

TEORI APLIKASI OP-AMP

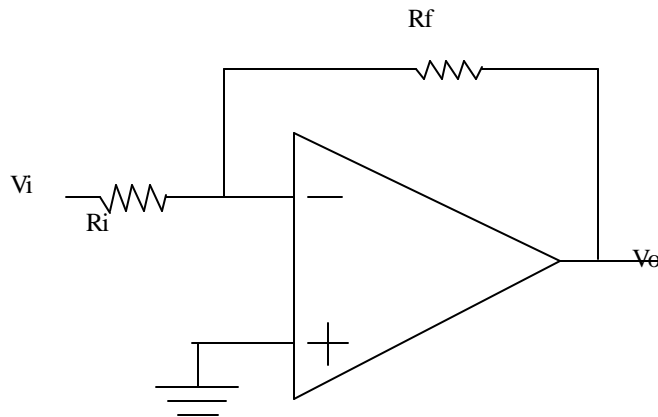
2.1 Pendahuluan

Pada bagian ini dibahas tentang macam macam teori yang mendasar dan juga sebagian untuk terapan suatu rangkaian. Pembahasan dilengkapi dengan latihan soal dan soal soal tersebut yang harus dikerjakan oleh siswa untuk mencapai target tujuan dari mata kuliah ini. Model dari pertanyaan disengaja membalik balikkan permasalahan sehingga terkesan banyak pertanyaan.

2.2 Inverting

Inverting amplifier ini, input dengan outputnya berlawanan polaritas. Jadi ada tanda minus pada rumus penguatannya. Penguatan inverting amplifier adalah bisa lebih kecil nilai besaran dari 1, misalnya -0.2 , -0.5 , -0.7 , dst dan selalu negatif. Rumus nya :

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i$$



Gambar 2.1

Rangkaian inverting Amplifier

2.3 Non-Inverting

Rangkaian non inverting ini hampir sama dengan rangkaian inverting hanya perbedaannya adalah terletak pada tegangan inputnya dari masukan noninverting.

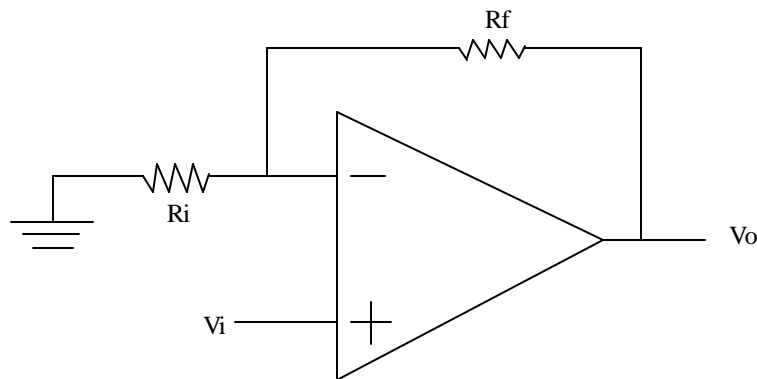
Rumusnya seperti berikut :

$$V_o = \frac{R_f + R_i}{R_i} V_i$$

sehingga persamaan menjadi $V_o = \left(\frac{R_f}{R_i} + 1\right) V_i$

Hasil tegangan output noninverting ini akan lebih dari satu dan selalu positif.

Rangkaian nya adalah seperti pada gambar berikut ini :

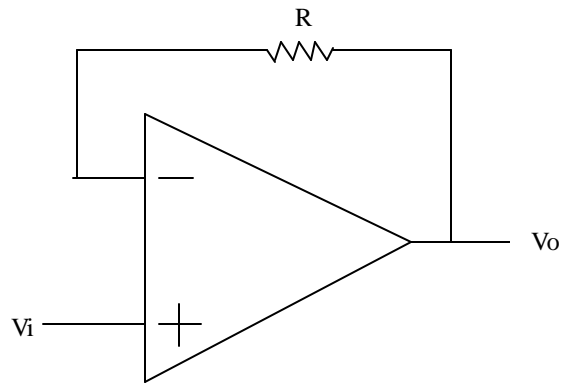


Gambar 2.5
Noninverting Amplifier

2.4 Buffer

Rangkaian buffer adalah rangkaian yang inputnya sama dengan hasil outputnya. Dalam hal ini seperti rangkaian common kolektor yaitu berpenguatan = 1.

Rangkaiannya seperti pada gambar berikut ini



Gambar 2.8
Rangkaian Buffer

Nilai R yang terpasang gunanya untuk membatasi arus yang di keluarkan. Besar nilainya tergantung dari indikasi dari komponennya, biasanya tidak dipasang alias arus dimaksimalkan sesuai dengan kemampuan op-ampnya.

2.5 Adder/ Penjumlah

Rangkaian penjumlah atau rangkaian adder adalah rangkaian penjumlah yang dasar rangkaiannya adalah rangkaian inverting amplifier dan hasil outputnya adalah dikalikan dengan penguatan seperti pada rangkaian inverting. Pada dasarnya nilai outputnya adalah jumlah dari penguatan masing masing dari inverting, seperti :

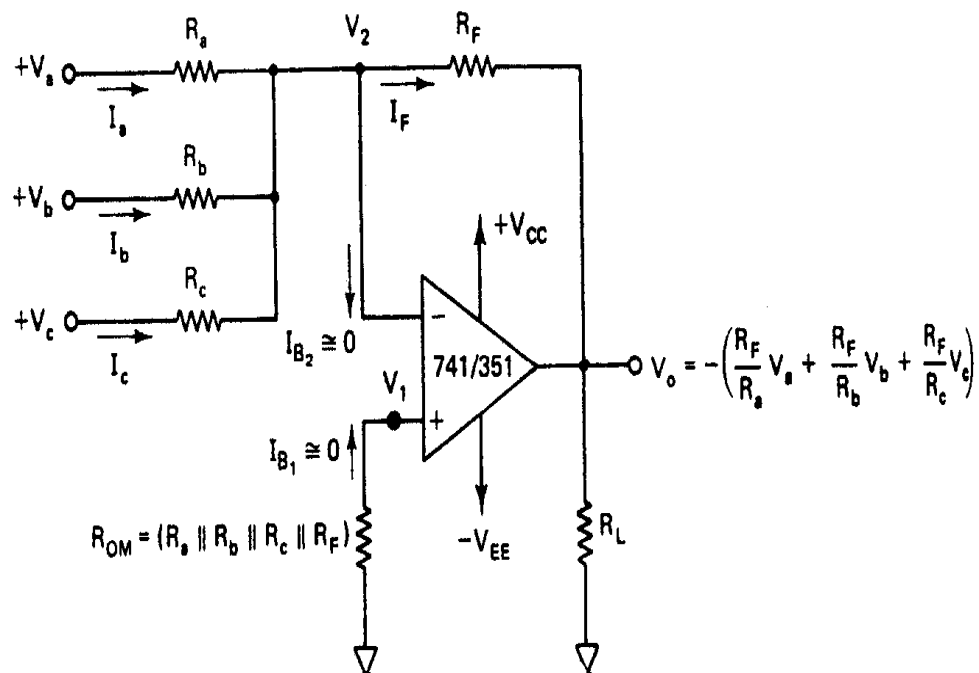
$$V_{oa} = -\frac{R_f}{R_a} V_a \quad V_{ob} = -\frac{R_f}{R_b} V_b \quad V_{oc} = -\frac{R_f}{R_c} V_c$$

$$V_{ot} = -R_f \left(\frac{1}{R_a} V_a + \frac{1}{R_b} V_b + \frac{1}{R_c} V_c \right)$$

Bila $R_f = R_a = R_b = R_c$, maka persamaan menjadi :

$$V_o = -(V_a + V_b + V_c)$$

Tahanan Rom gunanya adalah untuk meletak titik nol supaya tepat, terkadang tanpa Rom sudah cukup stabil. Maka rangkaian ada yang tanpa Rom juga baik hasilnya. Rangkaian penjumlah dengan menggunakan noninverting sangat suah dilakukan karena tegangan yang diparalel akan menjadi tegangan terkecil yang ada., sehingga susah terjadi proses penjumlahan.



Gambar2.9

Rangkaian penjumlah dengan hasil negatif

2.6 Subtractor/ Pengurang

Rangkaian pengurang ini berasal dari rangkaian inverting dengan memanfaatkan masukan non-inverting, sehingga persamaannya menjadi sedikit ada perubahan. Rangkaian ini bisa terdiri 2 macam yaitu :

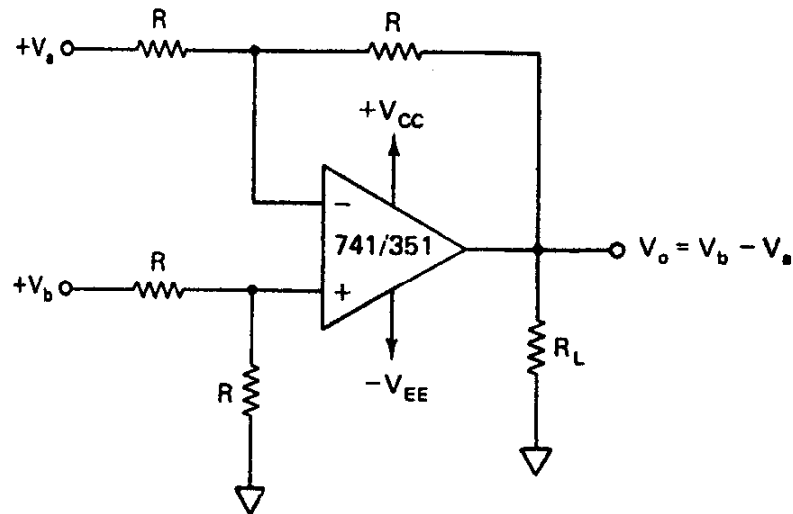
- Rangkaian dengan 1 op-amp

- b. Rangkaian dengan 2 op-amp
- c. Rangkaian dengan 3 op-amp

Rangkaian pengurang dengan 1 op-amp ini memanfaatkan kaki inverting dan kaki noninverting. Supaya benar benar terjadi pengurangan maka nilai dibuat seragam seperti gambar. Rumusnya adalah:

$$V_o = \left(\frac{R}{R} + 1 \right) \left(\frac{R}{R + R} \right) V_b - \frac{R}{R} V_a \quad \text{sehingga}$$

$$V_o = (V_b - V_a)$$



Gambar 2.12

Rangkaian pengurang dengan 1 op-amp

Rangkaian pengurang dengan 2 op-amp tidak jauh berbeda dengan satu opamp, yaitu salah satu input dikuatkan dulu kemudian dimasukkan ke rangkaian pengurang, seperti gambar dibawah ini. Perhitungan rumus yang terjadi pada titik Vz adalah :

$$V_z = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1 \right) V_y \quad \text{sehingga } V_o \text{ menjadi}$$

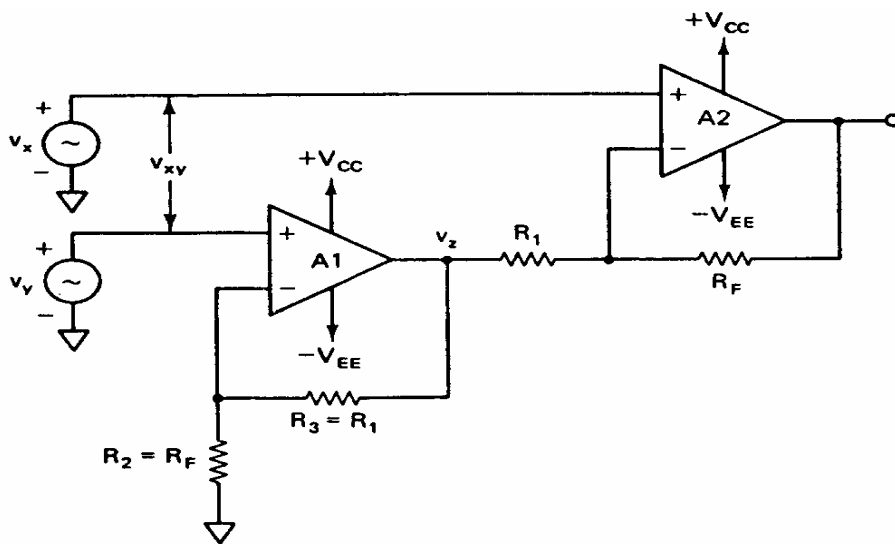
$$V_o = \left(-\frac{R_f}{R_1}\right)V_z + \left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right)V_x$$

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right)V_x - \left(\frac{R_f}{R_1}\right)\left(\frac{R_f}{R_1} + 1\right)V_y$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)\left(V_x - \left(\frac{R_f}{R_1}\right)V_y\right)$$

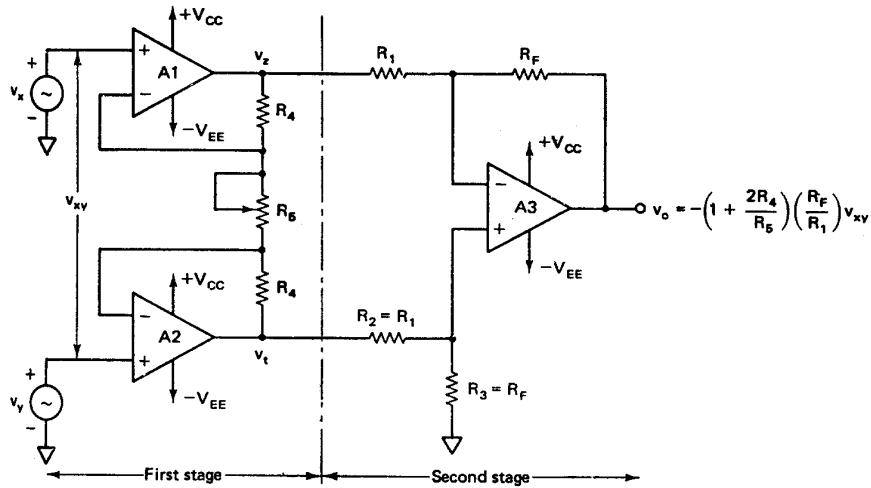
Bila $R_f=R_1$ maka persamaannya akan menjadi :

$$V_o = 2V_x - V_y$$

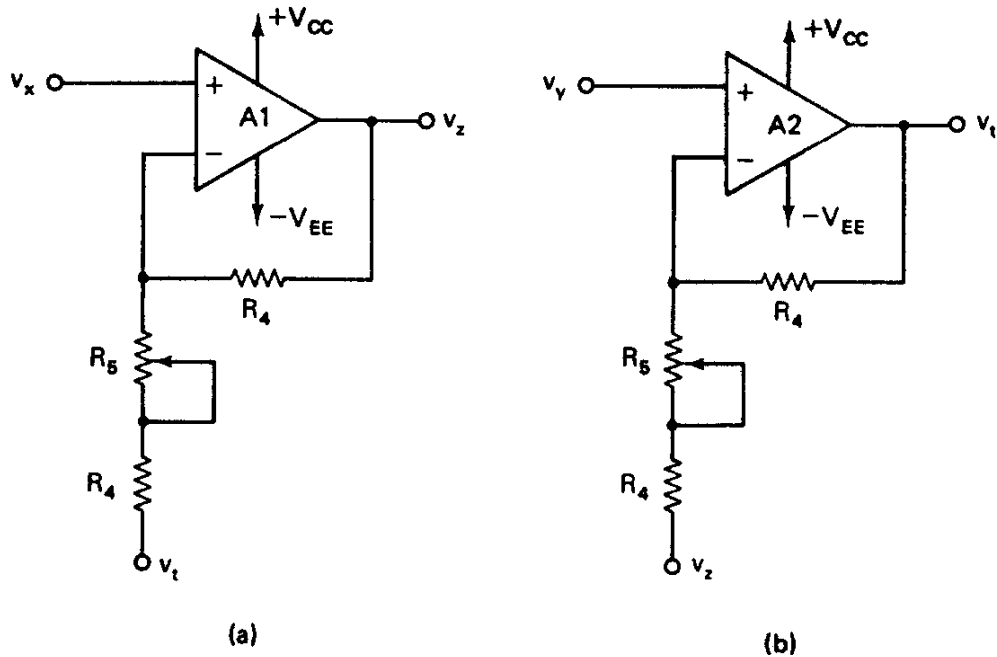


Gambar 2.13 Rangkaian pengurang dengan 2 op-amp.

Rangkaian pengurang dengan 3 op-amp sangat lah beda dengan yang lainnya. Ada 3 macam proses yang terjadi disini seperti pada gambar dibawah ini.



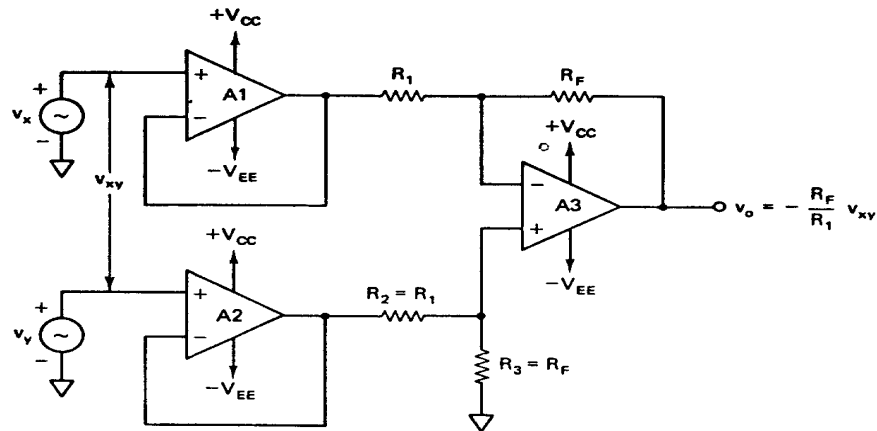
Gambar Rangkaian pengurang dengan 3 op-amp.



Gambar 2.14

Proses mencari persamaan dari rangkaian pengurang 3 op-amp

Rangkaian penguat dengan 3 op-amp seperti pada gambar dibawah ini sangat persis seperti rangkaian penguat dengan 1 op-amp. Hal ini karena sebelum masuk dilewatkan buffer saja. Perhitungannya pun sama dengan rangkaian pengurang 1 op-amp.



Gambar 2.15

Rangkaian pengurang 3 op-amp dengan buffer

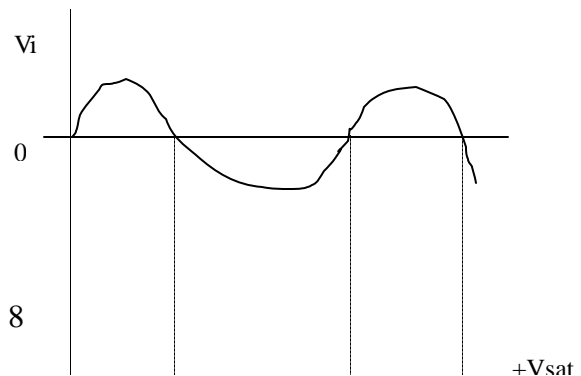
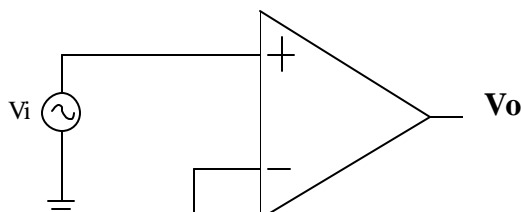
2.7 Comparator/ Pembanding

Rangkaian pembanding ini ada 3 macam yaitu :

- Rangkaian pembanding 1 op-amp tanpa jendela input
- Rangkaian pembanding 1 op-amp dengan jendela input
- Rangkaian pembanding 2 op-amp dengan jendela input proses output luar
- Rangkaian pembanding 2 op-amp dengan jendela input proses output dalam

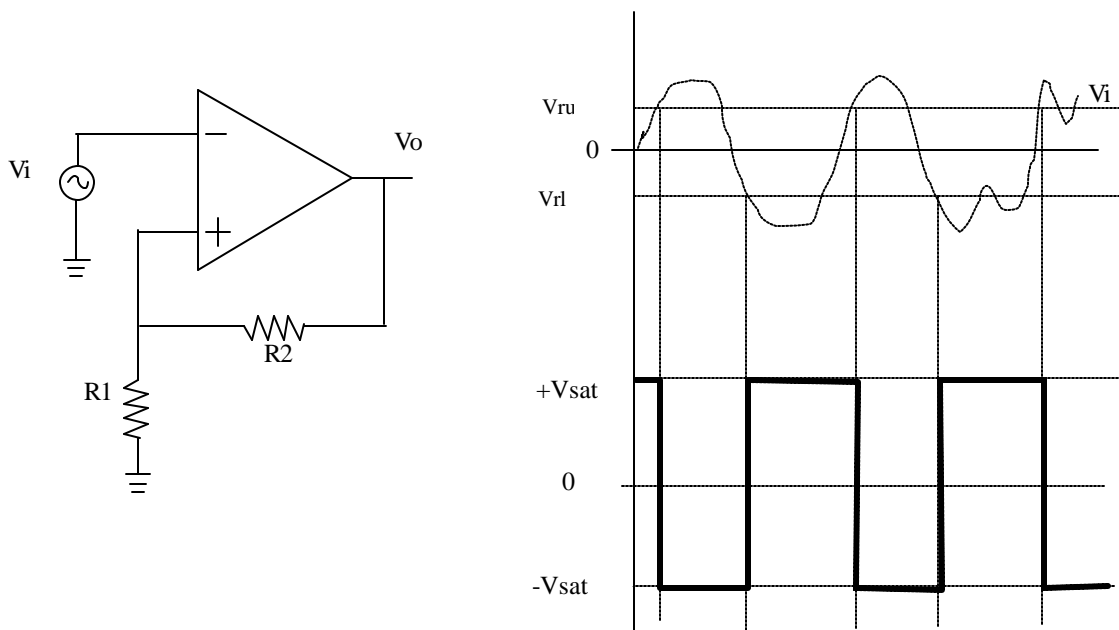
Rangkaian pembanding dengan 1 op-amp tanpa jendela input, artinya rangkaian komparator/pembanding yang langsung dibandingkan. Seperti pada gambar berikut ini adalah komparator biasa dan hasilnya langsung dibandingkan dengan referensinya.

Rangkaian komparator dengan jendela input rangkaiannya hampir sama dengan rangkaian noninverting hanya saja parameternya terbalik. Seperti pada gambar berikut ini dan contoh hasil dari input dan outputnya dan perhitungannya.



Gambar 2.20

Rangkaian komparator /pembanding dengan referensi 0 volt



Gambar 2.21

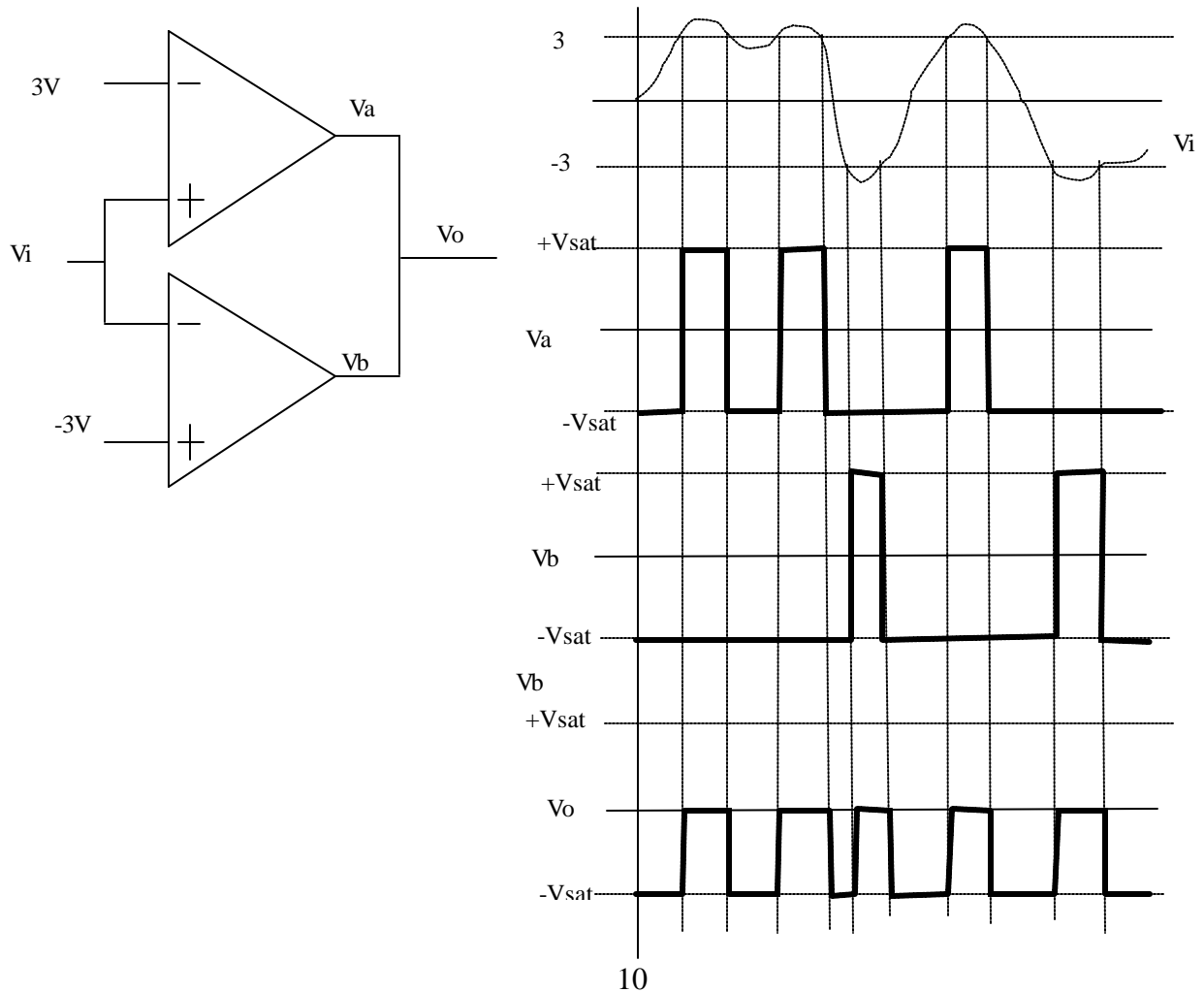
Rangkaian komparator dengan jendela

Perhitungan menentukan jendela Volt reference Up (V_{ru}) dan Volt reference low (V_{rl}) adalah sebagai berikut :

$$V_{ru} = \frac{R1}{R1 + R2} (+V_{sat})$$

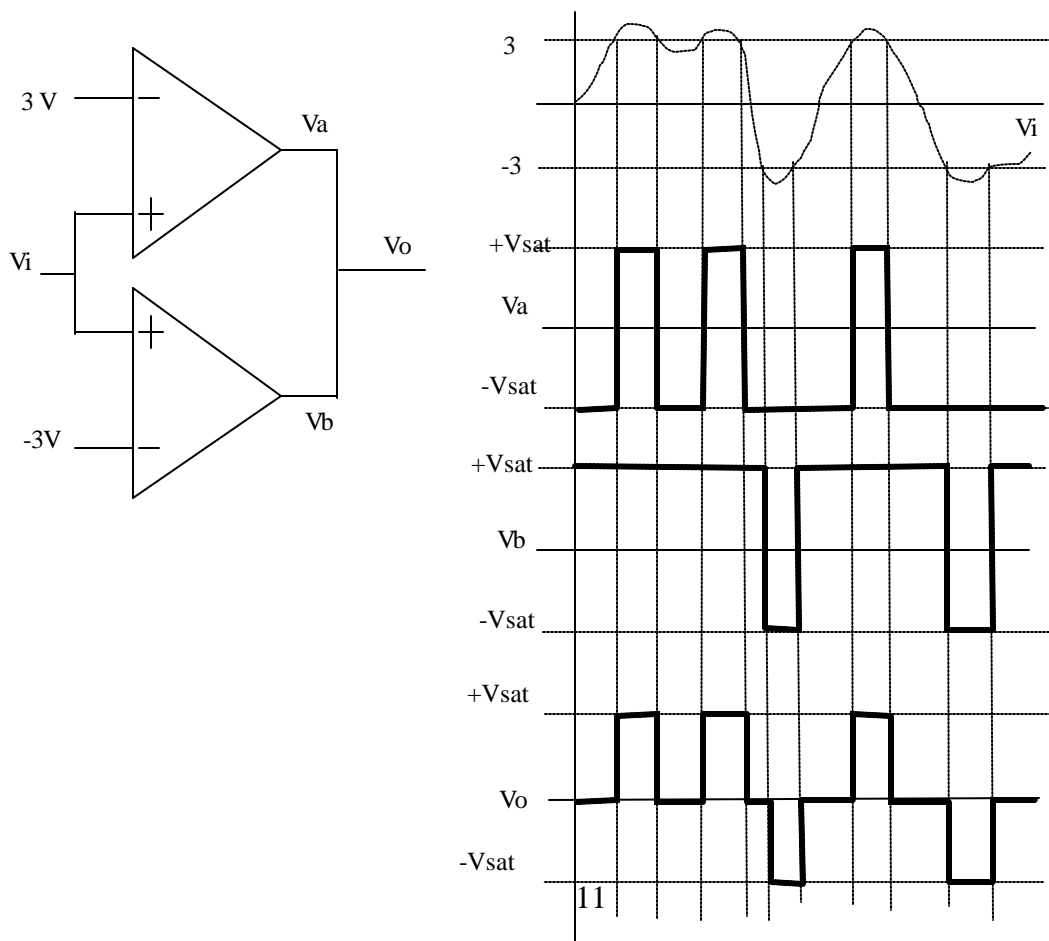
$$V_{rl} = \frac{R1}{R1 + R2} (-V_{sat})$$

Sedangkan untuk komparator dengan 2 op-amp ada 3 macam variasi seperti gambar berikut:



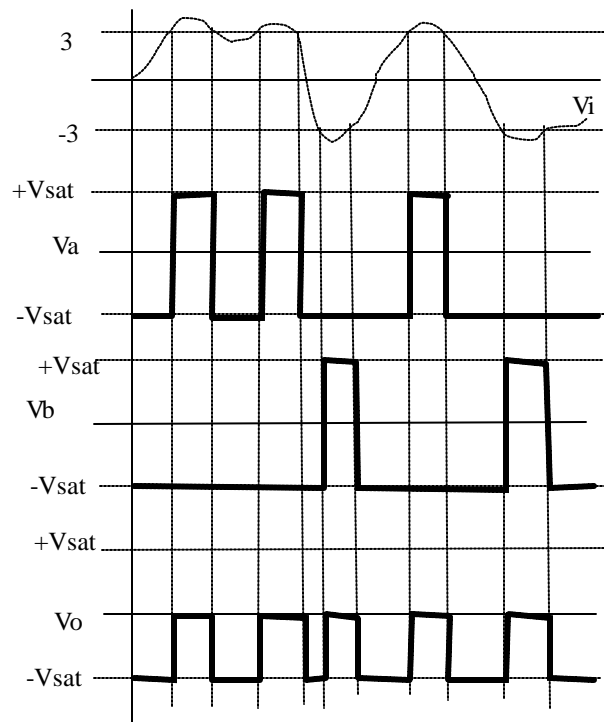
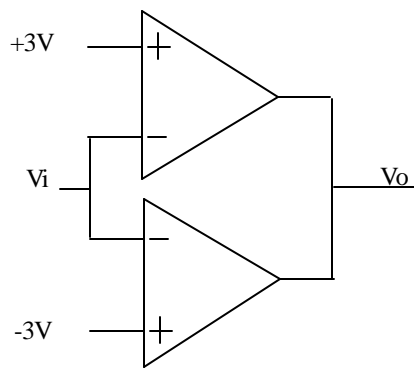
Gambar 2.22

Rangkaian komparator 2 opamp dengan output negatif



Gambar2.23

Rangkaian komparator 2 op-amp dengan output campuran



Gambar 2.24

Rangkaian komparator 2 opamp dengan output negatif

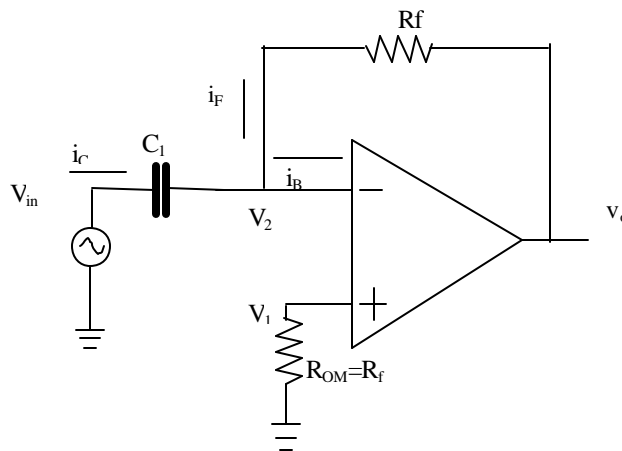
Aplikasi untuk komparator semacam ini bisa dilihat dari hasil outputnya. Misal menginginkan hanya didalam window saja yang di proses atau hanya diluar window saja yang diproses dan sebagainya.

2.8 Differensiator.

Rangkaian differensiator adalah rangkaian aplikasi dari rumusan matematika yang dapat dimainkan (dipengaruhi) dari kerja kapasitor.

Rangkaian nya seperti pada gambar 2.25 dengan rangkaian sederhana dari differensiator. Untuk mendapatkan rumus differensiator, urutannya adalah sebagai bagai berikut : $i_C = i_B + i_F$ dan selama nilai $i_B = 0$ maka $i_C = i_F$ selisih dari inverting input dan noninverting input (v_1 dan v_2) adalah nol dan penguatan tegangannya sangat besar, maka didapat persamaan pengisian kapasitor sebagai berikut :

$$C_1 \frac{d}{dt} (v_{in} - v_2) = \frac{v_2 - v_o}{R_F} \text{ menjadi } C_1 \frac{dV_{in}}{dt} = -\frac{v_o}{R_F} \text{ atau } v_o = -R_F C_1 \frac{dv_{in}}{dt}$$



Gambar 2.25

Rangkaian Differensiator Op-amp.

Pada rangkaian aplikasi rangkaian differensiator op-amp ini ada sedikit perubahan yaitu penambahan tahanan dan kapasitor yang fungsinya untuk menfilter sinyal masukan. Seperti tampak pada gambar 2.26 adalah rangkaian differensiator yang dimaksud. Dengan demikian maka ada batasan input dari frekuensi yang masuk, batasan tersebut adalah

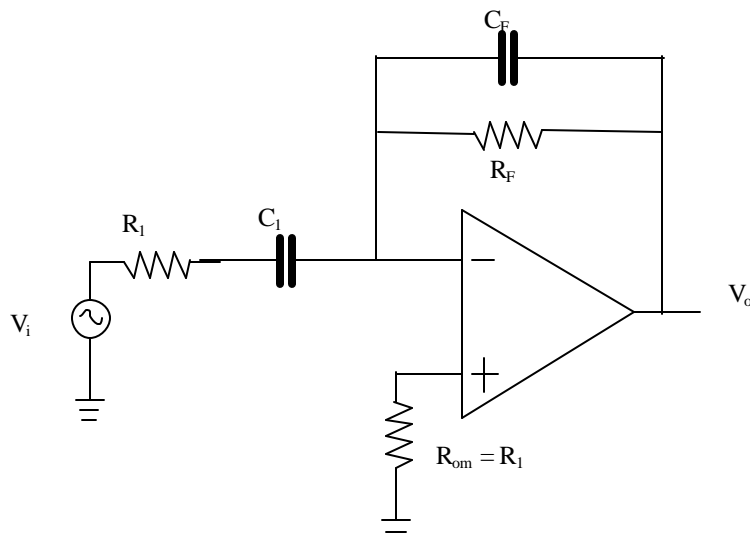
$$f_a = \frac{1}{2\pi R_F C_1}$$
 sedangkan nilai frekuensi yang diakibatkan oleh R_F dan C_1 adalah sebagai

$$\text{berikut : } f_b = \frac{1}{2\pi R_F C_F} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$
 Bila sinyal input melebihi frekuensi f_a maka hasil output akan

sama dengan hasil input, alias fungsi rangkaian tersebut tidak lagi differensiator lagi tapi sebagai pelewat biasa. Sedangkan untuk gambar 2.26 biasanya digunakan untuk rangkaian aplikasi yang di integrasikan dengan rangkaian lain. Syarat perhitungan nilai nilai R_1 , C_1 , R_F , C_F adalah sesuai dengan syarat sebagai berikut :

$$f_a < f_b$$

sehingga frekuensi input dilewatkan terlebih dahulu ke R_1 , C_1 , R_F , kemudian lewat ke R_1 , C_1 , C_F bila frekuensinya melebihi f_a .



Gambar 2.26

Rangkaian praktis (aplikasi) differensial op-amp

Contoh perhitungan rangkaian differensial

Differensiator op-amp dari rangkaian seperti gambar 2.25 dengan nilai $C_1 = 1\text{mF}$ dan $R_F = 1\text{K}\Omega$.

Sumber tegangan $\pm 15\text{Volt}$ > Awal sinyal adalah 0 Volt.

Tentukan tegangan output a. $V_{in} = 1\text{ Volt}$ (sinyal dc) saat 10 detik.

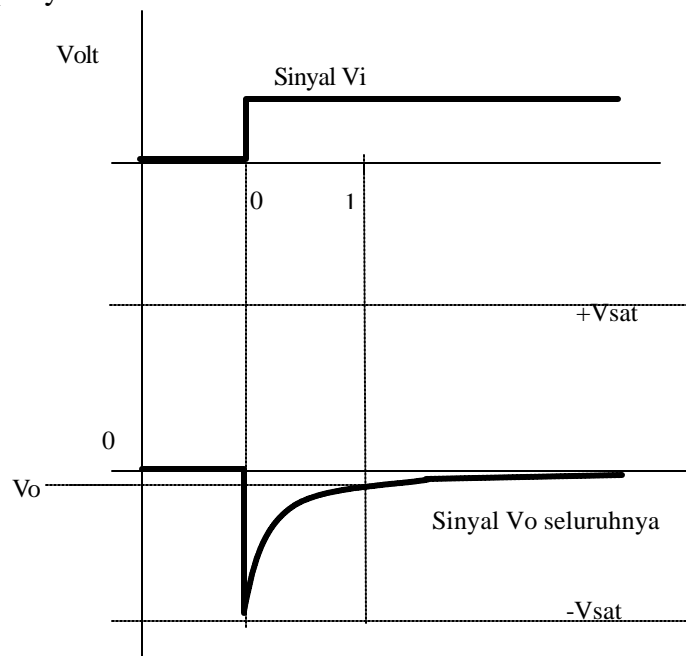
b. $V_{in} = 20\text{ Volt}$ (sinyal dc) saat 1 detik saat

Jawab:

$$v_o = -R_F C_1 \frac{dv_{in}}{dt} = -10^3 \cdot 10^{-6} \frac{(1\text{V} - 0\text{V})}{10} = -10^{-3} \cdot 0,1 = -10^{-4}\text{V}$$

$$v_o = -R_F C_1 \frac{dv_{in}}{dt} = -10^3 \cdot 10^{-6} \frac{(20\text{V} - 0\text{V})}{1} = -10^{-3} \cdot 20 = -20^{-2}\text{V}$$

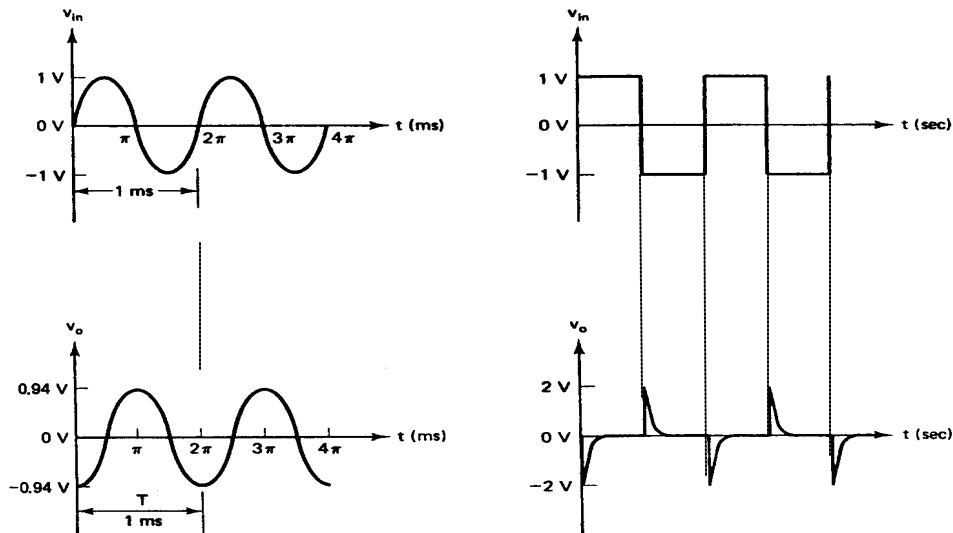
Gambar sinyal outputnya :



Gambar 2.27

Output dari rangkaian differensiator Op-amp dengan input sinyal dc

Gambar sinyal output untuk differensiator op-amp dari sinyal sinus dan segi empat adalah seperti pada gambar 2.28.



Gambar 2.28

Sinyal output rangkaian differensiator Op-amp

Untuk menentukan nilai C_F dan R_F pada differensiator op-amp ini ditentukan dari f_a dan f_b dengan hubungan sebagai berikut :

$$f_b = 20 f_a$$

Contoh soal :

Rancang differensiator op-amp dengan input bervariasi antara 10 Hz sampai 1KHz dengan $V_{in} = 1 \sin \omega t$. Volt (peak to peak)

- a. Tentukan nilai R_1, C_1, R_F , dan C_F
- b. Tentukan bentuk sinyal v_o

Penyelesaian :

a. Karena input berkisar 10 sampai 1 KHz, maka di ambil frekuensi tertingginya. Jadi $f_a = 1$ KHz

dan rumusnya : $f_a = \frac{1}{2\pi R_F C_1}$ dan ditentukan

$$C_1 = 0.1 \text{ mF}, \text{ sehingga : } R_F = \frac{1}{(2\pi).(10^3).(10^{-7})} = 1.59 \text{ K}\Omega \cong 1.5 \text{ K}\Omega$$

Bila $f_b = 20 f_a$, maka $f_b = 20$ KHz

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}, \text{ maka nilai } R_1 = \frac{1}{(2\pi).(10^4).(10^{-7})} = 79.5 \Omega \cong 82 \Omega \text{ (d disesuaikan nilai}$$

tahanan yang ada).

Selama nilai $R_1.C_1 = R_F.C_F$, maka nilai C_F adalah :

$$C_F = \frac{(82)(10^{-7})1}{1.5 \text{ K}} = 0.0055 \text{ mF} \cong 0.005 \text{ mF} \text{ (nilai disesuaikan dengan nilai kapasitor yang ada)}$$

Nilai $R_{OM} = R_1 || R_F \cong 78 \Omega$ (digunakan 82Ω)

b. Bentuk sinyal v_o adalah

$$\begin{aligned} v_o &= -R_F C_1 \frac{dv_{in}}{dt} = -(1.5 \text{ K}\Omega)(0.1 \text{ mF}) \frac{d}{dt} [\sin(2\pi).(10^3)t] \\ &= -(1.5 \text{ K}\Omega)(0.1 \text{ mF}).(2\pi).(10^3).\cos[(2\pi).(10^3)t] \\ &= -0.94.\cos[(2\pi).(10^3)t] \end{aligned}$$

2.9 Integrator

Rangkaian integrator op-amp ini juga berasal dari rangkaian inverting dengan tahanan umpan baliknya diganti dengan kapasitor. Proses perhitungannya sebagai berikut:

$i_1 = I_B + i_F$, I_B diabaikan karena sangat kecil nilainya sehingga : $i_1 \cong i_F$.

Arus pada kapasitor adalah $i_C = C \frac{dv_C}{dt}$, yang sama dengan i_F , sehingga

$\frac{v_{in} - v_2}{R_1} = C_F \left(\frac{d}{dt} \right) (v_2 - v_o)$, karena $v_1 = v_2 \cong 0$, karena penguatan A terlalu besar, sehingga

$$\frac{v_{in}}{R_1} = C_F \left(\frac{d}{dt} \right) (-v_o) \text{ ————— } \int_0^t \frac{v_{in}}{R_1} dt = \int_0^t C_F \frac{d}{dt} (-v_o) dt = C_F (-v_o) + v_o |_{t=0}$$

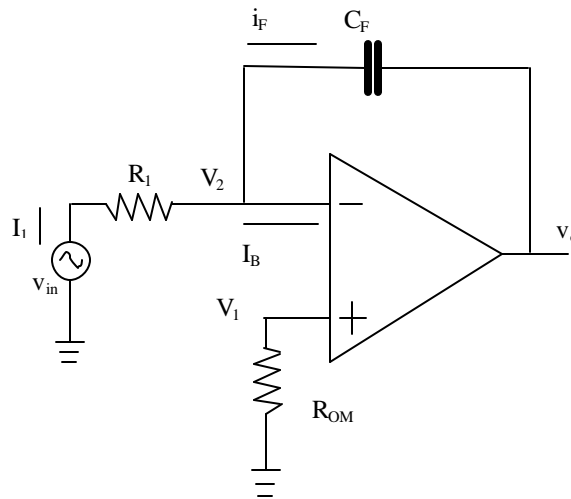
Sehingga persamaannya menjadi :

$$v_o = -\frac{1}{R_1 C_F} \int_0^t v_{in} dt + C$$

Batas frekuensi yang dilalui oleh kapasitor dalam rangkaian integrator adalah

$$f_o = \frac{1}{2\pi R_1 C_F}$$

Biasanya rangkaian untuk aplikasi ada penambahan tahanan yang diparalel dengan kapasitor dengan dinamakan R_F . Seperti pada gambar 2.29 rangkaian integrator yang belum di tambah tahanan yang diparalel dengan kapasitor. Nilai R_{OM} adalah antara nol sampai dengan R_1 .

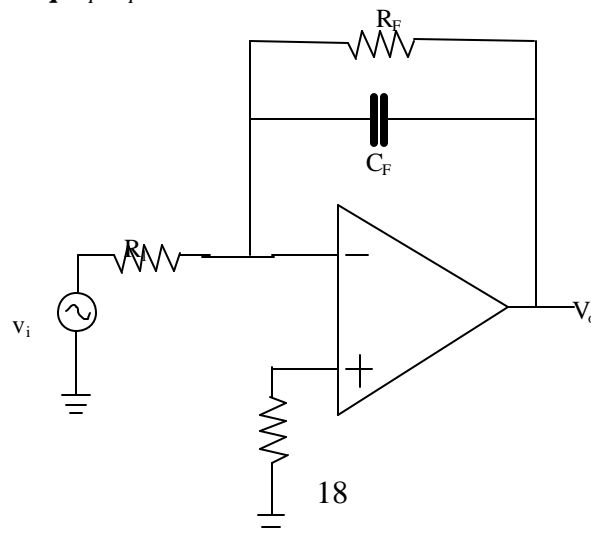


Gambar 2.29

Rangkaian integrator op-amp sederhana

Perhitungan nilai untuk R_F berkaitan dengan komponen lainnya yaitu $f_a < f_b$ dimana rumus f_a adalah :

$$f_b = \frac{1}{2\pi R_1 C_F} \quad , \quad f_a = \frac{1}{2\pi R_F C_F} \quad , \quad \text{misal } f_a = f_b / 10$$



Gambar 2.30
Rangkaian integrator op-amp untuk aplikasi (praktis)

2.10 Filter Aktif

Pada rangkaian dibagian listrik sering disebut rangkaian seleksi frekuensi untuk melewatkan band frekuensi tertentu dan menahannya dari frekuensi diluar band itu. Filter dapat diklasifikasikan dengan arahan :

1. Analog atau digital
2. Pasif atau aktif
3. Audio (AF) atau radio frekuensi (RF)

Filter analog dirancang untuk memproses sinyal analog, sedang filter digital memproses sinyal analog dengan menggunakan teknik digital. Filter tergantung dari tipe elemen yang digunakan pada rangkaianannya, filterakan dibedakan pada filter aktif dan filter pasif. Elemen pasif adalah tahanan, kapasitor dan induktor. Filter aktif dilengkapi dengan transistor atau op-amp selain tahanan dan kapasitor. Tipe elemen ditentukan oleh pengoperasian range frekuensi kerja rangkaian . Misal RC filter umumnya digunakan untuk audio atau operasi frekuensi rendah dan filter LC atau kristal lebih sering digunakan pada frekuensi tinggi.

Pertama tama pada bagian ini menganalisa dan merancang filter analog aktif RC menggunakan op-amp. Pada frekuensi audio, induktor tidak sering digunakan karenabadannya besar dan mahal serta menyerab banyak daya. Induktor juga menghasilkan medan magnit.

Filter aktif mempunyai keuntungan dibandingkan filter pasif yaitu :

1. Penguatan dan frekuensinya mudah diatur, selama op-amp masih memberikan penguatan dan sinyal input tidak sekaku seperti pada filter pasif. Pada dasarnya filter aktif lebih gampang diatur.
2. Tidak ada masalah beban, karena tahanan inputtinggi dan tahanan output rendah. Filter aktif tidak membebani sumber input.

3. Harga, umumnya filter aktif lebih ekonomis dari pada filter pasif, karena pemilihan variasi dari op-amp yang murah dan tanpa induktor yang biasanya harganya mahal.

Filter aktif sangat handal digunakan pada komunikasi dan sinyal prosesing, tapi juga sangat baik dan sering digunakan pada rangkaian elektronika seperti radio, televisi, telepon ,radar, satelit ruang angkasa dan peralatan biomedik.

Umumnya filter aktif digolongkan menjadi :

1. Low Pass Filter (LPF)
2. High Pass Filter (HPF)
3. Band Pass Filter (BPF)
4. Band Reject Filter (BPF)
5. All Pass Filter (APF)

Pada masing masing filter aktif menggunakan op-amp sebagai elemen aktifnya dan tahanan , kapasitor sebagai elemen pasifnya. Biasanya dan pada umumnya IC 741 cukup baik untuk rangkaian filterv aktif, namun op-amp dengan high speed seperti LM301, LM318 dan lain lainnya dapat juga digunakan pada rangkaian filter aktif untuk mendapatkan slew rate yang cepat dan penguatan serta bandwidth bidang kerja lebih baik. Gambar output dari filter aktif seperti tampak pada gambar berikut ini, sebagai karakteristik responsi frekuensi dari 5 filter aktif. Responsi idealnya ditunjukkan dengan garis terputus putus.

Low Pass Filter mempunyai penguatan tetap dari 0 Hz sampai menjelang frekuensi cut off f_H . Pada f_H penguatan akan turun dengan -3dB , artinya frekuensi dari 0 Hz sampai f_H dinamakan pass band frekuensi dengan batas $0,707$ tegangan output. Sedang frekuensi yang diredam dibawah -3dB atau $0,707 V_o$ dinamakan stop band frekuensi. Perubahan naik turunnya grafik karakteristik tersebut tergantung dari kualitas komponen selain bentuk rangkaiannya.

Pada gambar b terlihat karakteristik dari high pass filter, artinya adalah frekuensi yang rendah diredam sampai pada frekuensi cut on yang dianggap sebagai batas frekuensi rendahnya sehingga diberi nama f_L . Batasan stop band adalah $0 < f < f_L$ dan untuk pass bandnya adalah $f > f_L$. Untuk menghasilkan bad pass filter dan band reject filter adalah kombinasi antara LPF dan HPF. Bila HPF dirangkai serie dengan LPF maka akan mendapatkan BPF (Band Pass Filter). Sedangkan kombinasi

paralel antara LPF dan HPF akan mendapatkan BRF (Band Reject Filter). Gambar rangkaian bisa dilihat dibagian BPF dan BRF untuk pembahasan lebih lanjut.

Gambar e menerangkan output fasa geser yang dihasilkan oleh All Pass Filter (APF). Pada rangkaian ini sebenarnya bukan termasuk filter tapi juga bisa digolongkan kefilter aktif.

2.10.1 Low Pass Filter (LPF)

Low pass filter yang dibahas disini adalah model butterworth dan beberapa model lainnya antara lain adalah model buffer model inverting.

Seperti tampak pada gambar ini adalah gambar Low Pass Filter Butterworth dengan perhitungan sebagai berikut :

$$v_1 = \frac{-jX_c}{R - jX_c} v_{in}$$

dimana : $j = \sqrt{-1}$ dan $-jX_c = \frac{1}{j2\pi fC}$

didapat : $v_1 = \frac{v_{in}}{1 + j2\pi fRC}$ dan tegangan ouputnya : $v_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) v_1$

Jadi persamaannya : $v_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{v_{in}}{1 + j(f/f_H)}$

Dimana : $\frac{v_o}{v_1}$ = penguatan filter fungsi frekuewsi

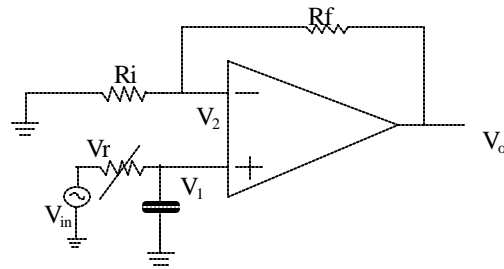
$$A_F = 1 + \frac{R_F}{R_1} = \text{penguatan pass band dari filter}$$

f = frekuensi sinyal input

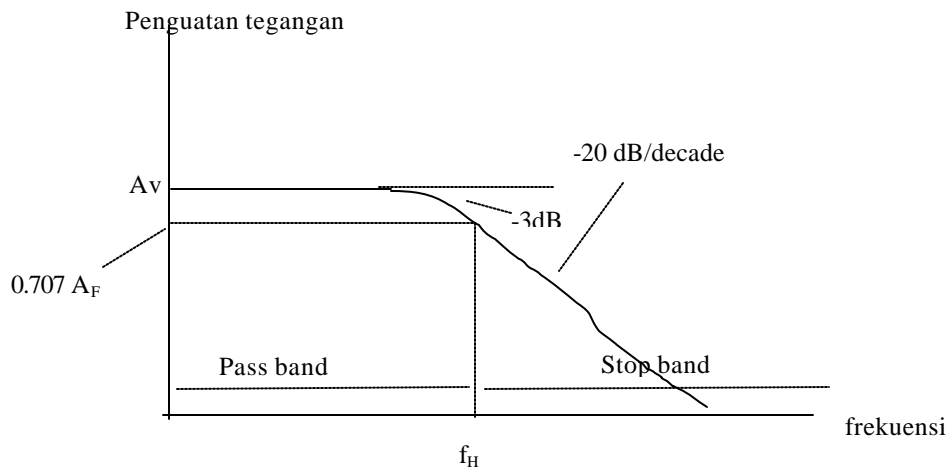
$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \text{cut off frekuensi tinggi dari filter}$$

Sudut fasa yang terjadi pada Low PassFilter ini adalah :

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}} \quad \text{sehingga sudutnya adalah : } \Phi = -\tan^{-1}\left(\frac{f}{f_H}\right)$$



Gambar 2.31
Rangkaian Low Pass Filter 20 dB



Gambar 2.32
Frekuensi respon dari LPF

Pengoprasian dari Low Pass Filter ini ada 3 macam yaitu :

1. Pada frekuensi yang sangat rendah yaitu : $f < f_H$,

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| \cong A_F$$

2. Pada $f = f_H$,

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{A_F}{\sqrt{2}} = 0.707 A_F$$

3. Pada $f > f_H$,
$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| < A_F$$

Jadi Low Pass Filter akan konstan dari input 0 Hz sampai cut off frekuensi tinggi f_H . Pada f_H penguatannya menjadi $0.707 A_F$ dan setelah melewati f_H maka akan menurun sampai konstan dengan seiring penambahan frekuensi. Frekuensi naik 1 decade maka penguatan tegangan dibagi 10. Dengan kata lain, penguatan turun 20 dB ($=20 \log 10$) setiap kenaikan frekuensi dikali 10. Jadi rate dari penguatan berulang turun 20dB/decade setelah f_H terlampaui. Saat $f_{in} = f_H$, dikatakan frekuensi cut off yang saat itu turun 3dB ($=20 \log 0.707$) dari 0 Hz. Persamaan lain menyatakan untuk frekuensi cut off terjadi -3 dB, break frekuensi, ujung frekuensi.

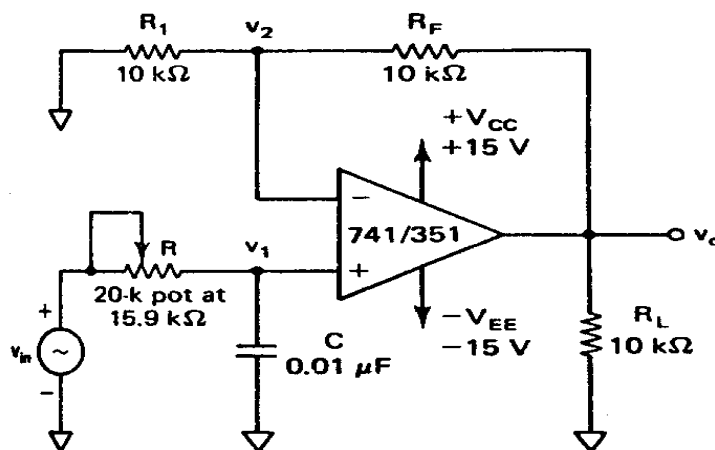
Contoh soal :

Rancanglah LPF dengan cut off 1KHz dan penguatan passband = 2

Penyelesaian :

Langkah :

1. $f_H = 1$ KHz
2. Misal $C = 0.01$ μF
3. Maka $R = 1/(2\pi)(10^3)(10^{-8}) = 15.9$ $K\Omega$ (menggunakan potensio $20K\Omega$)
4. Karena $A_v = 2$, maka R_1 dan R_F harus sama, maka $R_1 = R_F = 10K\Omega$
5. Gambar rangkaian adalah sebagai berikut :

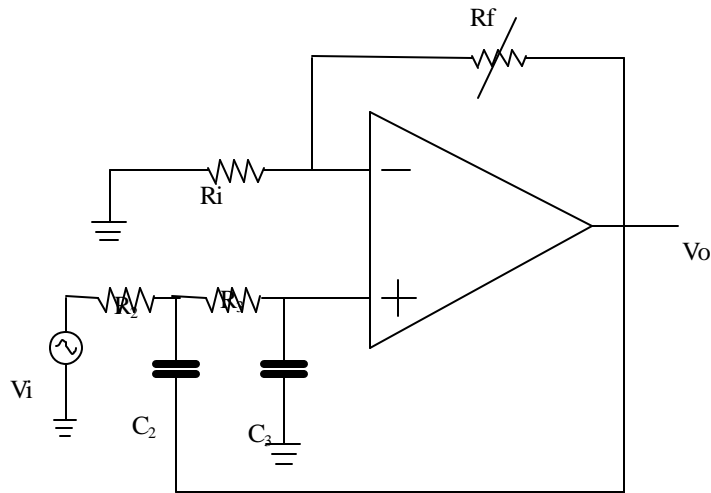


Gambar 2.33
Rangkaian LPF hasil perhitungan

2.10.2 Low Pass Filter order kedua (-40dB)

Rangkaian LPF dengan -40 dB ini memerlukan komponen pasif lebih banyak (tahanan dan kapasitor). Seperti tampak pada gambar, maka perhitungan frekuensi cut off nya adalah ditentukan oleh nilai komponen R_2 , R_3 , C_2 dan C_3 seperti berikut ini :

$$f_H = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_2R_3C_2C_3}}$$



Gambar 2.34
Rangkaian Low Pass Filter dengan -40 dB

Pada rangkaian LPF dengan -40 dB ini persamaan penguatan tegangan absolutnya adalah:

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{A_F}{\sqrt{1 + (f / f_H)^4}}, \quad A_F = 1.586 \text{ (ketentuan Butterworth untuk order kedua)}$$

kedua)

Contoh soal :

Rancanglah LPF dengan order kedua (-40 dB) dengan $f_H = 1$ KHz. Gambarkan rangkaiannya

Penyelesaian :

Langkah langkah :

1. $f_H = 1$ KHz

2. Misal $C_2 = C_3 = 0.0047 \text{ mF}$

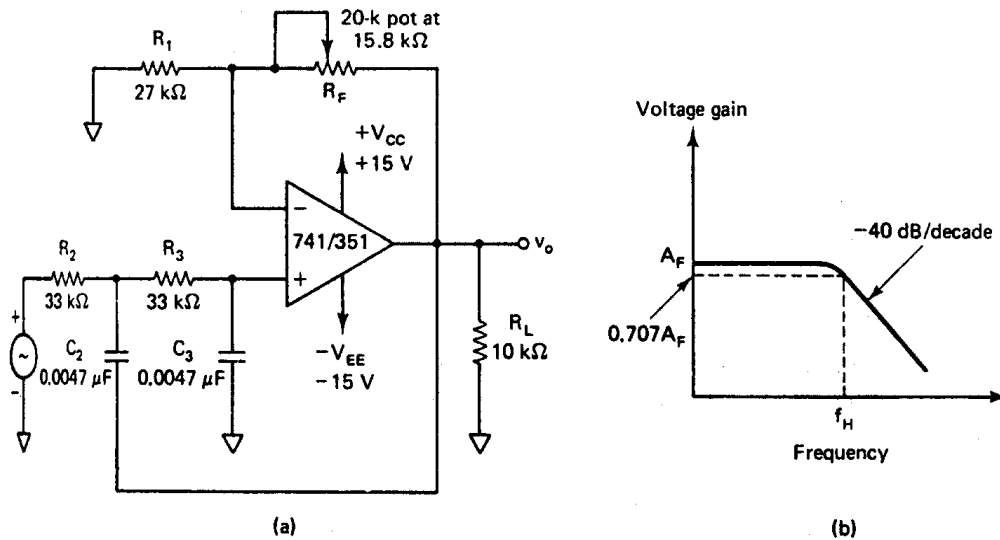
3. $R_2 = R_3 = \frac{1}{(2p)(10^3)(47)(10^{-10})} = 33.86 \text{ KHz}$, digunakan 33KHz

4. Menurut responsi teori **Butterworth** , bahwa $A_F = 1,586$ untuk order kedua, maka nilai R_F dan R_i adalah : Misal $R_i = 27 \text{ K}\Omega$, maka

$$\left(1 + \frac{R_F}{27 \text{ K}\Omega}\right) = 1.586 \text{ sehingga } R_F \text{ menjadi } R_F = (0.586)(27 \text{ K}\Omega) = 33.86 \text{ K}\Omega$$

R_F dipasang potensiometer sebesar $20 \text{ K}\Omega$.

5. Rangkaian LPF yang dimaksud adalah



Gambar 2.35

Rangkaian hasil perhitungan dan tegangan output terhadap frekuensi

2.10.3 High Pass Filter 20dB

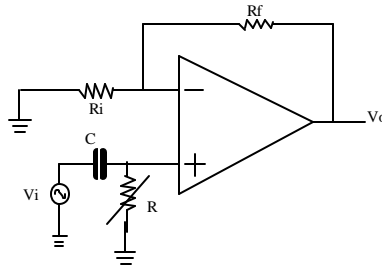
Rangkaian High Pass Filter ini perbedaannya dengan Low Pass Filter hanya perpindahan tempat tahanan dan kapasitor. Perhitungan outputnya sebagai berikut :

$$v_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \frac{j2p f RC}{1 + j2p f RC} v_{in} \text{ atau } \frac{v_o}{v_i} = A_F \left[\frac{j(f/f_L)}{1 + j(f/f_L)} \right]$$

dimana : $A_F = 1 + \frac{R_F}{R_1} =$

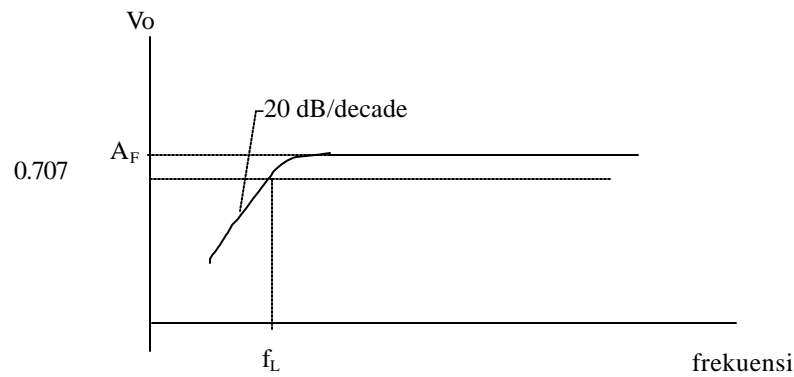
$$f_L = \frac{1}{2\pi RC}$$

Penguatan tegangan absolut : $\left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \frac{A_F (f / f_L)}{\sqrt{1 + (f / f_L)^2}}$



Gambar 2.36
Rangkaian High Pass Filter -20 dB

Grafik tegangan output terhadap frekuensi adalah :



Gambar 2.37
Output High Pass Filter Vo vs frekuensi

2.10.4 High Pass Filter order kedua (-40dB)

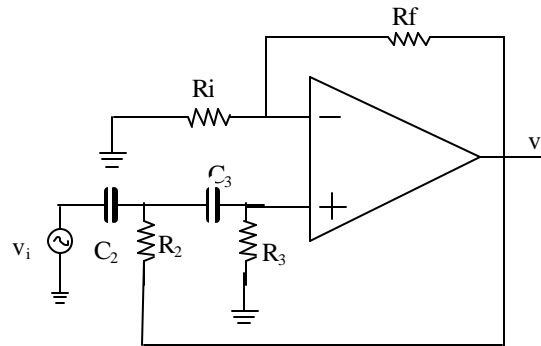
Seperti halnya pada LPF order kedua, HPF order kedua ini cirinya sama, maka persamaan yang terjadi adalah :

$$f_L = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_2 R_3 C_2 C_3}}$$

Dan persamaan untuk penguatan tegangan absolut adalah :

$$\left| \frac{v_o}{v_{in}} \right| = \frac{A_F}{\sqrt{1 + (f_L / f)^4}}, \text{ dengan ketentuan } A_F = 1.586$$

Gambar rangkaiannya adalah sebagai berikut :



Gambar 2.38

High Pass Filter order kedua (-40dB)

Untuk mendapatkan order dalam filter yang lebih tinggi didapat dari serie dari order satu dengan order dua yang menghasilkan order ketiga. Sedangkan order dua diserie dengan order dua, maka menghasilkan filter dengan order keempat.

2.10.5 Band Pass Filter (BPF)

Pada BPF ini ada 2 macam rangkaian yaitu BPF bidang lebar dan BPF bidang sempit. Untuk membedakan kedua rangkaian ini adalah dilihat dari nilai **figure of merit (FOM)** atau **Faktor kualitas (Q)**.

Bila $Q < 10$, maka digolongkan BPF bidang lebar.

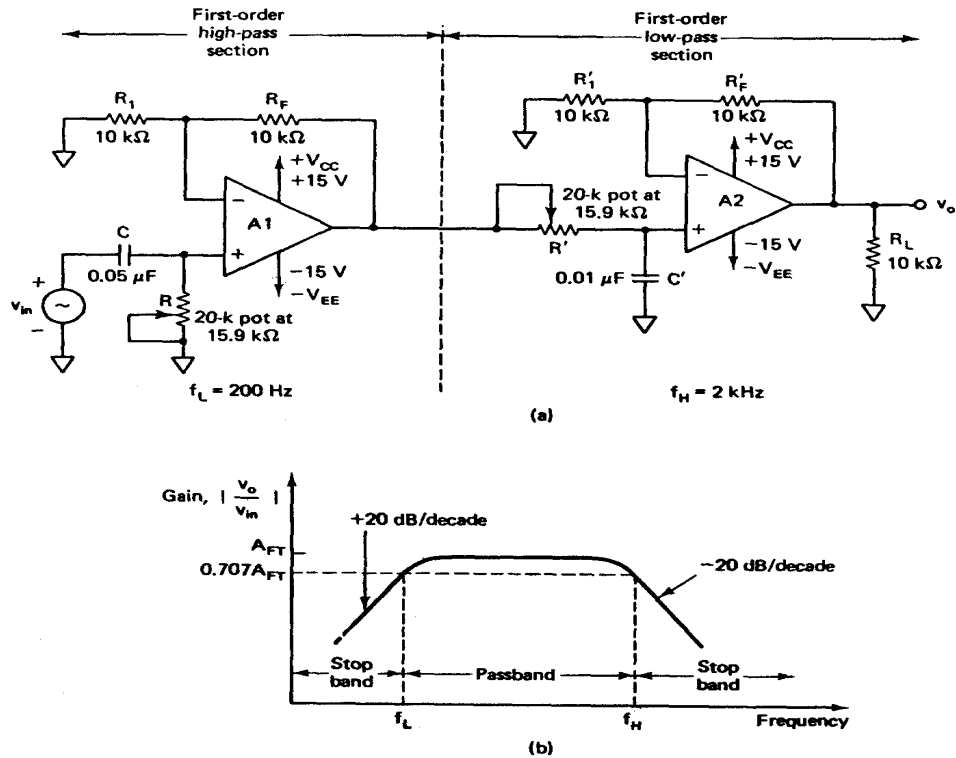
Bila $Q > 10$, maka digolongkan BPF bidang sempit.

Perhitungan faktor kualitas (Q) adalah $Q = \frac{f_c}{BW} = \frac{f_c}{f_H - f_L}$

Sedangkan $f_c = \sqrt{f_H f_L}$

2.10.5.1 Band Pass Filter Bidang Lebar

Syarat BPF bidang lebar adalah $Q < 10$, biasanya didapat dari 2 rangkaian filter HPF dan LPF yang mereka saling di serie dengan urutan tertentu dan frekuensi cut off harus tertentu. Misalnya urutan serie adalah HPF disusul LPF, dan f_L dari HPF harus lebih kecil dari f_H dari LPF. Contoh rangkaian dan perhitungannya adalah seperti gambar berikut.



Gambar 2.39

Rangkaian BPF bidang lebar

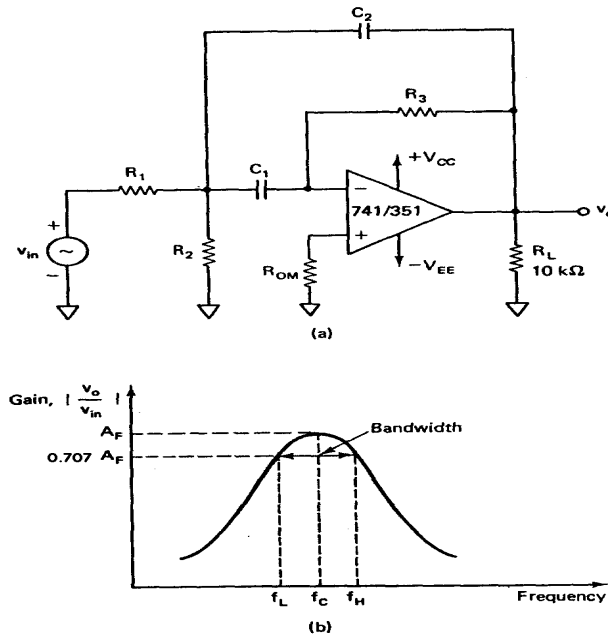
Nilai penguatan tegangan absolutnya adalah :

$$\left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \frac{A_{FT} (f / f_L)}{\sqrt{[1 + (f / f_L)^2] [1 + (f / f_H)^2]}}$$

2.10.5.2 Band Pass Filter bidang sempit

Syarat BPF bidang sempit adalah $Q > 10$. Rangkaian yang digunakan bisa seperti gambar diatas tapi ada rangkaian khusus untuk BPF bidang sempit. Rangkaian khusus inipun bisa pula digunakan untuk BPF bidang lebar, tapi spesialisnya untuk bidang sempit. Rangkaian ini sering disebut multiple

feedback filter karena satu rangkaian menghasilkan 2 batasan f_L dan f_H . Gambar rangkaian serta contoh bandwidth bidang sempit diberikan seperti berikut ini. Persamaan persamaannya pun beda dan tersendiri. Komponen pasif yang digunakan sama dengan komponen pasif dari LPF dan HPF.



Gambar 2.40

Rangkaian Band Pass Filter Bidang Sempit

Perhitungan dari rangkain diatas adalah :

Dipilih $C_1 = C_2 = C$

Hubungan nilai tahanannya adalah :

$$R_1 = \frac{Q}{2pf_c CA_F}$$

$$R_2 = \frac{Q}{2pf_c C(2Q^2 - A_F)}$$

$$R_3 = \frac{Q}{pf_c C}$$

dimana nilai A_F saat pada f_c adalah

$$A_f = \frac{R_3}{2R_1} < 2Q^2$$

Perlu diingat bahwa,

$$Q = \frac{f_c}{BW} = \frac{f_c}{f_H - f_L} \quad \text{dan} \quad f_c = \sqrt{f_H f_L}$$

Ada keuntungan rangkaian ini adalah bila ingin mengganti frekuensi centernya f_c , maka tinggal mengganti nilai R_2 saja. Nilai yang baru adalah R_2'

$$R_2' = R_2 \left(\frac{f_c}{f_c'} \right)^2$$

2.10.6 Band Reject Filter

Rangkaian Band Reject Filter ada 2 macam yaitu

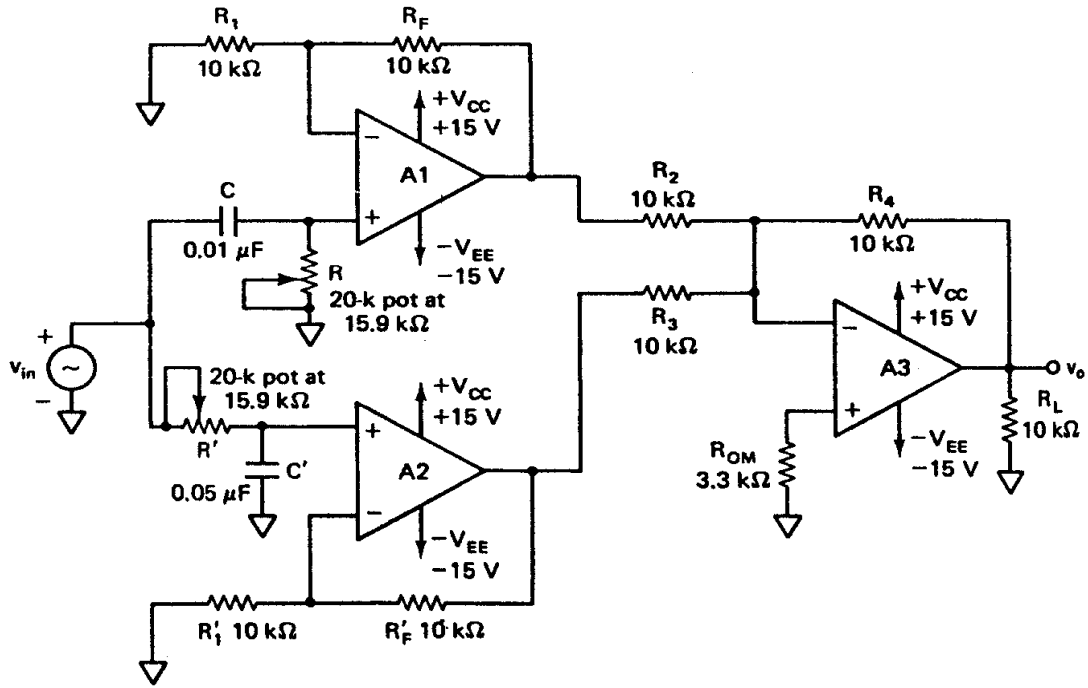
BRF bidang lebar

BRF bidang sempit

2.10.6.1 Band Reject Filter Bidang Lebar

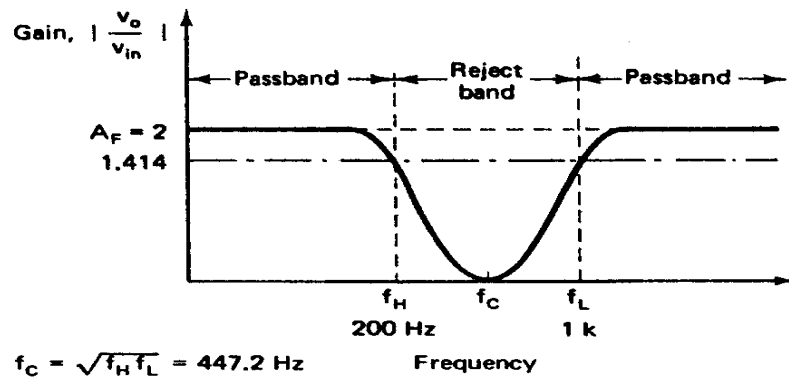
BRF bidang lebar adalah terdiri dari rangkaian HPF dan LPF yang dimasukkan ke rangkaian penjumlah. Sedang BRF bidang sempit adalah terkenal dengan rangkaian Notch Filter yaitu menolak frekuensi tertentu.

Contoh rangkaian Band Reject Filter bidang lebar seperti gambar berikut ini.



Gambar 2.41

Rangkaian Band Reject Filter Bidang Lebar



Gambar 2.42

Responsi output Band Reject Filter Bidang Lebar

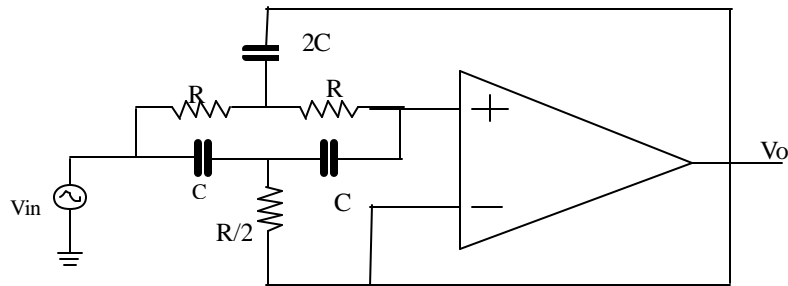
Rumus rumus untuk LPF dan HPF serta rangkaian penjumlah berlaku untuk menentukan nilai nilai komponen atau elemen pasif yang digunakan untuk rangkaian band reject filterbidang lebar ini.

2.10.6.2 Band Reject Filter Bidang Sempit

Nama band reject filter bidang sempit ini sering dikenal dengan nama Aktif Notch Filter. Rangkaian menggunakan model twin-T circuit. Biasanya rangkaian aktif Notch Filter ini digunakan pada rangkaian medika. Rumus untuk rangkaian ini adalah :

$$f_N = \frac{1}{2pRC}$$

Gambar rangkaian nya adalah sebagai berikut :

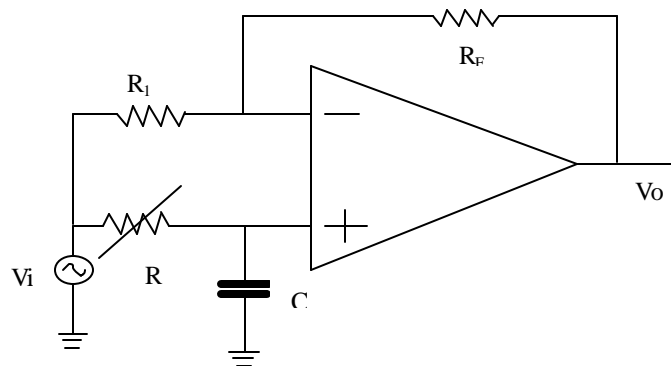


Gambar 2.43

Rangkaian Notch Filter

2.10.7 All Pass Filter (APF)

Rangkain APF ini bisa dikatakan pula bukan termasuk rangkaian filter karena tidak ada yang di filter. Rangkaian ini terkenal dengan nama delay equalizer atau phase corector, karena berhubungan dengan fungsi rangkaian dalam aplikasinya. Rangkain ini sering digunakan pada sinyal telkomunikasi untuk mencocokkan fasa sinyalnya atau sengaja membuat selisih dengan aslinya, dan juga terdapat pada aplikasi yang lainnya misalnya digunakan untuk stereo buatan di audio, atau untuk penggetar suara pada gitar elektrik, dan lain lain.



Gambar 2.44 Rangkaian All Pass Filter

Perhitungan rumusnya:

Dengan menyamakan $R_1 = R_F$ tegangan outputnya diperoleh dari teori superposisi seperti :

$$v_o = -v_{in} + \frac{-jX_C}{R - jX_C} v_{in} \cdot 2$$

$$-j = 1/j \text{ dan } X_C = 1/2\pi fC$$

$$v_o = v_{in} \left(-1 + \frac{2}{j2\pi fRC + 1} \right) \text{ atau } \frac{v_o}{v_{in}} = \frac{1 - j2\pi fRC}{1 + j2\pi fRC}$$

dimana f adalah frekuensi input

Sudut fasanya adalah

$$\angle = -2 \tan^{-1} \left(\frac{2\pi fRC}{1} \right)$$

2.11 Oscilator

Sampai sejauh ini dipelajari pada op-amp misalnya untuk segala macam penguatan dan filter filter aktif. Pada bagian ini menjelaskan op-amp untuk oscilator yang dapat diatur atur frekuensi outputnya dengan gelombang yang bervariasi pula. Pada dasarnya fungsi oscilator adalah sinyal AC atau gelombang tegangan saja. Lebih spesifik lagi, oscilator adalah proses pengulangan bentuk gelombang tertentu pada amplitudo dan frekuensi yang tetap tanpa eksternal input. Oscilator sering digunakan pada radio, televisi, komputer, dan pesawat komunikasi. Oscilator terdiri dari beberapa macam jenisnya, walaupun begitu, oscilator oscilator itu mempunyai prinsip kerja yang sama.

2.11.1 Prinsip kerja oscilator

Oscilator adalah amplifier umpan balik (feed back) yang outputnya diumpan balikkan keinput melalui rangkaian umpan baliknya. Kalau sinyal umpan baliknya adalah suatu besaran atau fasa, maka rangkaian akan menghasilkan sinyal bolak balik atau tegangan. Asal usul oscilator dinyatakan pada gambar berikut ini yang menerangkan awal mula tidak ada tegangan input. Prinsip kerja ini dinamakan umpan balik positif (positif feed back). Persamaannya adalah :

$$v_d = v_f + v_{in}$$

$$v_o = A_v v_d$$

$$v_f = B v_o$$

Dengan menggunakan hubungan ini maka persamaan menjadi

$$\frac{v_o}{v_{in}} = \frac{A_v}{1 - A_v B}$$

Dimana $v_{in} = 0$ dan $v_o \neq 0$ didapat $A_v B = 1$

Dialihkan kebentuk polar adalah : $A_v B = 1 \left| 0^\circ \text{ atau } 360^\circ \right.$

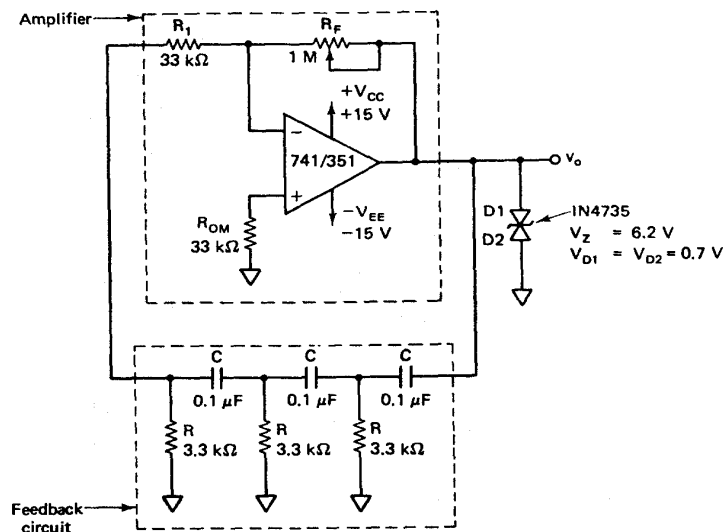
2.11.2 Oscilator fasa geser

Oscilator ini terdiri dari rangkaian RC kaskade sebagai rangkaian feedbacknya. Rangkaian feedback adalah rangkaian output memberikan ke input penguat. Penguat menggunakan inverting amplifier, maka ada beberapa sinyal yang diproses terbalik (invert) dengan beda 180° ke output. Yang membuat perbedaan 180° ke output itu adalah rangkaian RC kaskade sebagai rangkaian feedback. Frekuensi yang dihasilkan berdasarkan perhitungan matematika tentang fasa ini dengan cara matrik, maka didapat persamaan sebagai berikut :

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}} = \frac{0.065}{RC}$$

Pada penguatan tertentu sekurang kurangnya 29 yaitu :

$$\left| \frac{R_F}{R_1} \right| = 29$$



Gambar 2.45

Rangkaian oscilator fasa geser (phase shift)

2.11.3 Oscilator Jembatan Wien

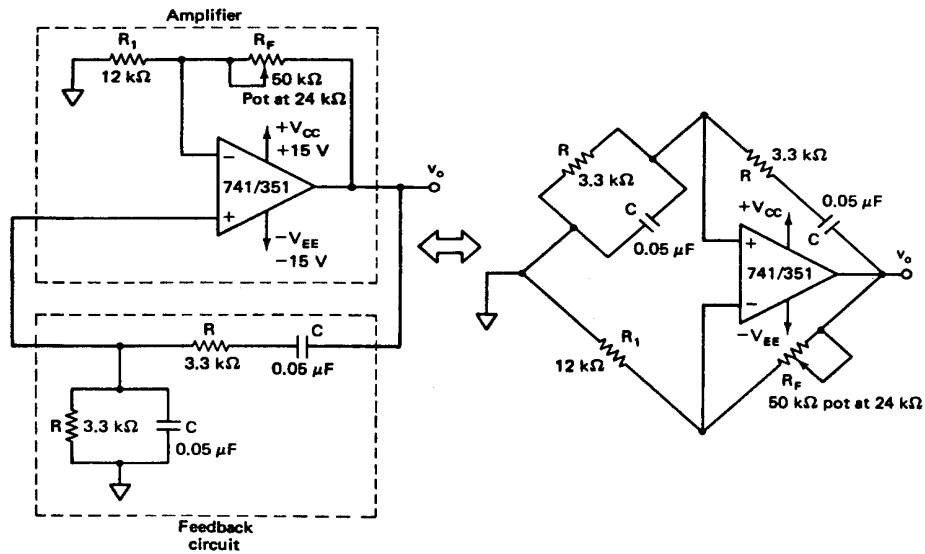
Karena ringkasnya dan stabilnya dari output oscilator dan sering digunakan pada audio-frekuensi adalah rangkaian oscilator jembatan Wien. Output rangkaian ini adalah :

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{0.159}{RC}$$

Penguatan tegangannya adalah : $A_v = \frac{1}{B} = 3$

Jadi $1 + \frac{R_F}{R_1} = 3$ atau $R_F = 2R_1$

Gambar berikut ini adalah contoh Jembatan Wien Oscilator dengan output $f_o = 965$ Hz



Gambar 2.46

Rangkaian Oscilator Jembatan Wien

2.11.4 Rangkaian Oscilator Quadrature (Quadrature Oscilator Circuit)

Rangkaian oscilator ini menghasilkan 2 output dengan perbedaan fasa 90° yaitu berupa gelombang sinus dan gelombang cosinus. Ada 2 op-amp yang digunakan, untuk op-amp pertama

beroperasi pada rangkaian noninverting sebagai noninverting integrator. Untuk op-amp yang kedua beroperasi pada integrator murni. Frekuensi oscilasi yang terjadi adalah :

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

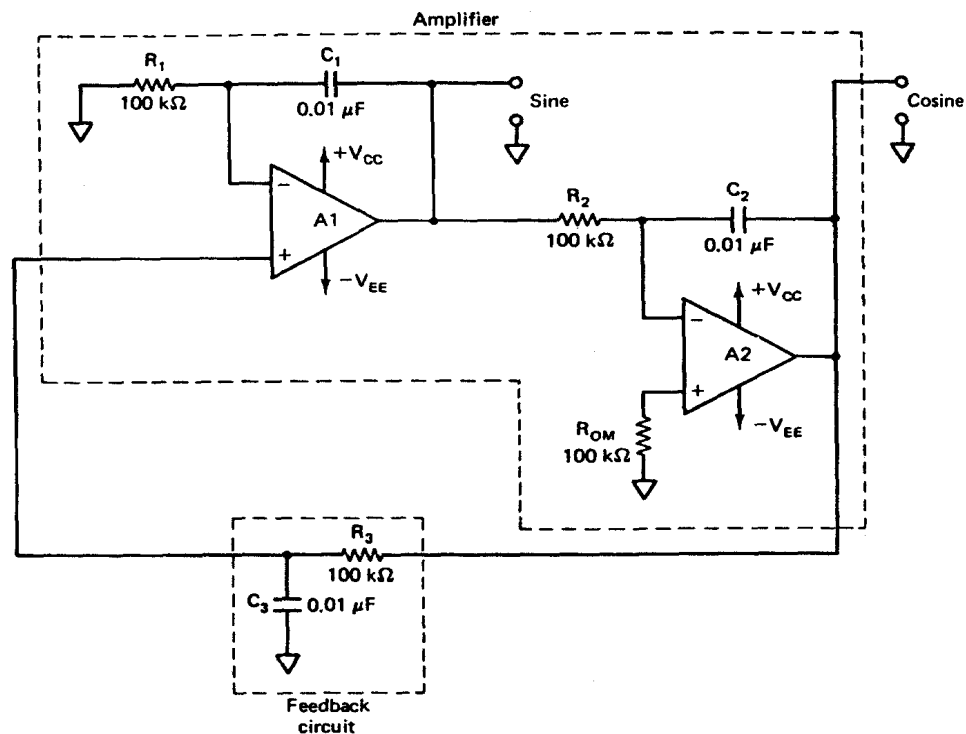
$$R_1 C_1 = R_2 C_2 = R_3 C_3 = RC \quad \text{dan} \quad A_v = \frac{1}{B} = 1.414$$

Contoh bila $f_o = 159 \text{ Hz}$

$$\text{Ditentukan } C = 0.01 \text{ } \mu\text{F}, \text{ maka } R = \frac{0.159}{(159)(10^{-8})} = 100 \text{ k}\Omega$$

Untuk mendapatkan koreksi kesalahan atau melesetnya nilai komponen bisa diganti R_1 dengan potensio yang bernilai $200 \text{ k}\Omega$.

Gambar rangkaian oscilator quadrature adalah seperti berikut ini.



Gambar 2.47

Quadrature Oscillator

2.11.5 Oscilator gelombang segi empat

Rangkaian ini seperti rangkaian komparator tapi ada komponen C pada kakki inverting. Sinyalnya adalah saturasi positif dan negatif.

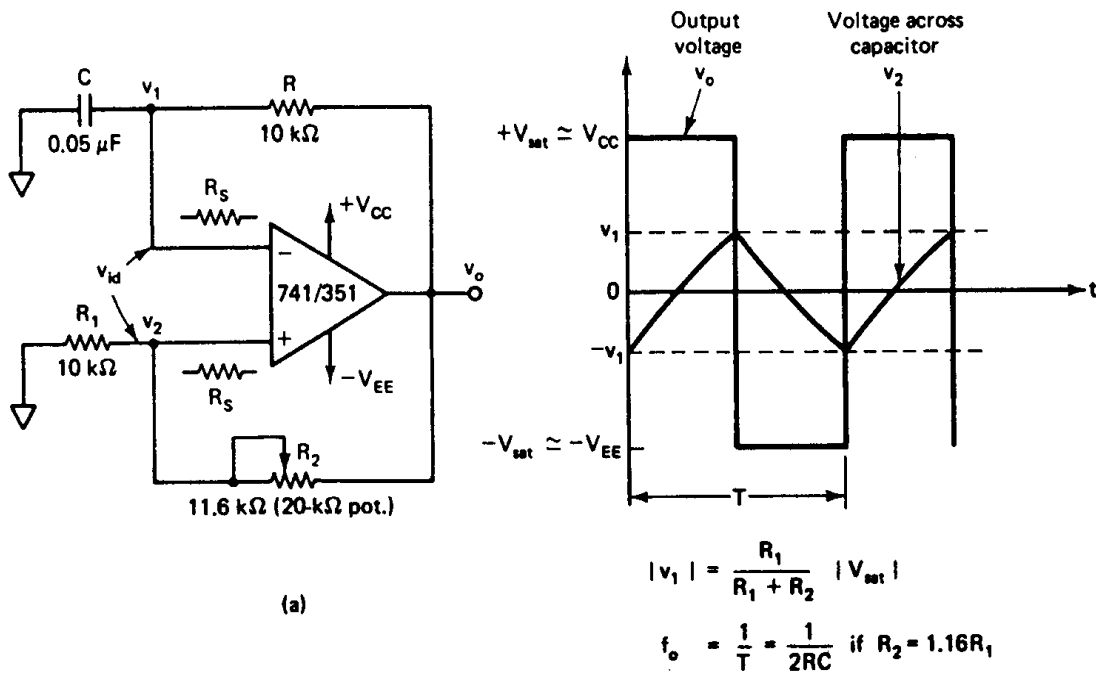
Perhitungannya :

$$v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{sat}) \quad \text{dan} \quad v_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+V_{sat})$$

$$T = 2RC \ln \left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1} \right) \quad \text{atau} \quad f_o = \frac{1}{2RC \ln \left[\frac{2R_1 + R_2}{R_1} \right]}$$

Untuk $R_2 = 1.16R_1$ maka nilai $f_o = \frac{1}{2RC}$

Gambar rangkaian seperti berikut ini



Gambar 2.48

Rangkaian Oscilator segi empat

2.11.6 Oscilator gelombang segitiga

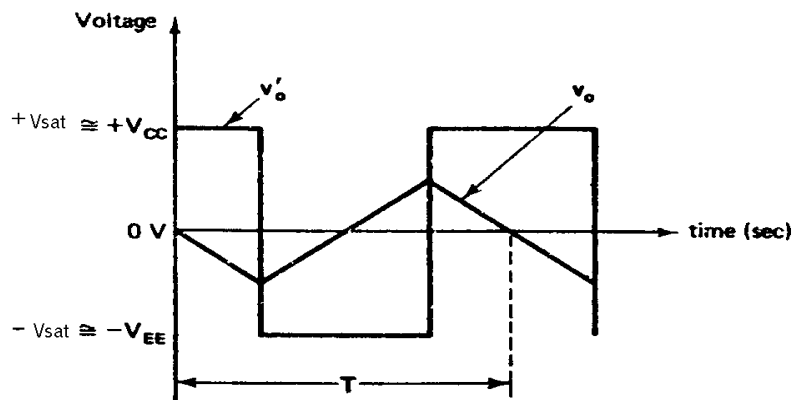
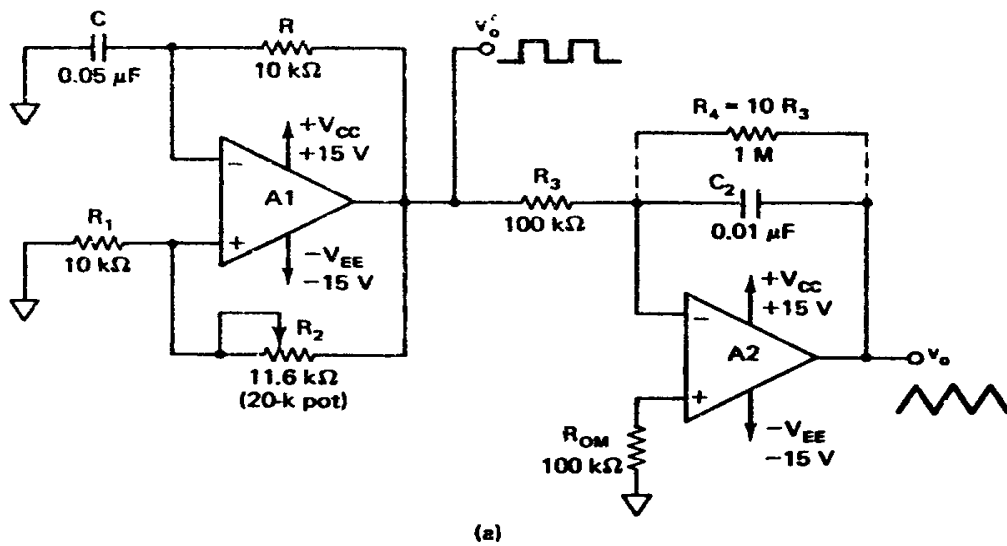
Rangkaian segitiga ada 2 macam cara membuatnya yaitu :

- a. Dari rangkaian oscilator segi empat yang dilanjutkan ke integrator
- b. Dari kombinasi rangkaian komparator dan integrator yang menghasilkan segitiga

Rangkaian dari oscilator segiempat ke integrator sama rumusnya yaitu untuk mencari frekuensi osilasinya adalah:

$$T = 2RC \ln \left(\frac{2R_1 + R_2}{R_1} \right) \quad \text{atau} \quad f_o = \frac{1}{2RC \ln \left[\frac{(2R_1 + R_2)}{R_2} \right]}$$

Untuk $R_2 = 1.16R_1$ maka nilai $f_o = \frac{1}{2RC}$



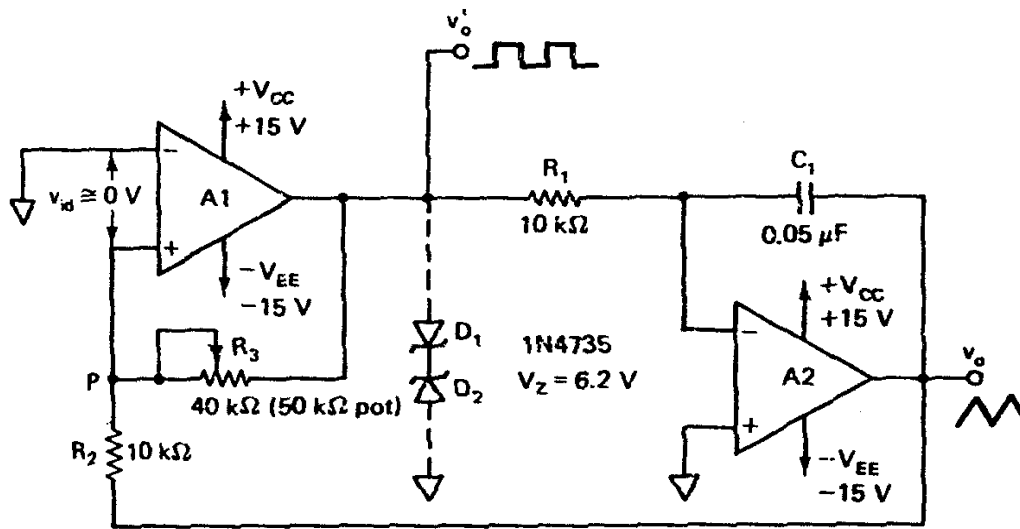
Gambar 2.49

Rangkaian Oscilator ouput segi tiga kesatu

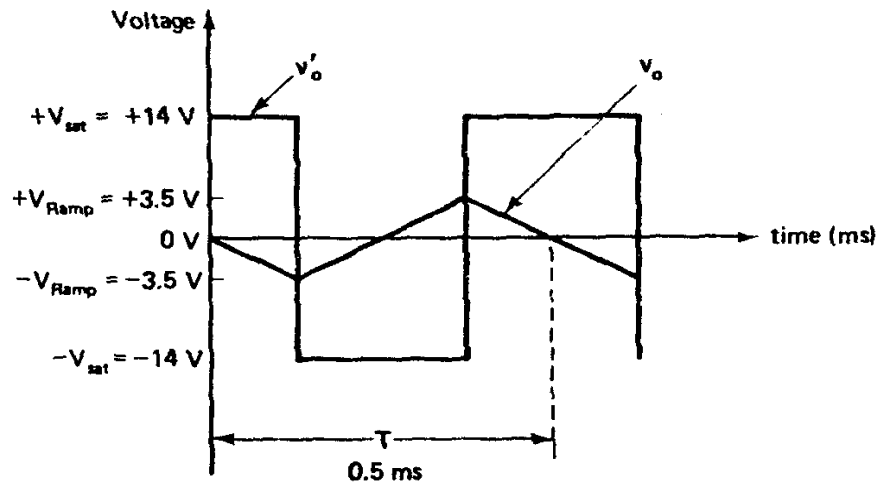
Untuk rangkaian yang lain adalah kombinasi antara rangkaian komparator dan rangkaian integrator
rumusnya adalah :

$$f_o = \frac{R_3}{4R_1C_1R_2}$$

Rangkaian nya adalah seperti gambar berikut ini.



(a)



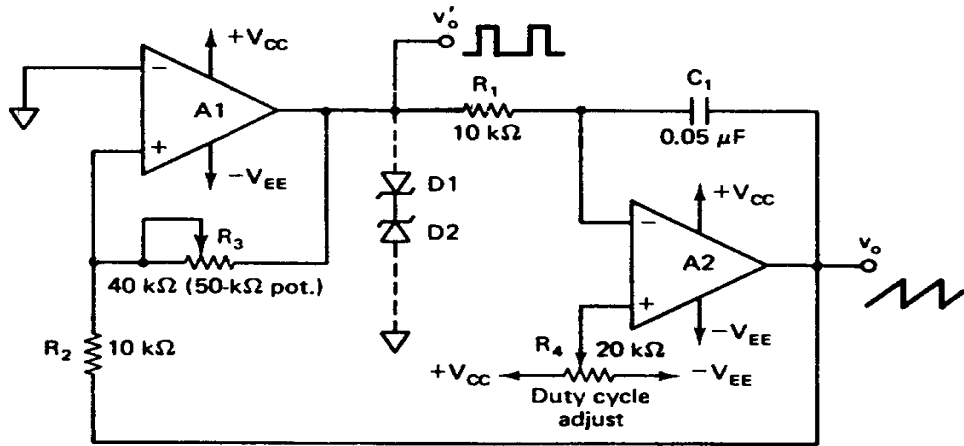
Gambar 2.50

Rangkaian oscilator gelombang segi tiga kedua

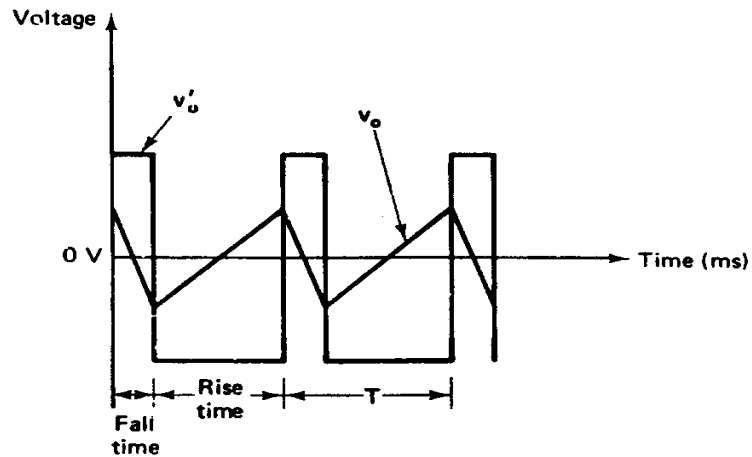
2.11.7 Rangkaian Oscilator gelombang segitiga gergaji

Rangkaian oscilator segitiga gigigergaji ini adalah sama dengan segitiga biasa cuma hanya ada penambahan potensiometer yang diletakkan pada kaki noninverting dengan nilai 20 K Ω .

Rangkaiannya terlihat seperti gambar berikut ini.



(a)



(b)

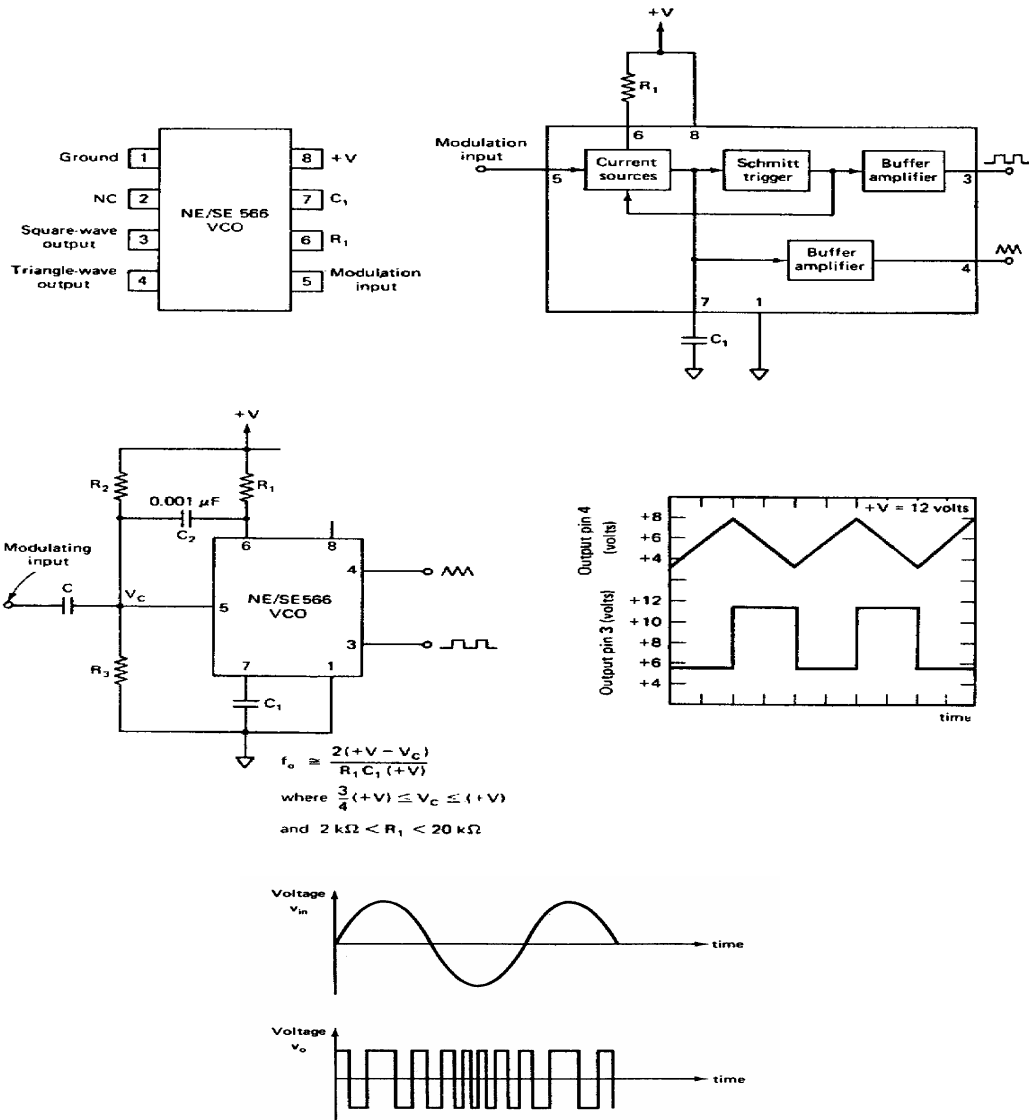
Gambar 2.51 Rangkaian segitiga gigi gergaji

Untuk rangkaian ini adalah kombinasi antara rangkaian komparator dan rangkaian integrator tapi duty cycle pulsanya tidak selalu 50 % dan tergantung dari pengaturan potensiometer yang terpasang ,rumusnya adalah :

$$f_o = \frac{R_3}{4R_1C_1R_2}$$

2.11.8 Voltage Control Oscillator (VCO)

Adalah oscilator yang ouput frekuensinya tergantung dari input rangkaian seperti gambar rangkaian berikut ini.



Gambar 2.52
Rangkaian Voltage Control Oscilator dan hasilnya