop

$$z_{out(CL)} = \frac{0.01 \text{ mV}}{9.99 \text{ mA}} = 0.001 \Omega$$

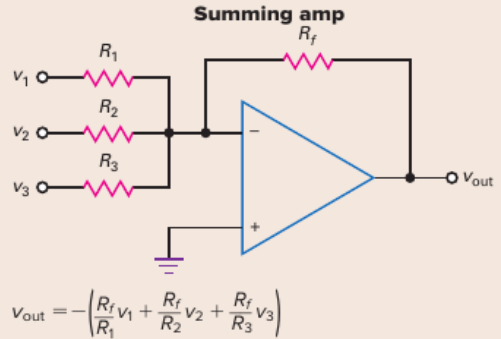
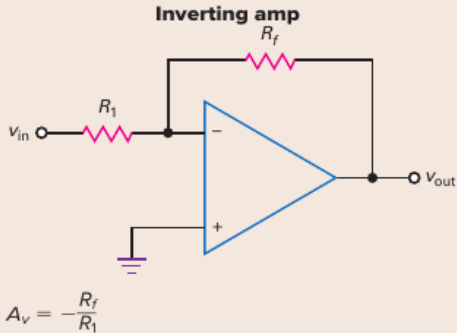
Latihan Soal 2.14



■ Pertanyaan:

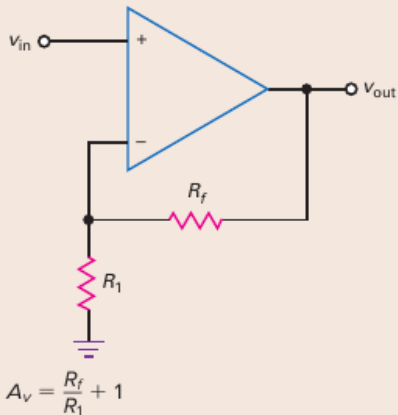
- Jika rangkaian voltage follower di sampling dibuat dengan Multisim, tegangan output di $1\ \Omega$ adalah $9.95\ \text{mV}$. Tentukan berapa impedansi output closed-loop?

Ringkasan

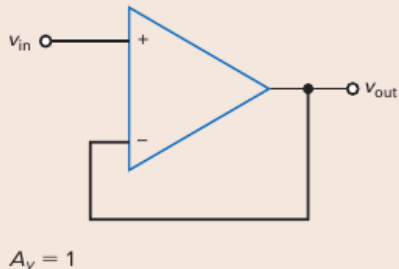


Ringkasan

Noninverting amp



Voltage follower



Linear IC

- Op amp : $\frac{1}{3}$ bagian dari IC
- Linear IC : op amp, audio amplifier, video amplifier, voltage regulator

Tabel Parameter Op Amp saat 25°

Number	V_{in} max, mV	$I_{in(bias)}$ max, nA	$I_{in(off)}$ max, nA	I_{out} max, mA	f_{unity} typ, MHz	S_R typ, V/ μ s	A_{vol} typ, dB	CMRR min, dB	PSRR min, dB	Drift typ, μ V/ $^{\circ}$ C	Description of Op Amps
LF353	10	0.2	0.1	10	4	13	88	70	-76	10	Dual BIFET
LF356	5	0.2	0.05	20	5	12	94	85	-85	5	BIFET, wideband
LF411A	0.5	200	100	20	4	15	88	80	-80	10	Low offset BIFET
LM301A	7.5	250	50	10	1+	0.5+	108	70	-70	30	External compensation
LM318	10	500	200	10	15	70	86	70	-65	—	High speed, high slew rate
LM324	4	10	2	5	0.1	0.05	94	80	-90	10	Low-power quad
LM348	6	500	200	25	1	0.5	100	70	-70	—	Quad 741
LM675	10	2 μ A*	500	3 A [†]	5.5	8	90	70	-70	25	High-power, 25 W out
LM741C	6	500	200	25	1	0.5	100	70	-70	—	Original classic
LM747C	6	500	200	25	1	0.5	100	70	-70	—	Dual 741
LM833	5	1 mA*	200	10	15	7	90	80	-80	2	Low noise
LM1458	6	500	200	20	1	0.5	104	70	-77	—	Dual
LM3876	15	1 μ A*	0.2 μ A*	6 A [†]	8	11	120	80	-85	(-)	Audio power amp, 56W
LM7171	1	10 μ A*	4 μ A*	100	200	4100	80	85	-85	35	Very high-speed amp
OP-07A	0.025	2	1	10	0.6	0.17	110	110	-100	0.6	Precision
OP-42E	0.75	0.2	0.04	25	10	58	114	88	-86	10	High-speed BIFET
TL072	10	0.2	0.05	10	3	13	88	70	-70	10	Low-noise BIFET dual
TL074	10	0.2	0.05	10	3	13	88	70	-70	10	Low-noise BIFET quad
TL082	3	0.2	0.01	10	3	13	94	80	-80	10	Low-noise BIFET dual
TL084	3	0.2	0.01	10	3	13	94	80	-80	10	Low-noise BIFET quad

*For the LM675, LM833, LM3876 and LM7171, this value is commonly expressed in microamperes.

[†]For the LM675 and LM3876, this value is commonly expressed in amperes.

Power Supply Rejection Ration (PSRR)

- Persamaan PSRR:

$$PSRR = \frac{\Delta V_{in(off)}}{\Delta V_S} \quad (17)$$

- PSRR dari LF353 = -76 dB \rightarrow $PSRR = 10^{(-76/20)} = 0.000158 = 158 \mu\text{V/V}$
- Setiap perubahan pada tegangan supply sebesar 1 V akan menyebabkan perubahan tegangan offset input sebesar $158 \mu\text{V}$

Drift

- Koefisien temperatur dari tegangan offset input
- Seberapa banyak tegangan offset input akan meningkat karena temperatur
- Drift dari LF353 = $10 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ \rightarrow tegangan offset input akan meningkat sebesar $10 \mu\text{V}$ untuk setiap kenaikan 1°C
- Jika temperatur internal dari op amp meningkat sebesar 50°C maka tegangan offset input dari LF353 meningkat sebesar $500 \mu\text{V}$

Audio Amplifiers

- Preamps = audio amplifier dengan daya output < 50 mW
- Front-end audio system
- Mengurangi low noise dari optical sensors, magnetic tape heads, microphones, dll
- Contoh:
 - LM833: low-noise dual preamp, $A_v = 110$ dB, 27-V power bandwidth 120 kHz, input berupa diff amp

Audio Amplifiers

- Medium-level audio amplifiers = output power 50 mW - 500 mW
- Near output end
- Portable electronic devices: cell phones, CD player
- Contoh:
 - LM4818 audio power amplifier: output power 350 mW

Audio Amplifiers

- Output power > 500 mW
- High-fidelity amplifier, intercoms, AM-FM radio
- Contoh:
 - LM380: $A_v = 34$ dB, bandwidth 100 kHz, output power 2 W
 - LM4756: $A_v = 30$ dB, output power 7 W/channel

Video Amplifiers

- Wideband amplifier
- Flat response (constant decibel voltage gain)
- Very broad range of frequencies
- Applications in which the range of input frequencies is very large: analog oscilloscopes, video cameras, copiers and scanners, and HDTV amplifiers
- Contoh:
 - LM7171: very high-speed amplifier, wide unity-gain bandwidth of 200 MHz, slew rate of $4100 \text{ V}/\mu\text{s}$
 - NE592: voltage gain 52 dB, cutoff frequency 40 MHz, voltage gains and bandwidths dapat diatur dengan menghubungkan external resistors yang berbeda sehingga menjadi 90 MHz
 - MC1553: gain 52 dB, bandwidth 20 MHz, adjusted by changing external components
 - LM733: up to 20-dB gain, bandwidth of 120 MHz (adjusted by changing external components)

Voltage Regulator

- Rectifier \rightarrow dc voltage + ripple \rightarrow voltage regulator
- DC voltage \propto line voltage
- Perubahan 10% dari line voltage \propto perubahan 10% DC voltage \leftarrow ini terlalu besar
- LM340 series \rightarrow menahan perubahan 0.01%, positive/negative output, adjustable output voltage, and short-circuit protection.

TERIMA KASIH