

MODUL I

SISTEM INSTRUMENTASI ELEKTRONIKA

Tujuan : Menjelaskan bagian-bagian dari Sistem Instrumentasi Elektronika

Pokok-pokok Bahasan

- Definisi Sistem Instrumentasi Elektronika
- Bagian dari Sistem Instrumentasi Elektronika
- Contoh Sistem Instrumentasi Elektronika
- Definisi-definisi dalam Sistem Instrumentasi Elektronika

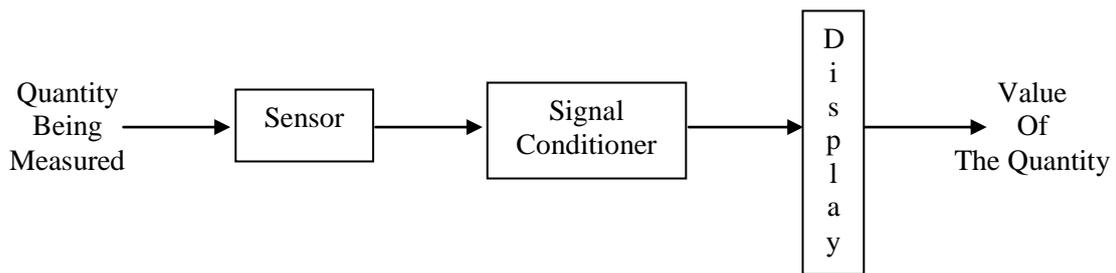
Daftar Pustaka

- Rangan Sarma : Instrumentasi Devices And Sistem
- W. Bolton : Mechatronic
- William D.Cooper : Electronic Instrumentasi And
Measurement Technique

1. Bagian – bagian Sistem Instrumentasi Elektronika dan beberapa definisi dalam instrumentasi

Mempelajari pengukuran besaran-besaran fisis dengan bantuan peralatan elektronik.

Secara umum Sistem Instrumentasi Elektronik terdiri dari tiga bagian seperti terlihat pada gambar 1.1



Gambar 1.1 Sistem Instrumentasi

1. Sensor which respond to the quantity being measured by giving as its output a signal which is related to the quantity

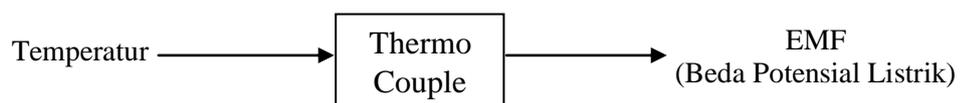
Definisi lain :

Sensor / Transduser adalah suatu alat yang dapat mengubah suatu besaran fisis menjadi besaran fisis yang lain.

Untuk keperluan Sistem Instrumentasi Elektronik, transduser yang digunakan yang mempunyai output besaran listrik.

Contoh :

Kuantitas yang ingin kita ukur adalah temperatur, supaya temperatur dapat dibaca secara elektronik maka digunakan sensor termo kopel (Thermocouple).



Gambar 1.2

Beda potensial listrik yang dihasilkan sebanding dengan tinggi rendahnya temperature.

2. A Signal Conditioner

Which takes the signal from sensor and convert it into a condition which is suitable for either display.

Ex :

Keluaran dari sensor termokopel adalah tegangan yang masih lemah, maka pada “ signal Conditioner ” (pengkondisian) sinyal ini diperkuat dalam hal ini alat pengkondisian sinyal adalah Penguat Instrumentasi (Ampli), lebih lengkap lagi sinyal yang telah diperkuat tadi tumbuh menjadi data digital (ADC) kemudian dicacah secara digital untuk selanjutnya masuk ke bagian display.

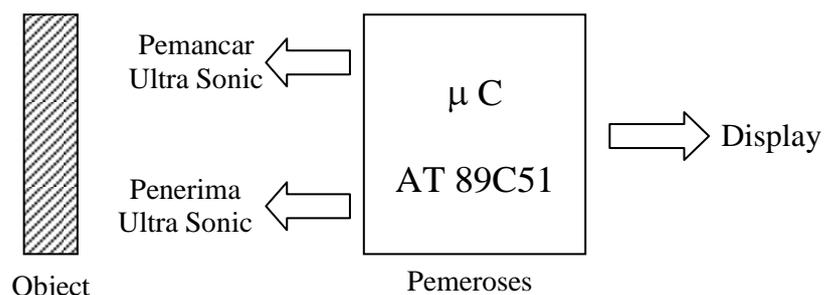
3. A Display Sistem

A Display sistem where the output from signal conditioner is displayed.

Contoh-contoh display

1. Printer
2. Layar Monitor
3. Jarum
4. Seven Segment
5. LCD

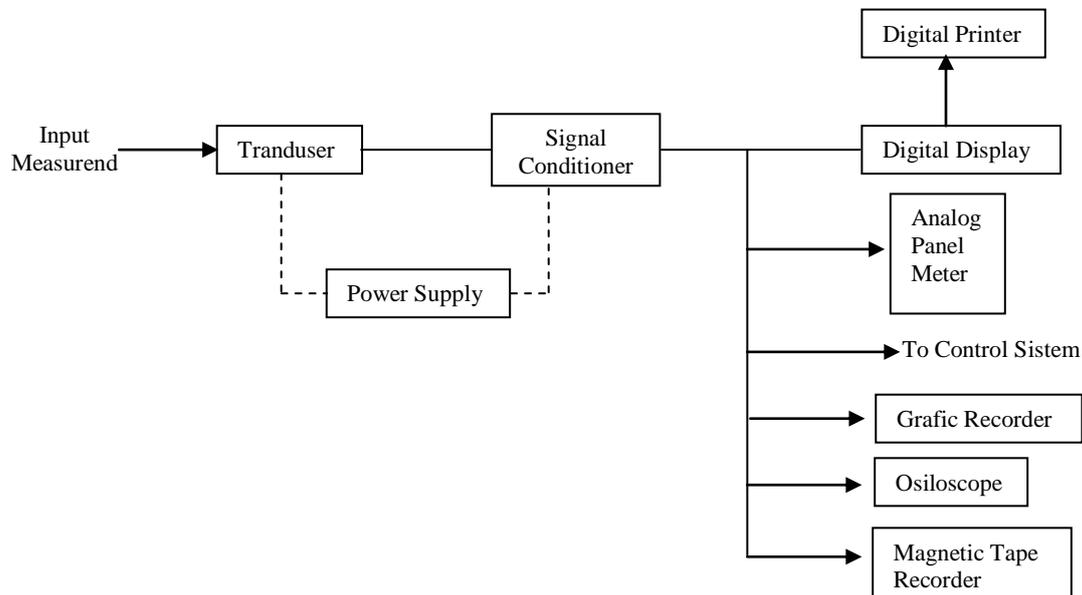
Contoh : Sistem Instrumentasi Elektronik



Gambar 1.3 Pengukuran jarak dengan media ultra sonic dan pengolah signal mikro kontroler

“ Konfigurasi Sistem Pengukuran “

Dapat dijelaskan seperti pada gambar dibawah ini :



Gambar 1.4 Konfigurasi Sistem Pengukuran

- a. The Tranduser
Which Convert the measured into a useable electrical output.
- b. The Signal Conditioner
Which Convert the tranduser output into an electrical quantity suitable for control recording and display.
- c. The Display or red out devices which display the required information about the measurand, generally in engineering units.

Beberapa definisi dalam Pengukuran

Instrument : Sebuah alat untuk menentukan nilai atau kebesaran suatu kuantitas atau variable

Ketelitian (Accuracy)

Harga terdekat dengan mana suatu pembacaan instrument mendekati harga sebenarnya dari variable yang diukur.

Ketepatan (Precision)

Suatu ukuran kemampuan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang serupa dengan memberikan suatu harga tertentu bagi sebuah variable Ketepatan (presisi) merupakan suatu ukuran tingkatan yang menunjukkan perbedaan hasil pengukuran pada pengukuran – pengukuran yang telah dilakukan secara berurutan

Sensitivitas (sensitivity)

Perbandingan antara sinyal keluaran atau respon instrument terhadap perubahan masukan atau variable yang diukur.

Resolusi (Resolution)

Perubahan terkecil masukan yang dapat direspon oleh instrument

Kesalahan (Error)

Penyimpangan Variable yang diukur dari nilai sebenarnya

Kesalahan-kesalahan umum dapat terjadi karena berbagai sebab dan umumnya dibagi menjadi tiga jenis utama, yaitu :

1. Kesalahan-kesalahan umum (*gross-errors*)

Kebanyakan disebabkan oleh kesalahan manusia, diantaranya adalah kesalahan pembacaan alat ukur, penyetelan yang tidak tepat dan pemakaian instrumentasi yang tidak sesuai, dan kesalahan penaksiran.

2. Kesalahan-kesalahan sistematis (*systematic-errors*)

Disebabkan oleh kekurangan-kekurangan pada instrument sendiri seperti kerusakan atau adanya bagian-bagian yang aus dan pengaruh lingkungan terhadap peralatan atau pemakai.

3. Kesalahan-kesalahan yang tak disengaja (*random-errors*)

Diakibatkan oleh penyebab-penyebab yang tidak dapat langsung diketahui sebab perubahan-perubahan parameter atau sistem pengukuran terjadi secara acak.

Analisis statistik

Analisis statistic terhadap data pengukuran adalah pekerjaan yang biasa sebab memungkinkan penentuan ketidakpastian hasil pengujian akhir secara analitis. Hasil dari suatu pengukuran dengan metode tertentu dapat diramalkan berdsarkan data contoh tanpa memiliki informasi yang lengkap mengenai semua faktor-faktor gangguan.

1. Nilai rata-rata (*arithmetic mean*)

Nilai rata-rata diberikan oleh persamaan berikut :

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x}{n}$$

Dimana \bar{x} = nilai rata-rata
 x_1, x_2, x_3 = pembacaan yang dilakukan
 n = jumlah pembacaan

2. Penyimpangan terhadap nilai rata-rata

Penyimpangan (deviasi) adalah selisih antara suatu pembacaan terhadap nilai rata-rata dalam sekelompok pembacaan. Jika penyimpangan pembacaan pertama x_1 adalah d_1 , penyimpangan pembacaan kedua x_2 adalah d_2 , dan seterusnya, maka penyimpangan-penyimpangan terhadap nilai rata-rata adalah :

$$d_1 = x_1 - \bar{x} \quad d_2 = x_2 - \bar{x} \quad d_n = x_n - \bar{x}$$

3. Penyimpangan rata-rata (*average deviation*)

Deviasi rata-rata adalah suatu indikasi ketepatan instrumen-instrumen yang digunakan untuk pengukuran. Menurut definisi, deviasi rata-rata adalah penjumlahan nilai-nilai mutlak dari penyimpangan-penyimpangan dibagi dengan jumlah pembacaan

Deviasi rata-rata dapat dinyatakan sebagai :

$$D = \frac{|d_1| + |d_2| + |d_3| + \dots + |d_n|}{n} = \frac{\sum |d|}{n}$$

4. Deviasi standar

Deviasi standar merupakan cara yang sangat ampuh untuk menganalisa kesalahan-kesalahan acak secara statistik. Deviasi standar dari jumlah data terbatas didefinisikan sebagai akar dari penjumlahan semua penyimpangan (deviasi) setelah dikuadratkan dibagi dengan banyaknya pembacaan. Secara sistematis dituliskan :

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n}}$$

Tentunya dalam praktek, jumlah pengamatan yang mungkin adalah terbatas. Deviasi standar untuk sejumlah data *terbatas* adalah :

$$\sigma = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum d_i^2}{n-1}}$$

Kemungkinan kesalahan-kesalahan (*Probability of Errors*)

1. Distribusi kesalahan normal

Adapun kemungkinan-kemungkinan bentuk kurva distribusi kesalahan adalah sebagai berikut :

- Kemungkinan kesalahan-kesalahan yang kecil lebih besar dari kemungkinan kesalahan-kesalahan besar ;
- Kesalahan-kesalahan besar adalah sangat mustahil
- Terdapat kemungkinan yang sama bagi kesalahan-kesalahan positif dan negatif sehingga kemungkinan suatu kesalahan yang diberikan akan simetris terhadap harga nol.

2. Kesalahan yang mungkin (*probable error*)

Nilai-nilai yang sehubungan dengan penyimpangan-penyimpangan lainnya dinyatakan dalam σ diberikan pada tabel 1 berikut :

Tabel 1 Luasan dibawah kurva kemungkinan

Deviasi (+) (σ)	Bagian luasan total yang tercakup
0.6745	0.5000
1.0	0.6828
2.0	0.9546
3.0	0.9972

Pada tabel 1 juga ditunjukkan bahwa separuh dari kasus tersebut berada dalam batas-batas penyimpangan $\pm 0,6745\sigma$. Besaran r disebut *kesalahan yang mungkin (probable error)* yang didefinisikan sebagai :

$$\text{Kesalahan yang mungkin } r = \pm 0,6745 \sigma$$

Nilai ini adalah mungkin dalam arti bahwa terdapat suatu kesempatan yang sama di mana setiap pengamatan akan memiliki suatu kesalahan acak yang tidak melebihi $\pm r$.

Contoh soal :

Pengukuran sebuah tahanan sebanyak sepuluh kali memberikan :

101,2 Ω ; 101,7 Ω ; 101,3 Ω ; 101,0 Ω ; 101,5 Ω ; 101,3 Ω ; 101,2 Ω ;
101,4 Ω ; 101,3 Ω ; dan 101,1 Ω .

Dengan menganggap bahwa yang ada hanya kesalahan acak, tentukan :

- (a) nilai rata-rata
- (b) deviasi standar
- (c) kesalahan yang mungkin

Penyelesaian

Pengamatan yang banyak seperti ini lebih baik dibuat dalam bentuk tabel (daftar), sehingga menghindari keragu-raguan dan kesalahan.

Pembacaan x	Deviasi	
	d	d^2
101,2	-0,1	0,01
101,7	0.4	0,16
101,3	0.0	0.00
101,0	-0.3	0,09
101,5	0.2	0,04
101,3	0.0	0,00
101,2	-0.1	0,01
101,4	0.1	0,01
101,3	0.0	0,00
101,1	-0.2	0,04
$\sum x = 1,013.0$	$\sum d = 1,4$	$\sum d^2 = 0,36$

a. Nilai rata-rata :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} = \frac{1013,0}{10} = 101,3\Omega$$

b. Deviasi standar :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d_t^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0,36}{9}} = 0,2\Omega$$

c. Kesalahan yang mungkin

$$0,6745\Omega = 0,6745 \times 0,2 = 0,1349\Omega$$

MODUL II

SISTEM INSTRUMENTASI ELEKTRONIKA

KARAKTERISTIK STATIS & DYNAMIS

Tujuan : Mempelajari karakteristik statis dan dinamis alat ukur

Pokok-pokok Bahasan

- Karakteristik statis
- Karakteristik Dynamis
- Sistem Orde nol
- Sistem Orde satu dengan masukkan step dan ramp

Daftar Pustaka

- Instrumentation Devices : Rangan, SARMA, and Sistem.
- Electronic Instrumentation
And measurement Tekhniques : William. D. Coopera
- Techniques of Instrumentation : A. C. Srivastava
- Mechatronics : w. Bolton

2.1. Pendahuluan

Karakteristik kerja instrumentasi secara garis besarnya terbagi dalam dua kelompok besar adalah :

Karakteristik Statis yang dipresentasikan oleh tingkat presisi dan akurasi. Sifat akurasi ditentukan oleh sensitivitas, range (jangkauan), non linieritas, hysteresis.

Karakteristik dynamis : Karakteristik ini di definisikan oleh time constant, damping coefisien dan frekuensi natural.

2.2. Karakteristik Statis

Karakteristik Statis adalah suatu alat ukur (instrumentasi) adalah karakteristik apabila alat ukur digunakan untuk mengukur suatu kondisi yang tidak berubah karena waktu atau hanya berubah secara lambat.

2.3. Karakteristik Dinamis

Karakteristik Dinamis suatu alat ukur adalah fungsi waktu. Hubungan masukan keluaran dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial karakteristik utama adalah kecepatan dalam tanggapan kecermatan kecepatan tanggapan (respon adalah kecepatan alat ukur dalam memberi tanggapan terhadap perubahan kuantitas yang diukur).

Kecermatan adalah tingkat yang memberi gambar apakah alat ukur tanpa kesalahan dinamis adalah perbedaan antara kuantitas nilai sebenarnya yang berubah menurut waktu terhadap nilai yang ditunjukkan alat ukur jika di asumsikan tidak ada kesalahan statis.

Model matematis yang berkaitan dengan masukan dan keluaran pada karakteristik dinamis adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n e_o}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} e_o}{dt^{n-1}} + \dots a_1 \frac{de_o}{dt} + a_0 e_o \\ & = b_m \frac{d^m e_i}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} e_i}{dt^{m-1}} + \dots b_1 \frac{de_i}{dt} + b_0 e_i \end{aligned}$$

Dimana e_o = Keluaran

e_i = Masukan

a dan b adalah tetapan-tetapan yang berkaitan dengan kombinasi parameter-parameter fisik sistem. Persamaan matematis diatas dapat diselesaikan menggunakan operator D atau transformasi Laplace.

Marilah kita definisikan operator diferensial sebagai berikut.

$$D = \frac{d}{dt}$$

Persamaan umum menjadi :

$$\begin{aligned} & (a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots a_1 D + a_0) e_o \\ & = (b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots b_1 D + b_0) e_i \end{aligned}$$

Dengan menggunakan metoda operator D penyelesaian e_o secara lengkap diperoleh dua bagian.

$$e_o = e_{OCF} + e_{opi}$$

e_{OCF} = bagian penyelesaian fungsi pelengkap

e_{opi} = bagian penyelesaian integral tertentu

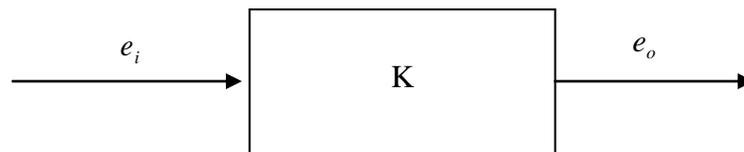
Penyelesaian e_{OCF} mempunyai n tetapan sembarang, e_{opi} tidak memiliki tetapan, tetapan sembarang ini dapat dievaluasi secara numerik dengan menentukan kondisi awal pada persamaan umum. Penyelesaian e_{OEF} diperoleh dengan menghitung n akar persamaan al-jabar karakteristik.

$$a_o D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots a_1 D + a_o = 0$$

Bila akar $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ telah diperoleh maka penyelesaian pelengkap dapat ditulis sesuai aturan jawaban persamaan diferensial .

Bagian penyelesaian integral tertentu dapat dikerjakan menggunakan metoda koefisien tak ditetapkan sehingga diperoleh penyelesaiannya.

$$e_{opi} = Af(t) + Bf'(t) + Cf''(t) + \dots$$



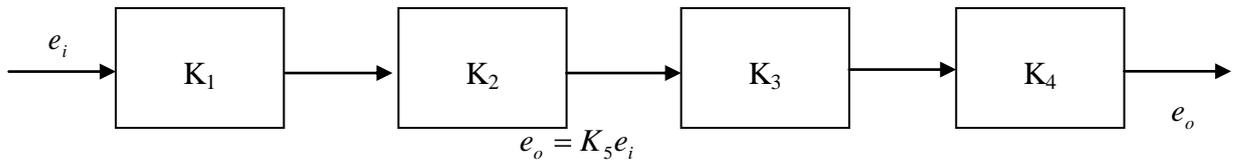
Gambar 2.1 Hubungan Input-Output

$$\frac{e_o(D)}{e_i} = \frac{b_m D^m + b_{m-1} D^{m-1} + \dots b_1 D + b_o}{a_n D^n + a_{n-1} D^{n-1} + \dots a_1 D + a_o} = K$$

Pernyataan diatas menunjukkan perbandingan keluaran dan masukan dinyatakan dengan fungsi transfer.

Fungsi transfer sangat berguna dalam menggambarkan karakteristik dinamis sistem dengan symbol yaitu menggunakan diagram blok misalkan suatu sistem terdiri dari 4 subsatuan yang mempunyai transfer $K_1, K_2, K_3,$ dan K_4 . seluruh fungsi transfer dari sistem adalah :

$$\frac{e_o}{e_i} = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 = K_5$$



Gambar 2.2

Fungsi Transfer Keseluruhan

$$e_o = e_i \times K_5$$

Fungsi transfer menggunakan transformasi laplace.

$$\frac{e_o(s)}{e_i} = \frac{b_m S^m + b_{m-1} S^{m-1} + \dots b_1 S + b_o}{a_n S^n + a_{n-1} S^{n-1} + \dots a_1 S + a_o}$$

fungsi transfer menggunakan sinusioda dengan frekuensi anguler (ω)

menggunakan $e^{j\omega}$

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{b_m (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots b_1 (j\omega) + b_o}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots a_1 (j\omega) + a_o}$$

Instrumen Orde Nol

Semua instrument yang menghasilkan konstanta a dan b sama dengan nol kecuali a_o dan b_o sehingga persamaan umum karakteristik sebagai berikut:

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{b_o}{a_o}$$

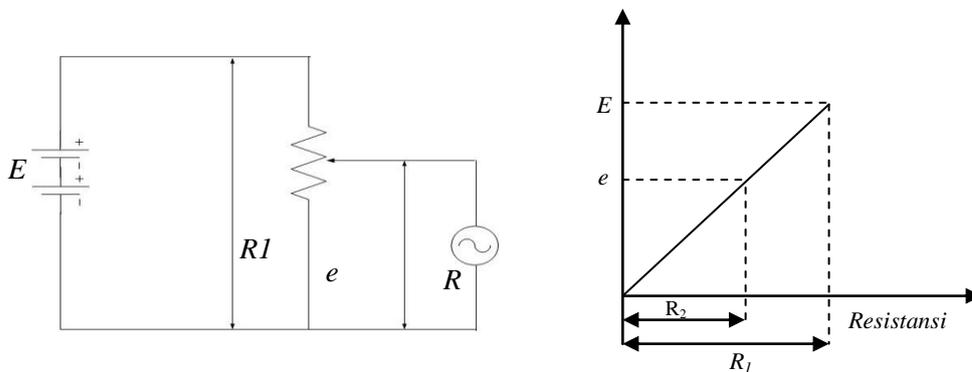
$$a_o e_o = b_o e_i$$

$$e_o = \frac{b_o}{a_o} e_i$$

dimana $K = \frac{b_o}{a_o} =$ kepekaan statis

$$e_o = K e_i$$

alat ukur (instrumen urutan nol orde nol jika masukan berubah terhadap waktu maka keluaran mengikuti secara sempurna tanpa penyimpangan atau kesenjangan waktu. Instrumen orde nol memperlihatkan penampilan dinamis yang ideal.



Gambar 2.3

Potensio meter menggambarkan sistem orde nol

Persamaan potensio meter diatas mempunyai hubungan output – input sebagai

berikut $\frac{e}{E} = \frac{R_o}{R_i}$

$$e = \frac{R_o}{R_i} E$$

$$e = KE$$

Instrumen orde pertama

Model matematik dari model pertama

$$a_i \frac{de_o}{dt} + a_o e_o = b_o e_i$$

persamaan diatas dapat disederhanakan manjadi

$$\frac{a_i}{a_o} \cdot \frac{de_o}{dt} + e_o = \frac{b_o}{a_o} e_i$$

misal

$$\frac{a_i}{a_o} = T = \text{Tetapan waktu}$$

$$\frac{b_o}{a_o} = K = \text{Tetapan statis}$$

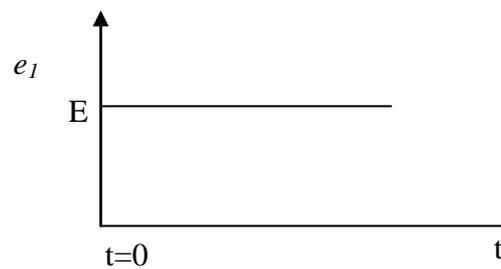
menggunakan operator D

$$(TDe_o + e_o) = Ke_i$$

$$(TD + 1)e_o = Ke_i$$

$$\boxed{\frac{e_o}{e_i} = \frac{K}{Td + 1}}$$

Tanggapan tangga (Step Response) untuk sistem orde pertama



Gambar 2.4
Fungsi tangga

$$e_1 = 0 \text{ untuk } t = 0$$

$$e_2 = E \text{ untuk } t \geq 0$$

Untuk transformasi Laplace

$$E_1(s) = \frac{E}{s}$$

$$T \frac{de_o}{dt} + e_o = Ke_1$$

$$T_s E_o(s) + E_o(s) = K \frac{E(s)}{s}$$

$$(T_s + 1)E_o(s) = K \frac{E(s)}{s}$$

$$E_o(s) = \frac{K}{s(T_s + 1)} E(s)$$

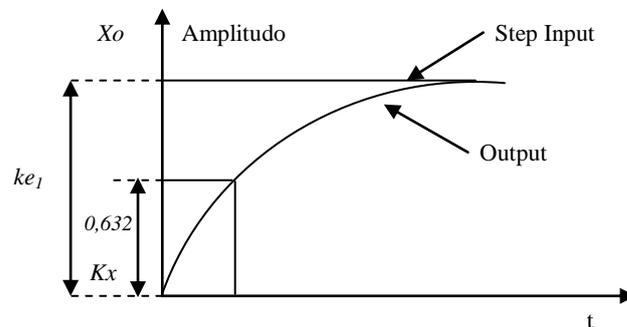
$$E_o(s) = \left[\frac{K}{s} - \frac{KT}{T_s + 1} \right] E(s)$$

$$= \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}} \right] KE(s)$$

Transformasi inverse Laplace menghasilkan

$$\frac{e_o}{Ke_i} \dots = (1 - e^{-t/T})$$

dapat digambarkan proses sistem orde pertama terhadap masukan fungsi step adalah sebagai berikut:



Gambar 2.5

Response Sistem orde pertama jika diberi masukan step

Respon sistem orde terhadap masukan Ramp

Masukan ramp mempunyai persamaan :

$$e_i = mt \rightarrow E_i(s) = L \{mt\}$$

$$E_i(s) = \frac{m}{s^2}$$

sehingga persamaan matematik sistem dengan input ramp menjadi :

$$E(s) = \frac{K}{(T_s + 1)} \cdot \frac{m}{s^2}$$

$$= Km \left[\frac{1}{s^2} + \frac{T}{s + \frac{1}{T}} - \frac{T}{s} \right]$$

$$e_o(t) = Km (t - T + T e^{-t/T}) \text{ untuk } t \geq 0$$

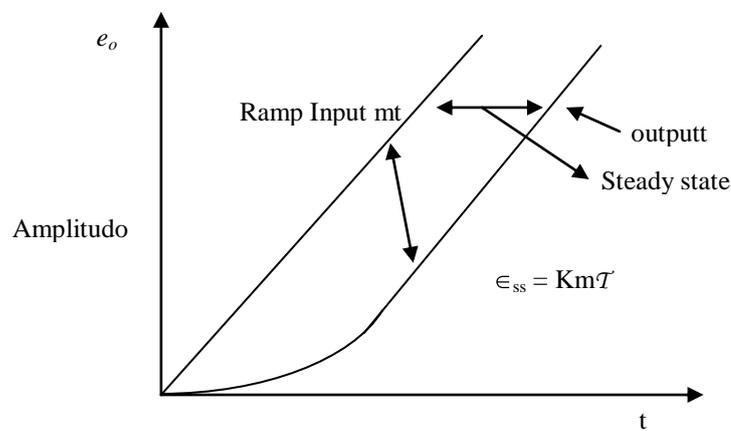
Error (kesalahan) dynamic antara input dan output adalah :

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= kmt - x_o(t) \\ &= Kmt - Km (t - T + T e^{-t/T}) \\ &= Km (1 - e^{-t/T}) \end{aligned}$$

Untuk $t = \infty$ maka error yang terjadi adalah

$$\epsilon_{ss} = KmT$$

sehingga dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 2. 6

Rspons sistem orde pertama jika diberi masukan ramp

MODUL III

SISTEM INSTRUMENTASI ORDE 2

Tujuan Instruksional Umum :

Menjelaskan persamaan matematis sistem orde dua

Tujuan Instruksi Khusus :

- Dapat memahami response dari sistem orde 2
- Dapat memahami sistem orde 2 dengan input ramp

Buku Rujukan

- | | |
|--------------------|--|
| ▪ Rangan Sarma | : Instrumentasi Devices And Sistem |
| ▪ W. Bolton | : Mechatronic |
| ▪ William D.Cooper | : Electronic Instrumentasi And
Measurement Techniques |

Sistem orde dua memenuhi persamaan matematis sebagai berikut :

$$a_2 \frac{d^2 e_o}{dt^2} + a_1 \frac{de_o}{dt} + a_o e_o = b_o e_i$$

dengan menggunakan transformasi laplace akan diperoleh :

$$a_2 s^2 e_o(s) + a_1 s e_o(s) + a_o e_o(s) = b_o e_i(s)$$

$$(a_2 s^2 + a_1 s + a_o) e_o(s) = b_o e_i(s)$$

semua dibagi dengan a_o

$$\left(\frac{a_2}{a_o} s^2 + \frac{a_1}{a_o} s + 1 \right) e_o(s) = \frac{b_o}{a_o} e_i(s)$$

Jika dimisalkan

$$1. \quad \frac{b_o}{a_o} = K$$

$$2. \quad \omega_n = \sqrt{\frac{a_o}{a_2}} \rightarrow \frac{a_o}{a_2} = \frac{1}{\omega_n^2}$$

$$3. \quad \zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_o a_2}}$$

Dari persamaan 2 dan 3 didapat

$$\frac{a_1}{a_o} = 2\zeta\omega_n$$

Sehingga

$$\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + 2\zeta\omega_n s + 1\right)e_o(s) = Ke_i(s)$$

$$\frac{e_o(s)}{Ke_i(s)} = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1}$$

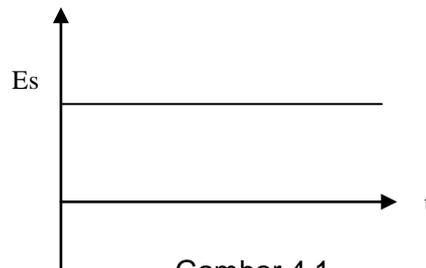
$$\frac{e_o(s)}{e_i(s)} = \frac{K}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1}$$

Contoh

Sistem orde 2 pada sistem yang mengandung pegas, gesekan dan percepatan

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + b\frac{dx}{dt} + kx = f(t)$$

masukkan berupa fungsi step untuk sistem orde 2 :



Gambar 4.1

$$e_i(t) = 0 \quad \text{Untuk } t < 0$$

$$e_i(t) = Es \quad \text{Untuk } t \geq 0$$

$$L\{e_i(t)\} = \frac{Es}{s}$$

Dengan memasukkan ke fungsi transfer sistem orde 2 dengan masukkan step didapat :

$$\frac{e_o(s)}{K \frac{E_s}{s}} = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1}$$

$$\frac{e_o(s)}{KE_s} = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$$

ada tiga kemungkinan response dari sistem orde 2 untuk masukkan berupa step input tergantung dari harga ζ antara lain :

a. Untuk $\zeta > 1$ (Overdamped)

Dengan menggunakan transformasi balik (inverse transformasi laplace) akan didapat

$$\begin{aligned} \frac{e_o}{KE_s}(t) = & -\frac{\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \exp(-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t \\ & + \frac{\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \exp(-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t + 1 \end{aligned}$$

b. Untuk $\zeta = 1$ (critically damped)

Persamaan menjadi

$$\begin{aligned} \frac{e_o(s)}{KE_s} &= \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \\ &= \frac{\omega_n^2}{s(s + \omega_n)^2} \\ &= \frac{A}{s} + \frac{B}{(s + \omega_n)^2} + \frac{c}{(s + \omega_n)} \end{aligned}$$

sehingga

$$\omega_n^2 = A(s + \omega_n)^2 + B.s + Cs(s + \omega_n)$$

untuk $s = -\omega_n$ Didapat $B = -\omega_n$

diferensiasi dari *

$$0 = 2A(s + \omega_n) + B + C((s + \omega_n) + s) \dots \dots \dots (**)$$

Untuk $s = -\omega_n$

$$0 = B + C(-\omega_n)$$

$$0 = -\omega_n - C - \omega_n$$

$$C = -1$$

Diferensiasi dari **

$$0 = 2A + C(2)$$

$$A = -C = 1$$

Sehingga persamaan menjadi

$$\frac{e_o(s)}{KE_s} = \frac{1}{s} + \frac{(-\omega_n)}{(s + \omega_n)^2} - \frac{1}{(s + \omega_n)}$$

dan

$$\frac{e_o}{KE_s}(t) = 1 - \omega_n t e^{-\omega_n t} - e^{-\omega_n t}$$

$$\frac{e_o}{KE_s}(t) = 1 - (1 + \omega_n t) \exp(-\omega_n t)$$

sedang kemungkinan ke tiga adalah

$$\zeta < 1 \text{ (under damped)}$$

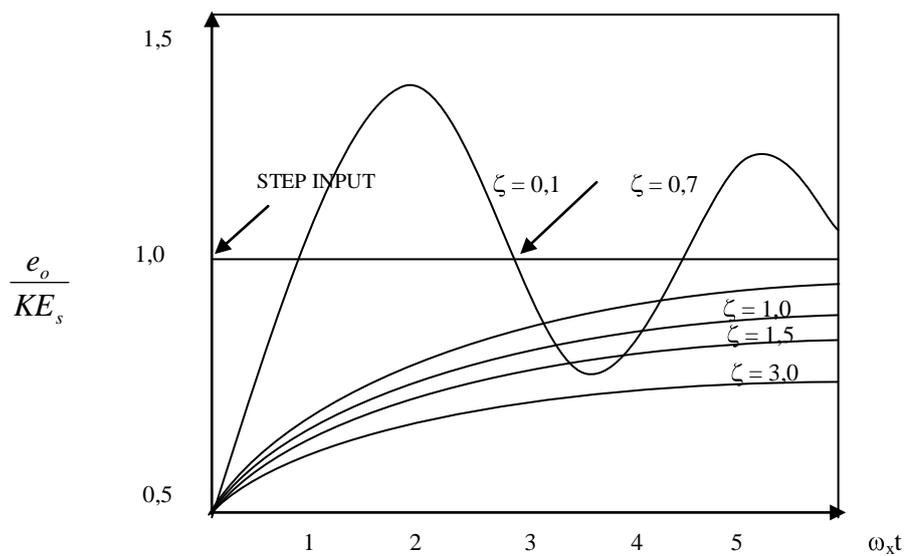
didapat hasil

$$\frac{e_o}{KE_s}(t) = 1 - \frac{\exp(-\zeta\omega_n t)}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin((\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t) + \varphi)$$

dimana

$$\varphi = \text{inv sin } \sqrt{1-\zeta^2}$$

Respon dari sistem orde 2 terhadap masukan step dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.2

Sistem orde 2 dengan input ramp :

Input ramp

$$e_i(t) = mt$$

$$E_i(s) = \frac{m}{s^2}$$

Solusi dari persamaan orde input ramp

a. $\zeta > 1$

$$\frac{e_o}{KE_i}(t) = \left[\left(Kmt - \frac{2\zeta}{\omega_n} \right) + \frac{2\zeta}{\omega_n} \exp(-\zeta\omega_n t) (\cosh\omega_n t \sqrt{\zeta^2 - 1} + \frac{2\zeta^2 - 1}{2\zeta\sqrt{\zeta^2 - 1}} - \sinh\omega_n t \sqrt{\zeta^2 - 1}) \right]$$

b. $\zeta = 1$

$$\frac{e_o}{KE_i}(t) = \left[\left(Kmt - \frac{2\zeta}{\omega_n} \right) + \frac{2\zeta}{\omega_n} \exp(-\zeta\omega_n t) \left(1 + \frac{\omega_n t}{2} \right) \right]$$

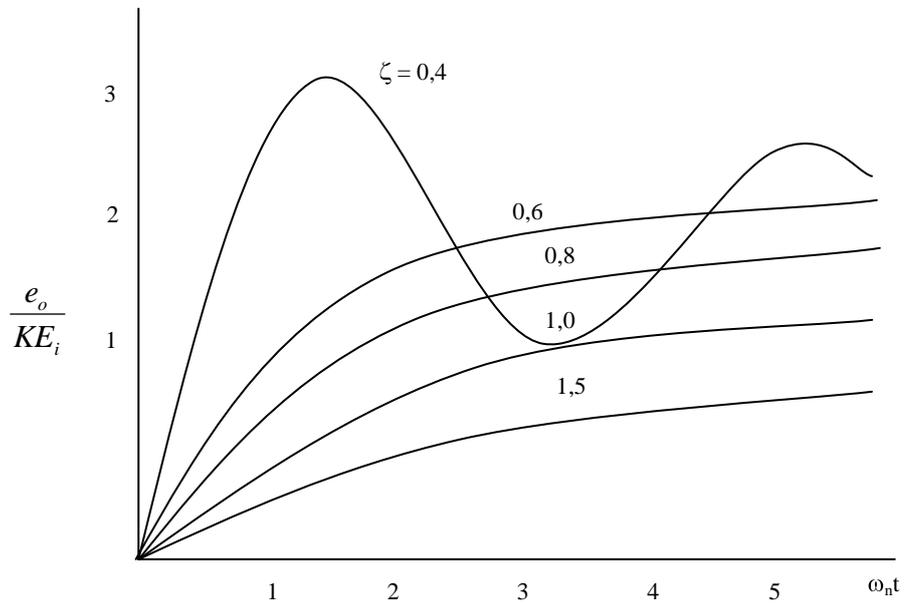
c. $\zeta < 1$

$$\frac{e_o}{KE_i}(t) = \left[\left(Kmt - \frac{2\zeta}{\omega_n} \right) - \frac{\exp(-\zeta\omega_n t)}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_n t \sqrt{1 - \zeta^2} + \phi) \right]$$

dimana

$$\phi = \operatorname{inv}tg \frac{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}{2\zeta^2 - 1}$$

Respons dari sistem orde 2 untuk masukan berbentuk ramp dapat digambarkan sebagai



Gambar 3.3

Latihan Soal

Suatu sistem orde (2), mempunyai konstanta :

$$a_0 = 9 ; a_1 = 12 ; a_2 = 4.$$

Cari ξ ; ω_n ; k

- Berikan penjelasan $e_o(t)$ jika $e_i(t)$ berupa unit step.
- Gambarkan grafik $e_o(t)$ nya !

MODUL IV & V

SISTEM INSTRUMENTASI ELEKTRONIKA

TRANSDUCER

Tujuan Instruksional Umum :

Menjelaskan materi tentang transducer

Tujuan Instruksi Khusus :

- Dapat memahami definisi dan karakteristik Transducer
- Dapat memahami jenis – jenis Transducer

Buku Rujukan

- Rangan Sarma : Instrumentasi Devices And Sistem
- W. Bolton : Mechatronic
- William D.Cooper : Electronic Instrumentasi And Measurement Techniques

4.1 Definisi dan pengelompokkan Transducer

Sistem instrumentasi elektronik terdiri dari sejumlah komponen yang secara bersama-sama digunakan untuk melakukan suatu pengukuran dan mencatat hasilnya. Sebuah sistem instrumentasi umumnya terdiri dari tiga elemen utama, yaitu : peralatan *masukan*, pengkondisian sinyal (*signal conditioning*) atau peralatan *pengolah*, dan peralatan *keluaran (output)*.

Besaran masukan pada kebanyakan sistem instrumentasi bukan besaran listrik. Untuk menggunakan metoda dan teknik listrik pada pengukuran, manipulasi atau pengontrolan, besaran yang bukan listrik ini diubah menjadi sinyal listrik oleh sebuah alat yang disebut Transducer.

Transducer adalah suatu peralatan / alat yang dapat mengubah suatu besaran ke besaran lain. Sebagai contoh, definisi transducer yang luas ini mencakup alat-alat yang mengubah gaya atau perpindahan mekanis menjadi sinyal listrik.

Transducer dapat dikelompokkan berdasarkan pemakaiannya, metode pengubahan energi, sifat dasar dari sinyal keluaran dan lain-lain. Semua pengelompokkan ini biasanya memperlihatkan daerah yang saling melengkapi. Perbedaan yang tajam antara mereka dan pengelompokkan jenis Transducer adalah sulit. Tabel 4-1 menunjukkan suatu pengelompokkan Transducer berdasarkan Prinsip listrik yang terkait.

Tabel 4-1

<i>Parameter listrik dan kelas transducer</i>	<i>Prinsip kerja dan sifat alat</i>	<i>Pemakaian alat</i>
TRANSDUCER PASIF (DAYA DARI LUAR)		
<i>Tahanan</i>		
Alat potonsiometrik	Pengaturan posisi kontak geser oleh sebuah gaya luar yang mengubah tahanan di dalam sebuah potensiometer atau rangkaian jembatan.	Tekanan, pergeseran
Strain-gage tahanan	Tahanan sebuah kawat atau semikonduktor diubah oleh perpanjangan atau tekanan karena tekanan geser yang diberikan dari luar.	Gaya, torsi, pergeseran
Transformator selisih	Tegangan selisih dua kumparan primer dari sebuah transformator diubah dengan pengaturan posisi inti magnetik oleh sebuah gaya yang diberikan dari luar.	Tekanan, gaya, pergeseran
Gage arus pusar (Eddy Current gage)	Induktansi sebuah kumparan diubah menurut dekatnya sebuah plat arus pusar	Pergeseran, ketebalan

<i>Parameter listrik dan kelas transducer</i>	<i>Prinsip kerja dan sifat alat</i>	<i>Pemakaian alat</i>
TRANSDUCER PEMBANGKIT SENDIRI (TANPA DAYA DARI LUAR)		
Gage kerutan magnetik (magnetostriction gage) <i>Tegangan dan arus</i>	Sifat-sifat magnetik diubah oleh tekanan geser (stress)	Gaya, tekanan, bunyi (suara)
Pengukuran efek Hall	Beda potensial dibangkitkan pada sebuah plat semikonduktor (germanium) bila fluksi magnet berinteraksi dengan arus yang dimasukkan.	Fluksi magnet, arus
Kamar ionisasi (ionisation chamber)	Aliran elektron diindusir oleh ionisasi gas akibat radioaktif.	Pencacahan partikel, radiasi
Sel fotoemisif	Emisi elektron akibat radiasi yang masuk pada permukaan fotoemisif.	Cahaya dan radiasi
Tabung pemfotodarap (Photomultiplier)	Emisi elektron sekunder akibat radiasi yang masuk ke katoda sensitif cahaya.	Cahaya dan radiasi, relay sensitif cahaya
Termokopel dan termoongkok (thermopile)	Pembangkitan ggl pada titik sambung dua logam yang tidak sama atau semikonduktor bila titik sambung tersebut dipanasi.	Temperatur, aliran panas, radiasi
Generator kumparan putar	Perputaran sebuah kumparan didalam medan magnet membangkitkan suatu tegangan.	Kecepatan, getaran
Piezoelektrik	Pembangkitan ggl bila bahan-bahan berkrystal tertentu seperti kuartz diberi gaya dari luar.	Suara, getaran, percepatan, perubahantekanan
Sel fototegangan (photovoltaic)	Pembangkitan suatu tegangan dalam sebuah alat semikonduktor bila pemancaran energi merangsang sel.	Pengukur cahaya, sel matahari.

<i>Parameter listrik dan kelas transducer</i>	<i>Prinsip kerja dan sifat alat</i>	<i>Pemakaian alat</i>
TRANSDUCER PEMBANGKIT SENDIRI (TANPA DAYA DARI LUAR)		
Pirani gage atau alat ukur kawat panas.	Tahanan elemen panas diubah oleh pendinginan konveksi dari suatu aliran gas.	Aliran gas, tekanan gas
Termometer tahanan	Tahanan kawat logam murni dengan koefisien tahanan temperatur positif yang besar berubah terhadap temperatur.	Temperatur, panas
Termistor	Tahanan oksida logam tertentu dengan koefisien tahanan temperatur negatif yang besar berubah terhadap temperatur.	Temperatur
Hygrometer tahanan	Tahanan sebuah strip konduktif berubah terhadap kandungan uap air.	Kelembapan relatif
Sel fotokonduktif	Tahanan sel sebagai elemen rangkaian berubah terhadap cahaya masuk.	Relay sensitif cahaya
<i>Kapasitansi</i>		
Gage-tekanan, kapasitansi berubah	Jarak antara dua plat paralel diubah oleh sebuah gaya yang diberikan dari luar.	Pergeseran, tekanan
Mikrofon kapasitor	Tekanan suara mengubah kapasitansi antara sebuah plat tetap dan diafragma yang dapat berubah	Suara, musik, derau
Ukuran dielektrik	Variasi kapasitansi melalui perubahan dielektrik.	Level cairan, ketebalan.

Parameter listrik dan kelas transducer	Prinsip kerja dan sifat alat	Pemakaian alat
TRANSDUCER PEMBANGKIT SENDIRI (TANPA DAYA DARI LUAR)		
<i>Induktansi</i>		
Transducer rangkaian magnetik	Induktansi diri atau induktansi bersama dari kumparan yang dieksitasi oleh AC diubah dengan perubahan-perubahan di dalam rangkaian magnetik.	Tekanan, pergeseran
Pengukuran reluktansi	Reluktansi rangkaian magnetik diubah dengan mengubah posisi inti besi sebuah kumparan.	Tekanan, pergeseran, getaran, posisi

Berdasarkan tabel diatas, dilihat dari perubahan suatu besaran menjadi tegangan atau arus listrik terdapat dua kelompok transducer yakni :

4.1.1 Transducer pasif

Transducer yang mengubah besaran menjadi tegangan atau arus listrik memerlukan sumber dari luar.

Contoh 1 :

Strain gage merupakan sebuah contoh transducer pasif yang mengubah suatu pergeseran mekanis menjadi perubahan tahanan. Strain gage merupakan sebuah alat seperti biscuit tipis (wafer), yang dapat disatukan ke berbagai bahan guna mengukur regangan yang diberikan padanya. Strain gage logam dibuat dari kawat tahanan berdiameter kecil. Tahanan dari foil kawat atau logam ini berubah terhadap panjang jika bahan pada "gage" disatukan mengalami tarikan atau tekanan (kompresi). Perubahan tahanan ini sebanding dengan regangan yang diberikan dan diukur dengan sebuah jembatan Wheatstone yang dipakai secara khusus.

Sensitivitas sebuah strain gage dijelaskan dengan suatu karakteristik yang disebut *factor gage (gage factor)*, K, yang didefinisikan sebagai perubahan suatu tahanan dibagi dengan perubahan satuan panjang, atau

$$\text{Faktor gage } K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} \dots(1)$$

Dimana K = faktor gage
 R = tahanan gage nominal
 ΔR = perubahan tahanan gage
 l = panjang normal bahan percobaan (kondisi tidak teregang)
 Δl = perubahan panjang bahan percobaan.

Jika $\frac{\Delta l}{l}$ dalam penyebut persamaan (1) adalah regangan σ , sehingga persamaan dapat ditulis :

$$K = \frac{\Delta R / R}{\sigma} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana σ = regangan dalam arah lateral.

Perubahan tahanan ΔR pada sebuah konduktor yang panjangnya l dapat dihitung dengan persamaan tahanan dari sebuah konduktor yang penampangnya serba sama, yaitu :

$$R = \rho \frac{\text{panjang}}{\text{luas}} = \frac{\rho \times l}{\pi/4 d^2} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana ρ = tahanan spesifik dari bahan konduktor
 l = panjang konduktor
 d = diameter konduktor

Tarikan (tension) terhadap konduktor menyebabkan penambahan panjang Δl dan pengurangan secara bersamaan pada diameter Δd . Maka tahanan konduktor berubah menjadi :

$$R_s = \rho \frac{\pi/4 (d - \Delta d)^2}{\pi/4 d^2} \frac{l (1 + \Delta l / l)}{-2 \Delta d / d} \dots\dots\dots(4)$$

Persamaan (4) dapat disederhanakan dengan menggunakan bilangan Poisson μ , yang didefinisikan sebagai perbandingan regangan dalam arah lateral terhadap tegangan dalam arah aksial. Dengan demikian

$$\mu = \frac{\Delta d / d}{\Delta l / l} \dots\dots\dots(5)$$

Substitusi persamaan (5) kedalam persamaan (4), maka menjadi :

$$R_s = \rho \frac{1}{\pi/4 d^2} \left(\frac{1 + \Delta l/l}{1 - 2\mu \Delta l/l} \right) \dots\dots(6)$$

Yang dapat disederhanakan menjadi :

$$R_s = R + \Delta R = R \left[1 + 2\mu \frac{\Delta l}{l} \right] \dots\dots\dots(7)$$

Pertambahan tahanan, ΔR jika dibandingkan terhadap pertambahan panjang Δl selanjutnya dapat dinyatakan dalam faktor gage K dimana :

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 1 + 2\mu \dots\dots\dots(8)$$

Bilangan Poisson bagi kebanyakan logam terletak dalam rangkuman dari 0,25 sampai 0,35 ; dan berarti faktor gage akan berada dalam orde 1,5 sampai 1,7.

Untuk penggunaan strain gage sangat diinginkan sensitivitas tinggi. Sebuah faktor gage yang besar berarti suatu perubahan tahanan yang relatif besar ; yang dapat lebih mudah diukur dari pada suatu perubahan tahanan yang kecil. Pada kawat konstan, nilai K adalah sekitar 2, sedangkan Alloy 479 mempunyai nilai K sekitar 4.

Jika dilakukan suatu perhitungan sederhana untuk mengemukakan efek apa yang dimiliki oleh pemberian tegangan geser (*stress*) terhadap perubahan tahanan sebuah strain gage. Hukum Hooke memberikan hubungan antara tegangan geser dan regangan untuk sebuah kurva tegangan geser-regangan (*stress-strain curve*) yang linear, dinyatakan dalam modulus kekenyalan (elastisitas) dari bahan yang dipasang persatuan luas dan regangan sebagai perpanjangan benda yang tergeser persatuan luas, hukum Hooke ditulis sebagai :

$$\sigma = \frac{s}{E} \dots\dots\dots(9)$$

- Dimana σ = regangan, $\frac{\Delta l}{l}$ (tanpa satuan)
 s = tegangan geser, kg/cm²
 E = modulus Young, kg/cm²

Contoh soal:

Sebuah strain-gage tahanan dengan faktor gage sebesar 2 diikat ke sebuah benda baja yang dipengaruhi oleh tegangan geser sebesar 1050 kg/cm^2 . Modulus elastisitas baja adalah kira-kira $2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$.

Hitunglah perubahan tahanan ΔR dari elemen strain gage yang disebabkan oleh tegangan geser yang dikenakan.

Penyelesaian :

Hukum Hooke pada persamaan (9) memberikan :

$$\sigma = \frac{\Delta l}{l} = \frac{s}{E} = \frac{1050}{2,1 \times 10^6} = 5 \times 10^{-4}$$

Sensitivitas strain gage adalah $K = 2$, maka persamaan (2) diperoleh :

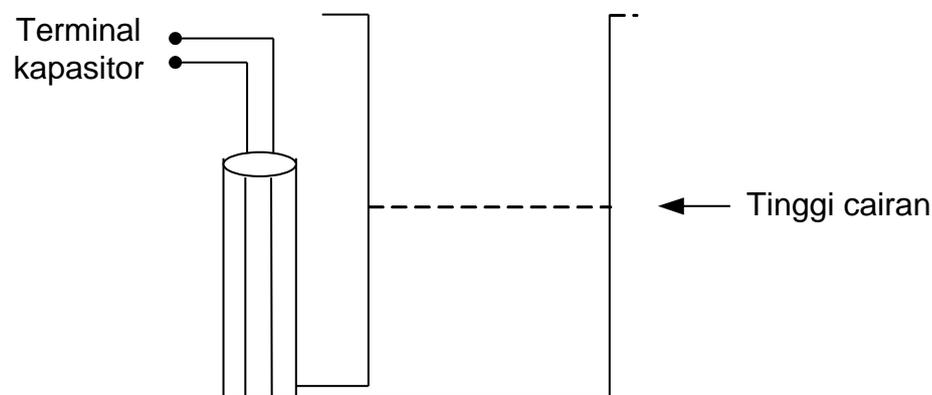
$$\frac{\Delta R}{R} = K\sigma = 2 \times 5 \times 10^{-4} = 10^{-3} \text{ atau } 0,1 \%$$

Contoh diatas menjelaskan bahwa tegangan geser yang relatif tinggi yakni sebesar 1050 kg/cm^2 memperlihatkan perubahan tahanan hanya $0,1 \%$, benar-benar suatu perubahan yang sangat kecil. Umumnya pengukuran aktual mencakup perubahan tahanan dari nilai yang jauh lebih rendah, dan rangkaian jembatan pengukur harus dirancang dengan cermat agar mampu mendeteksi perubahan tahanan yang kecil ini.

Contoh lain dari penggunaan Transducer pasif

Contoh 2 :

Mengubah level (tinggi) fluida menjadi tegangan arus listrik menggunakan transducer kapasitor.



Gambar 4.1 kapasitor yang kesambung tangki

Perubahan medium kapasitor dapat mengakibatkan harga kapasitansi dari kapasitor. Untuk kapasitor tabung berlaku persamaan

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 K_e L}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

dimana

c = kapasitansi (Farad)

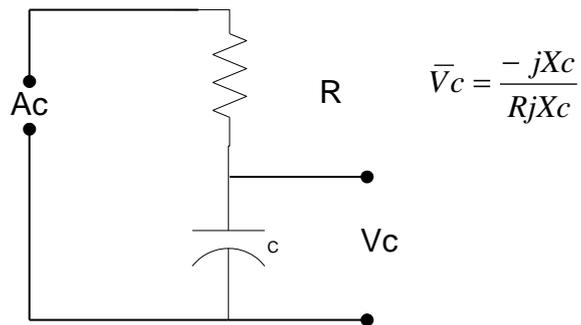
K_e = Konstanta dielektrik medium

L = tinggi kapasitor

ϵ_0 = permeabilitas listrik udara/ vacuum

untuk mengubah besaran kapasitansi menjadi tegangan listrik memerlukan sumber dari luar.

$$X_c = \frac{1}{\omega c}$$

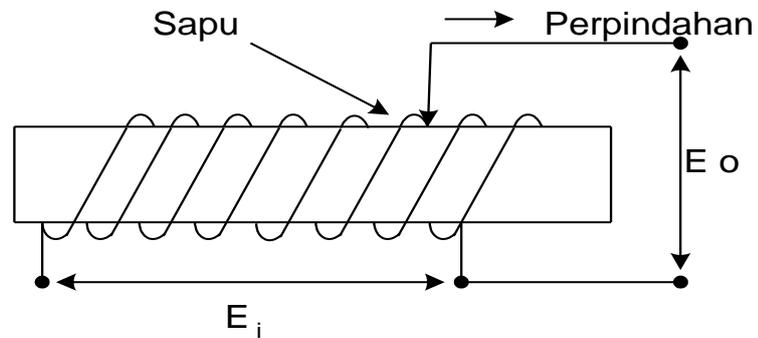


Gambar 4.2

Dihitung dalam bentuk fasor

Contoh 3:

Transducer perpindahan menggunakan resistansi berubah



Gambar 4.3

$$R = \rho \frac{\ell}{A}$$

R = Resistansi (Ω)

ℓ = Panjang (m)

A = Luas (m^2)

ρ = Resistansi bahan (Ωm)

harga resistansi berbanding lurus dengan ℓ sehingga jika panjang resistor berubah maka resistansinya berubah. Dengan memberi sumber dari luar maka akan didapatkan perpindahan berbanding lurus dengan tegangan keluaran.

$$E_o = \frac{R_w}{R_t} \cdot E_i$$

E_o = tegangan keluaran

E_i = tegangan masukan

R_w = Resistansi antara sapu dan terminal

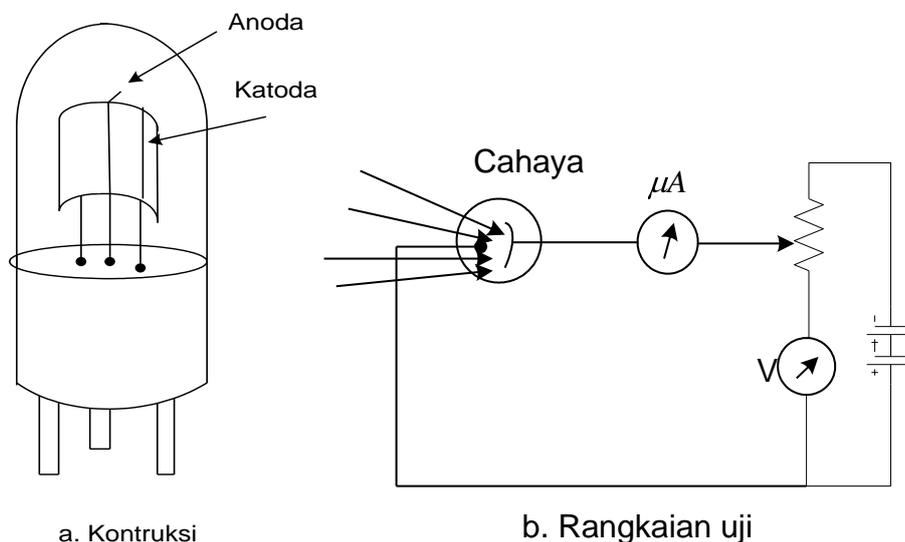
R_t = Resistansi total

4.1.2 Transducer jenis pembangkit sendiri (Self generating type)

Adalah transducer yang menghasilkan suatu tegangan atau arus analog bila dirangsang oleh suatu bentuk fisis energi tertentu, transducer pembangkit sendiri tidak memerlukan daya luar.

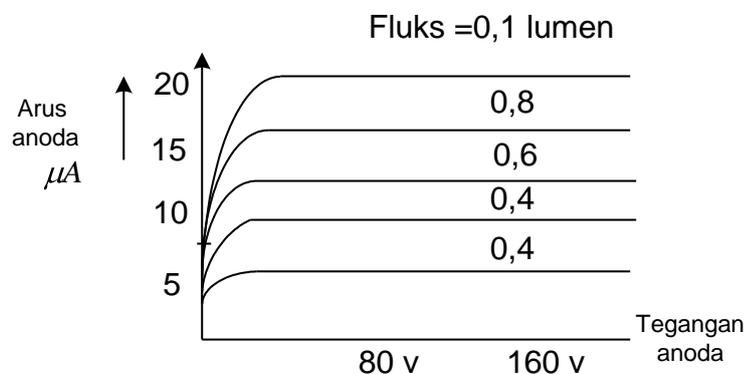
Contoh 1 :

Transducer fotolistrik memanfaatkan sifat-sifat sel emisi cahaya atau tabung cahaya. Tabung cahaya merupakan sebuah alat pemancar energi yang mengontrol pancaran (emisi) elektronnya bila dihadapkan ke cahaya yang datang. Konstruksi dan simbolnya dalam diagram skema ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 4.4

Dapat digambarkan karakteristik dari fotolistrik sebagai berikut:



Gambar 4.5

Elemen setengah lingkaran yang besar adalah katoda sensitif cahaya dan kawat tipis yang menuju pusat tabung adalah anoda. Kedua elemen ini ditempatkan di dalam sebuah pembungkus gelas yang telah dihampakan. Bila antara anoda dan katoda diberikan suatu tegangan konstan, arus di dalam rangkaian berbanding langsung dengan banyaknya cahaya atau intensitas cahaya yang jatuh pada katoda, sehingga membentuk kurva karakteristik yang khas seperti gambar 4.5.

Perhatikan bahwa untuk tegangan diatas 20 volt arus keluaran hampir tidak bergantung pada banyaknya cahaya yang masuk arus melalui tabung biasanya dalam orde mikrometer dengan demikian tabung cahaya dihubungkan ke penguat arus guna menghasilkan suatu keluaran yang bermanfaat.

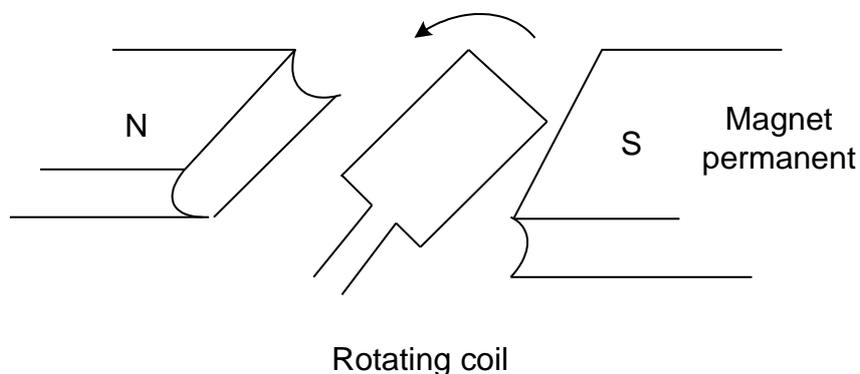
Alat pengubah intensitas cahaya menjadi arus listrik tanpa sumber dari luar . Keuntungan transducer jenis ini adalah efisiensinya yang tinggi, dan kesesuaiannya untuk mengukur kondisi static dan dinamik. Alat ini bisa memiliki stabilitas jangka panjang yang pendek, tidak memberi respons terhadap variasi cahaya berfrekuensi tinggi dan memerlukan pergeseran yang besar bagi anggota penjumlah gaya.

Contoh lain transducer pembangkit energi sendiri :

Tachogenerator

Mengubah kecepatan putar atau kecepatan fluida menjadi ggl induksi (tegangan listrik)

Prinsip kerjanya sebagai berikut:



Gambar 4.6

Menurut prinsip Faraday

Jika penghantar mendapat fluks magnet yang tidak konstan akan menghasilkan ggl induksi sebesar

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

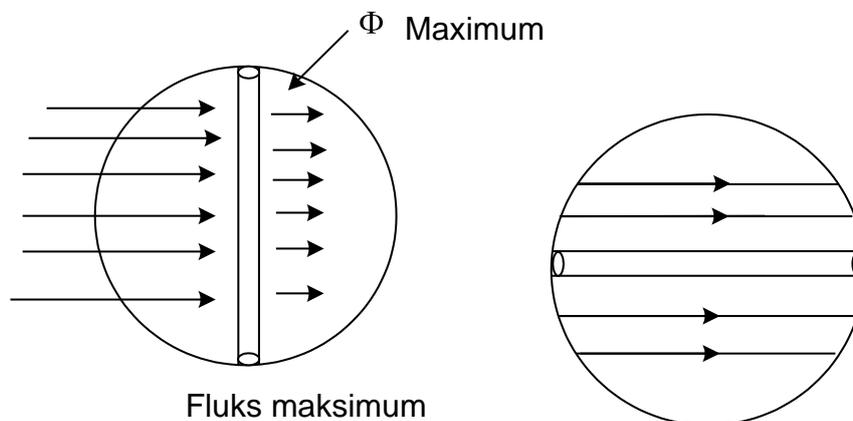
$$e = ggl \text{ induksi}$$

N = Jumlah lilitan

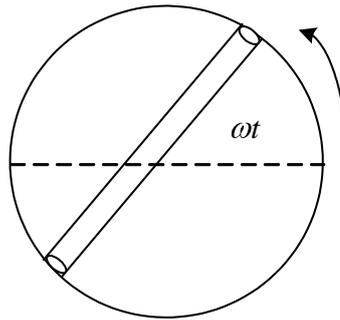
$$\frac{d\phi}{dt} = \text{Perubahan fluks magnet terhadap waktu}$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot \vec{ds}$$

[fluks magnet] yang dihasilkan dari magnet permanent berharga kostan tetapi karena lilitan diputar pada medan magnet maka lilitan penghantar (kumparan penghantar) akan mendapat fluks yang berubah sesuai dengan posisi penghantar.



Gambar 4.7. (a) Penghantar mendapat fluks maximum (b) gambar penghantar mendapat fluks sama dengan nol.



jika penghantar membentuk sudut ωt
mendapat $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$

Gambar 4.8

Dari persamaan di atas $\omega t =$ sudut yang ditempuh oleh penghantar yang berputar dan ω adalah kecepatan sudut.

Dengan mensubstitusikan ke persamaan Maxwell didapat

$$e = N \frac{d\phi}{dt} (\Phi_m \sin \omega t)$$

$$e = N\omega\Phi_m \cos \omega t$$

dimana merupakan fungsi dari banyaknya putaran permenit sehingga secara keluruhan hubungan antara tegangan keluaran dengan rotasi permenit mempunyai hubungan :

$$E = cn\Phi$$

$E =$ tegangan keluaran

$c =$ konstanta

$\Phi =$ fluks magnet

$n =$ rotasi permenit

4.1.3 Pengukuran Temperatur

1. Termometer tahanan

Detektor temperatur tahanan atau termometer tahanan, menggunakan elemen sensitif dari kawat platina, tembaga atau nikel murni yang memberikan nilai tahanan yang terbatas untuk masing-masing temperatur di dalam rangkumannya. Hubungan antara temperatur dan tahanan konduktor dalam rangkuman temperatur sekitar 0°C dapat ditentukan dari persamaan,

$$R_t = R_{ref} (1 + \alpha \Delta t)$$

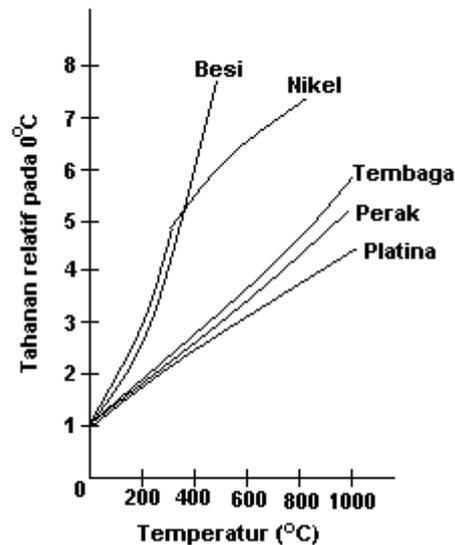
Dimana R_t = tahanan konduktor pada temperatur t (°C)

R_{ref} = tahanan pada temperatur referensi, biasanya 0°C

α = koefisien temperatur tahanan

Δt = selisih antara temperatur kerja dan temperatur referensi.

Gambar 4.9 memperlihatkan variasi tahanan terhadap temperatur untuk berbagai bahan yang lazim digunakan. Grafik menunjukkan bahwa tahanan platina dan tembaga bertambah hampir linear terhadap temperatur sedang karakteristik nikel jelas tidak linear.



Gambar 4.9 Tahanan relatif $\left(\frac{R_t}{R_{ref}}\right)$ terhadap temperatur untuk beberapa logam murni

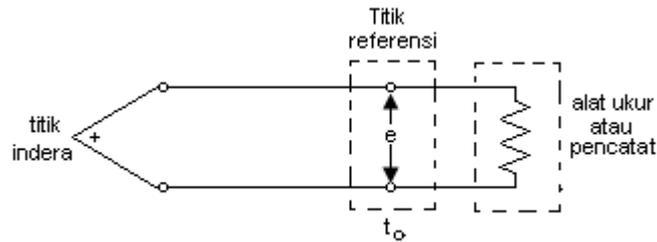
Elemen pengidera dari sebuah termometer tahanan dipilih berdasarkan pemakaian yang diinginkan. Tabel 4-2 menyajikan karakteristik dari tiga bahan tahanan yang paling lazim digunakan. Kawat platina kebanyakan digunakan untuk pemakaian laboratorium dan untuk pengukura ketelitian tinggi pada industri. Kawat nikel dan tembaga lebih murah dan lebih mudah dibuat daripada elemen kawat platina, dan sering digunakan di industri untuk pemakaian rangkuman rendah.

Umumnya termometer tahanan adalah berbentuk jarum penduga untuk dicelupkan ke dalam medium yang temperaturnya akan diukur atau dikontrol.

Tabel 4-2 Elemen-elemen termometer tahanan

Jenis	Rangkuman temperatur	Ketelitian	Keuntungan	Kekurangan
Platina	-300°F sampai +1500°F	$\pm 1^\circ\text{F}$	<ul style="list-style-type: none"> - murah - stabilitas tinggi - rangkuman kerja lebar 	<ul style="list-style-type: none"> - waktu respons yang relatif lambat (15 s) - tidak selinear tembaga
Tembaga	-325°F sampai + 250°F	$\pm 0,5^\circ\text{F}$	<ul style="list-style-type: none"> - linearitas tinggi - ketelitian dalam rangkuman temperatur sekeliling 	<ul style="list-style-type: none"> - rangkuman temperature terbatas
Nikel	+32°F	$\pm 0,5^\circ\text{F}$	<ul style="list-style-type: none"> - umur panjang - Sensitivitas tinggi - Koefisien temperature tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> - lebih linear daripada tembaga - rangkuman temperatur terbatas

2. Termokopel



Gambar 4.10 Rangkaian dasar termokopel

$$\text{Dimana } e = At + \frac{1}{2}Bt^2 + \frac{1}{3}Ct^3$$

t = temperatur titik indera

A, B, dan C = Konstanta-konstanta bahan termokopel

Sebuah termokopel terdiri dari sepasang kawat logam yang tidak sama dihubungkan bersama-sama pada satu ujung (ujung pengindra atau ujung panas) dan berakhir pada ujung lain (titik referensi atau ujung dingin) yang dipertahankan pada suatu temperatur konstan yang diketahui (temperatur referensi). Bila antara ujung pengindra dan titik referensi terdapat perbedaan temperatur, suatu ggl yang menyebabkan arus di dalam rangkaian akan dihasilkan. Bila titik referensi ditutup oleh sebuah alat ukur atau instrumen pencatat seperti dalam gambar 4.10, penunjukkan alat ukur tersebut akan sebanding dengan selisih temperatur antara ujung panas dan titik referensi. Efek termolistrik yang diakibatkan oleh potensial-potensial kontak pada titik-titik sambung dikenal sebagai efek *Seebeck*.

Besarnya ggl termal bergantung pada bahan kawat yang digunakan dan pada selisih temperature antara titik-titik sambung.

MODUL VI

SISTEM INSTRUMENTASI ELEKTRONIKA

OP-AMP

Tujuan Instruksional Umum

Agar mahasiswa dapat memahami tentang Op-amp

Tujuan Instruksional Khusus

- Dapat menerangkan tentang sifat-sifat ideal Op-amp
- Dapat menerangkan penguat menggunakan Op-amp

Buku Rujukan

- Rangan Sarma : Instrumentasi Devices And Sistem
- W. Bolton : Mechatronic
- William D.Cooper : Electronic Instrumentasi And Measurement Techniques

6.1. Pendahuluan

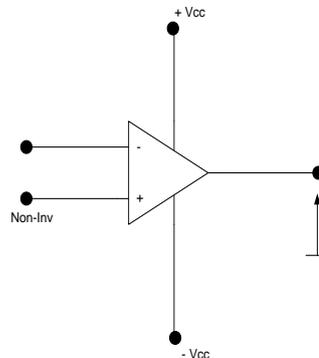
Penguat operasional atau op-amp (dari kata operational amplifier) adalah penguat diferensial dengan dua masukan dan satu keluaran yang mempunyai penguatan tegangan yang amat tinggi, yaitu dalam orde 10^5 . dengan penguatan yang amat tinggi ini, penguat operasional dengan rangkaian balikan lebih banyak digunakan daripada dalam lingkaran terbuka.

Pada masa kini op-amp dibuat dalam bentuk rangkaian terpadu atau IC (Integrated Circuit), dimana dalam satu potong kristal silicon dengan luas kurang dari 1 mm^2 terkadang rangkaian penguat lengkap terdiri dari banyak transistor, dioda, resistor, dan kadang-kadang kapasitor. Kini kita dapat membeli suatu IC yang dalam satu potongan kristal mengandung empat buah op-amp sekaligus.

Pemakaian op-amp amatlah luas meliputi bidang elektronika audio, pengatur tegangan dc, tapis aktif, penyearah presisi, pengubah analog ke digital dan pengubah digital ke analog, pengolah isyarat seperti cupliktahan , penguat pengunci, pengintegral, kendali otomatis, computer analog, elektronik nuklir, dan lain-lain.

6.2. Sifat-sifat ideal op-amp

Op-amp biasanya dilakukan dengan gambar 6.1



Gambar 6.1

Tampak ada dua masukan, yaitu masukan pembalik (inv) dan masukan tak membalik (non inv). Masukan diberi tanda minus dan masukan tidak membalik diberi tanda (+). Jika isyarat masukan dihubungkan dengan masukan membalik, maka pada daerah frekuensi tengah isyarat keluaran berlawanan fasa atau berlawanan tanda dengan isyarat masukan.

Sebaliknya jika isyarat masukan dihubungkan dengan masukan tak membalik maka isyarat keluaran sefasa atau mempunyai tanda yang sama dengan isyarat masukan.

Pada umumnya op-amp menghasilkan tegangan keluaran yang sebanding dengan beda tegangan isyarat antara kedua masukannya. Op-amp semacam ini dikenal sebagai op-amp biasa.

Disamping op-amp biasa ada pula op-amp yang menghasilkan tegangan isyarat keluaran yang sebanding dengan beda arus masukan. Op-amp semacam ini dikenal sebagai op-amp Norton. Satu contoh op-amp Norton adalah IC LM 3900 buatan National semikonduktor. Satu macam ini adalah op-amp yang menghasilkan arus keluaran yang sebanding dengan beda tegangan isyarat antara kedua masukannya. Op-amp semacam ini disebut penguat transkonduktansi operational (Operational Transconductance Amplifier-OTA). Satu contoh OTA adalah IC 3080 buatan RCA. Pada bahasan ini hanya sebatas op-amp biasa.

Beberapa ideal sifat op-amp adalah:

- a. Penguat lingkaran terbuka tak berhingga atau $A_{v,ib} = \infty$
- b. Hambatan keluaran lingkaran terbuka adalah nol, atau $R_{o,ib} = 0$
- c. Hambatan masukan lingkaran terbuka tak berhingga atau $R_{i,ib} = \infty$
- d. Lebar pita tak berhingga, atau $\Delta f = f_2 - f_1 = \infty$
- e. Nisbah penolakan bersama (CMMR) = ∞

Marilah kita tinjau op-amp yang populer digunakan yang dikenal dengan IC 741. Pada mula IC 741 dibuat oleh Fairchild Semiconductor dan bernama $\mu A 741$. Akan tetapi oleh karena amat populer hampir semua perusahaan membuatnya. Untuk 741 kita mempunyai data sebagai berikut $R_{i,lb} = 2 \text{ M}\Omega$, $\text{CMMR} = 90 \text{ dB}$, $A_{v,lb} = 2000009$ pada frekuensi rendah), $R_{o,lb} = 75\Omega$, lebar pita untuk penguatan =1 adalah 1 MHz.

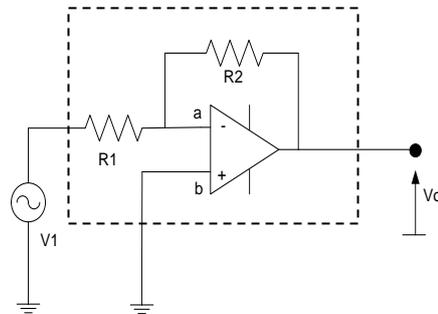
6.3. Penguat Menggunakan Op-amp

Jika kita menggunakan op-amp untuk penguat dengan penguatan yang tidak terlalu besar, kita harus memasang balikan negative. Ini dilakukan dengan memasang resistor antara keluaran dengan masukan membalik. Oleh karena penguatan tanpa balikan (lingkaran terbuka) amat besar maka penguatan lingkaran tertutup (dengan balikan) boleh dikatakan hanya bergantung pada rangkaian balikan saja, dan tak bergantung pada nilai komponen yang digunakan dalam op-amp IC itu sendiri. Ini tak berlaku pada frekuensi tinggi.

Ada tiga macam penguatan yaitu penguat pembalik, penguat tak membalik dan penguat jumlah.

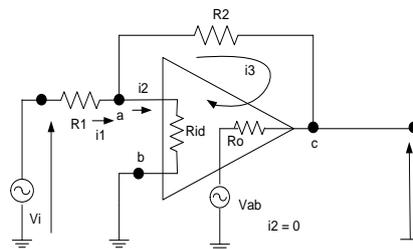
Penguat pembalik

Penguat pembalik sumber isyarat dihubungkan dengan masukan membalik seperti pada gambar 6.2



Gambar 6.2 Penguat pembalik

Kita membahas penguatan lingkaran tertutup ($A_{v,lb}$) dengan pengertian balikan. Akan tetapi disini akan ditempuh jalan lain lebih praktis pada gambar 6.3 pastikan bahwa



Gambar 6.3 Arus isyarat pada penguat pembalik

$$v_o = A_{v,lb} V_{ab}$$

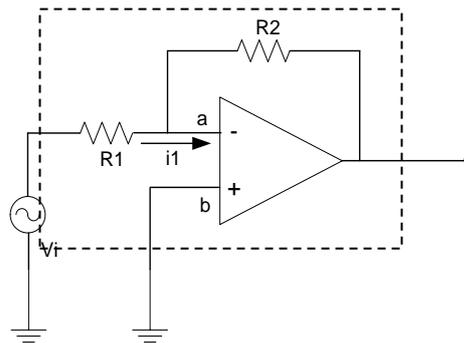
sedangkan

$$C_o = A_{v,it} v_i$$

Tegangan puncak-puncak isyarat keluaran tak melebihi $2 V_{cc}$, sebab bila ini terjadi isyarat keluaran akan tergunting, akibatnya $V_{ab} = \frac{v_o}{A_{v,lb}} \cong 0$, elah karena itu penguatan

lingkar terbuka tampak $V_{ab} \cong 0$ atau $v_a \cong v_b$, akan tetapi antara a dan b ada hambatan masukan R_i yang amat besar, dalam keadaan ini dikatakan titik a dan b keadaan hubungan singkat maya

Selanjutnya oleh karena titik b dihubungkan dengan tanah, titik a dikatakan berada pada tanah maya. Adanya hambatan masukan R_i yang amat besar antara masukan membalik dan tak membalik mengakibatkan arus yang mengalir kedalam masukan membalik dan tak membalik amatlah kecil. Arus isyarat pada penguat membalik ditunjukkan pada gambar 6.4



Gambar 6.4 Menentukan hambatan masukan penguat pembalik

Perhatikan bahwa titik a ada pada tanah maya, sehingga $V_a = 0$. Nyatakanlah $v_i - v_a = i_i R_i$ akan tetapi $V_a = 0$, sehingga $v_i = i_i R_1$ dan $R_{in} = \frac{v_i}{i_i} = R_1$, Hambatan

keluaran amatlah kecil yaitu

$$R_{o,lt} = (R_{o,lb}) \left[\frac{A_{v,lt}}{A_{v,lb}} \right]$$

oleh karena titik a dan b ada dalam keadaan hubung singkat maya dan b pada tanah, maka titik a ada pada tanah maya. Tegangan isyarat pada titik a mendekati nol, akan tetapi titik terpisah dari tanah oleh hambatan masukan R_{id} yang amat besar. Oleh karena adanya hambatan dalam antara masukan membalik dan membalik amat besar maka

$$i_2 \cong 0 \text{ sehingga } i_1 \cong i_3 .$$

kedua hal ini yaitu kedua masukan op-amp ada dalam hubung singkat maya dan bahwa arus isyarat yang masuk dalam op-amp amat kecil sehingga dapat diabaikan, merupakan dasar berfikir terhadap cara kerja op-amp.

Marilah kita kembali kepada penguat pembalik dari gambar 6.3 kita peroleh :

$$v_i = i_i R_i - v_a$$

$$v_a = v_b = 0$$

$$i_1 \cong i_3$$

$$v_a - v_c = i_3 R_2$$

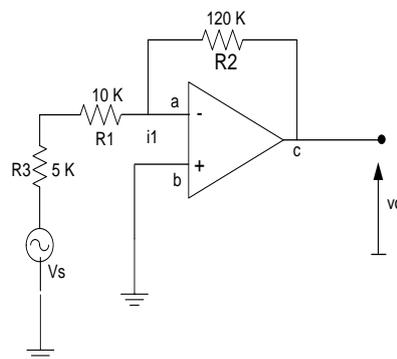
$$v_c = v_o$$

dari hubungan diatas kita peroleh $v_i = i_i R_i$ dan $v_o = - i_3 R_2 = i_1 R_2$ sehingga :

$$A_{v,lt} = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{i_1 R_2}{i_1 R_1} = - \frac{R_2}{R_1}$$

contoh 6.1

misalkan kita mempunyai rangkaian penguat pembalik seperti pada gambar 6.5



Gambar 6.5 Rangkaian untuk contoh soal

Hitunglah tegangan isyarat keluaran jika dihubungkan dengan sumber isyarat tegangan keluaran terbuka 100 m Vpp dan hambatan keluaran 5 K Ω

Jawab :

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{-R_2}{R_1} = \frac{-120K}{10K} = -12$$

atau

$$v_o = - 12 v_i$$

akan tetapi $v_i = \frac{R_{in,lt}}{R_s + R_{in,lt}} v_s = \frac{R_1}{R_s + R_1} v_s$

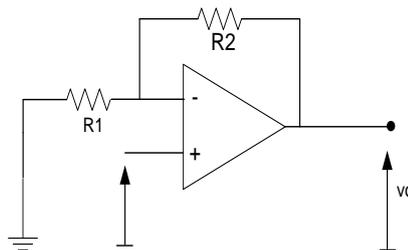
sehingga

$$v_o = -12v_i = -12 \left(\frac{10K}{10K+5K} \right) v_s = -8v_s = -800mV_{pp}$$

dapatlah disimpulkan bahwa

$$\frac{v_o}{v_s} = \frac{-R_2}{R_1 + R_s}$$

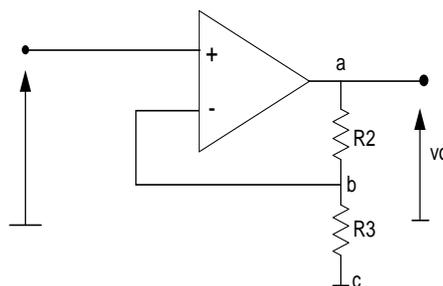
penguat tak membalik



Gambar 6.6 Penguatan tak membalik

Op-amp dapat dipasang untuk membentuk penguat tak membalik seperti pada gambar.

Perhatikan bahwa pada penguat tak membalik isyarat dihubungkan dengan masukan tak membalik (+) pada Op-amp. Balikan melalui R_2 dan R_1 tetap dipasang pada masukan membalik agar membentuk balikan negative. Penguat tak membalik dilukiskan seperti gambar 6.6 dibawah ini



Gambar 6.7

Marilah kita tinjau lingkaran tertutup penguat tak membalik dengan anggapan bahwa lingkaran terbuka $A_{v,lb} = \infty$. Perhatikan gambar oleh karena masukan membalik dan tak membalik berada pada keadaan hubung singkat maya maka $V_b = V_i$.

$$\text{Akan tetapi } V_b = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_a = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$$

Nyatakanlah penguatan lingkaran tertutup untuk penguat tak membalik adalah

$$A_{v,lt} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Hambatan masukan penguat tak membalik amat tinggi karena isyarat masukan berhubungan langsung dengan masukan tak membalik secara teori

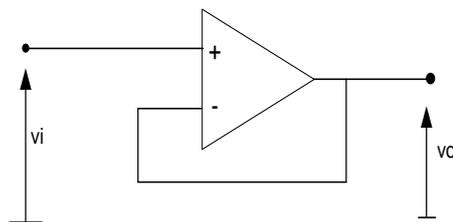
$$R_{i,lt} = R_{i,dif} = R_{i,lb} \left(\frac{A_{v,lb}}{A_{v,lt}} \right)$$

yang mempunyai nilai amat besar (6.4)

Hambatan keluaran R_o mempunyai nilai amat rendah.

Kita dapat membuat suatu bentuk khusus penguat tak membalik dengan membuat agar

$R_1 = \infty$ dan $R_2 = 0$ lihat gambar 6.8

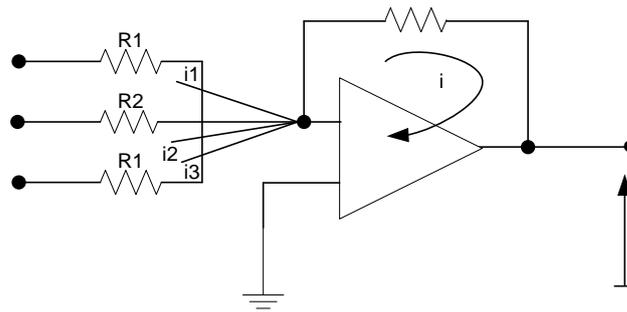


Gambar 6.8 Penguat tegangan

Oleh karena kedua masukan ada dalam keadaan hubung singkat maya maka $v_o = v_i$ atau penguatan lingkaran tertutup sama dengan satu. Penguatan dalam bentuk ini disebut pengikut tegangan, mengikuti nama pengikut emitor pada penguat transistor diskret. Pengikut tegangan mempunyai penguatan sama dengan satu, impedansi masukan amat tinggi, dan keluaran amat kecil. Jadi pengikut tegangan berfungsi sebagai penyangga dengan penguatan sama dengan satu.

Penguat jumlah

Agar pengertian tanah maya menjadi lebih jelas lagi, kita bahas penguat jumlah dengan rangkaian seperti pada gambar 6.9. oleh karena masukan membalik (-) ada dalam keadaan hubung singkat maya dengan tak membalik (+), sedang masukan tak membalik berhubungan dengan tanah, maka membalik berada pada tanah maya.



Gambar 6.9 Rangkaian penguat jumlah

Dari gambar 6.9 terlihat arus i_1 dari masukan v_1 terus menuju titik a dan tak akan masuk R_2 dan R_3 . Begitu juga halnya dengan arus i_2 dan v_2 , dan arus i_3 dari masukan v_3 . Jadi arus dari ketiga masukan ini tak saling mengganggu. Jumlah ketiga arus masukan ini seolah-olah diteruskan ke R_4 oleh karena $i_a \cong 0$ sehingga

$$v_a - v_o = i R_4 = (i_1 + i_2 + i_3) R_4$$

Oleh karena $v_a = 0$ tanah maya maka

$$v_o = -i R_4 = - (i_1 + i_2 + i_3) R_4$$

$$i_1 = \frac{v_1 - v_a}{R_1} = \frac{v_1}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{v_2 - v_a}{R_1} = \frac{v_2}{R_2}$$

$$i_3 = -\frac{v_3 - v_a}{R_3} = \frac{v_3}{R_3}$$

Persamaan diatas menjadi

$$v_o = -\left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3}\right) R_4$$

$$v_o = -\left(\frac{R_4}{R_1} v_1 + \frac{R_4}{R_2} v_2 + \frac{R_4}{R_3} v_3\right)$$

Penguat jumlah ini sering digunakan untuk menjumlahkan atau mencampur berapa isyarat suara tanpa saling mengganggu. Alat semacam ini dikenal sebagai audio yang digunakan untuk mencampur isyarat musik dari instrument dan suara penyanyi melalui mikropon.

MODUL VII

SISTEM INSTRUMENTASI ELEKTRONIKA

SIFAT DAN BESARAN OP-AMP

Tujuan intruksional umum

Agar mahasiswa dapat memahami sifat dan besaran Op-amp

Tinjauan Instruksional khusus

- Dapat menerangkan tentang ofset tegangan keluaran
- Dapat menerangkan tentang tanggapan amplitude
- Dapat menerangkan impedansi keluaran dan masukan

Buku Rujukan :

- | | |
|---------------------|--|
| ▪ Rangan Sarma | Instrumentation Devices and Sistem |
| ▪ W. Bolton | Mechatronic |
| ▪ William D. Cooper | <i>Electronic Instrumentation and</i>
Measurement Technique |

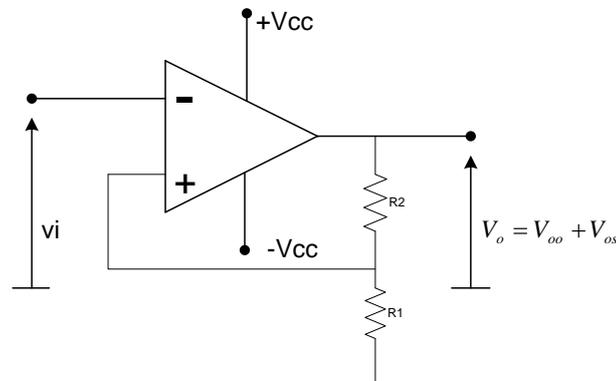
Beberapa sifat dan besaran dasar op-amp

dalam pembahasan ini kita akan membahas beberapa sifat lain dari op-amp misalnya arus panjar masukan, offset masukan dan keluaran, laju belok dan tanggapan frekuensi.

7.1 Ofset tegangan keluaran

Offset pada tegangan keluaran atau disingkat offset keluaran ($V_{o,of}$), menyatakan tegangan dc pada keluaran op-amp jika op-amp dalam keadaan lingkaran tertutup tidak diberi isyarat masukan ($v_i = 0$) Suatu op-amp yang ideal ialah apabila tidak ada isyarat masukan maka tegangan dc pada keluaran sama dengan nol, jika op-amp bekerja dengan catu daya dwikutub ($+V_{cc}$ dan $-V_{cc}$), jika tanpa isyarat masukan tegangan dc pada keluaran tak sama dengan nol dikatakan op-amp mempunyai ofset pada tegangan keluaran. adanya ofset membatasi kemampuan penguat untuk

menghasilkan isyarat keluaran yang besar tanpa cacat. Agar lebih jelas perhatikan gambar 7.1



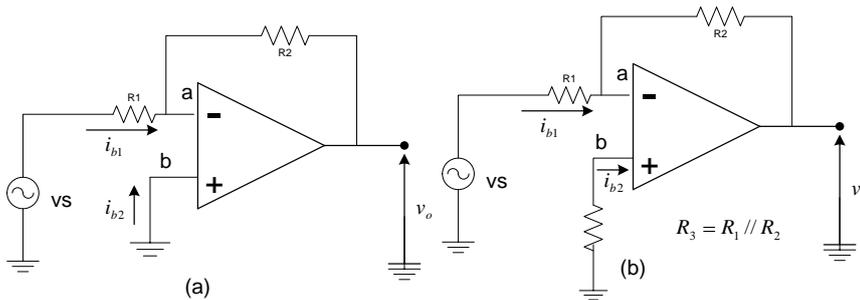
Gambar 7.1 Penguat tak membalik dengan catu daya simetrik

Bila tidak ada ofset pada tegangan keluaran kita akan mampu memperoleh isyarat keluaran dengan nilai puncak mendekati Vcc seperti dilukiskan pada gambar 7.2 a



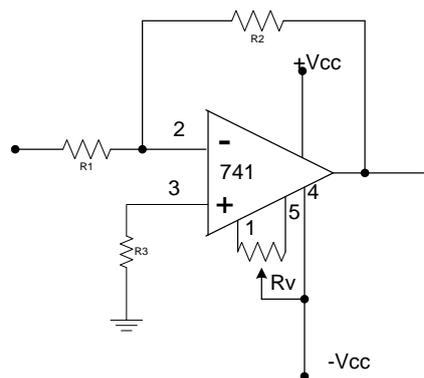
Gambar 7.2 Pengaruh ofset pada isyarat keluaran (a) tanpa ofset V_{oo} ; (b) dengan ofset V_{oo} .

Jika ada ofset, isyarat keluaran akan menumpang di atas tegangan ofset sehingga $V_{opmaks} = V_{cc} - V_{o,of}$ Penyebab terjadinya ofset pada tegangan keluaran ada bermacam-macam. Di antaranya ialah karena kedua bagian penguat difrensial pada masukan tidak tepat sama. Sehubungan dengan ini orang mendefenisikan ofset tegangan masukan $V_{i,of}$ sebagai tegangan maksimum yang diperlukan pada op-amp dengan rangkaian terbuka agar tak ada ofset pada tegangan keluaran. Sebab lain adalah arus panjar masukan pada basis kedua transistor penguat difrensial dalam melihat hambatan yang berbeda pada masukan membalik dan tak membalik seperti pada gambar 7.3 a.



Gambar 7.3 Pengaruh arus masukan

dilihat dari titik a resistor R_1 dan R_2 tampak paralel, sehingga jika pada masukan tak membalik (+) kita beri hambatan R_3 dengan $R_3 = R_1 // R_2$, maka kedua masukan akan melihat hambatan yang kurang lebih sama, sehingga ofset tegangan keluaran oleh arus panjar masukan berkurang. Kedua arus panjar masukan, yaitu I_{B1} dan I_{B2} tidaklah sama besar. Selisih kedua arus panjar masukan ini disebut ofset arus panjar, yang dinyatakan sebagai $I_{io} = I_{B1} - I_{B2}$. Ofset arus panjar ini akan mengakibatkan tegangan keluaran $V_{o,of} = R_2 I_{io}$. Hubungan ini menyatakan bahwa besar nilai hambatan R_2 dibatasi oleh ofset pada arus masukan. Sebagai contoh ofset masukan I_{io} untuk 741 mempunyai nilai antara 12 nA hingga 500 nA. Jika untuk penguat pada gambar kita gunakan $R_2 = 10\text{ M}$ kita dapat memperoleh ofset tegangan keluaran $V_{o,of} \cong I_{io} R_2 = 5\text{ Volt}$. Besar arus panjar masukan dan ofset pada arus masukan amat penting pada penguat instrumentasi, pada pengintegral dan cuplik pada tanah.

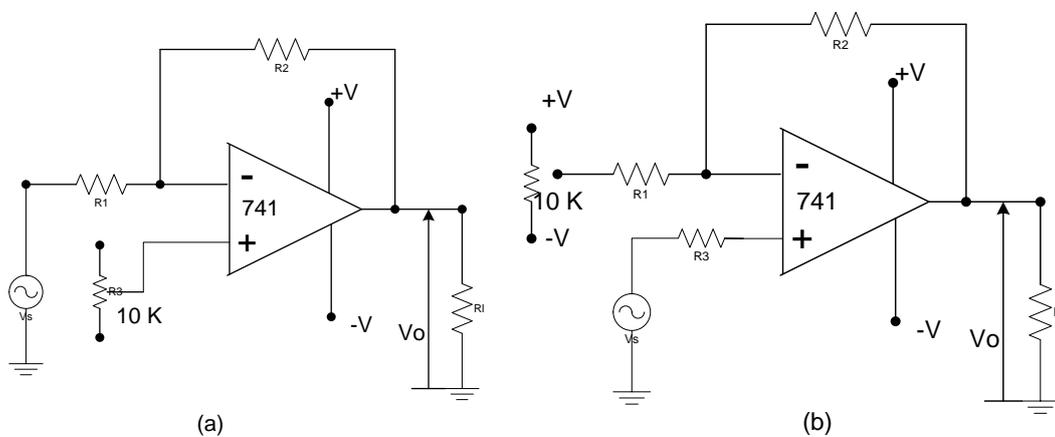


Gambar 7.4 Potensiometer R_v digunakan untuk meniadakan ofset pada keluarannya

Adanya offset pada keluaran dapat diatasi dengan berbagai cara . beberapa jenis op-amp mempunyai kaki-kaki untuk membuat agar offset keluaran menjadi nol. Kedua kaki ini disebut kaki pelenyap offset.

Pada penguat 741 pelenyap rangkaian offset dipasang anatara kaki nomor 1 dan 5 seperti pada gambar. 7.4

Untuk op-amp yang tak mempunyai pengaturan offset di dalamnya dapat digunakan rangkaian seperti pada gambar 7.5

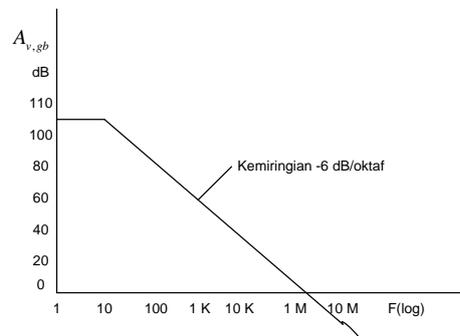


Gambar 7.5 Pengaturan offset keluaran (a) Penguat pembalik (b) Penguat tak membalik

Tanggapan Amplitudo

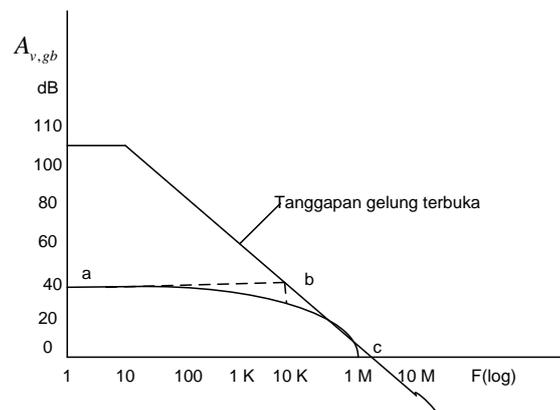
Pada umumnya op-amp mempunyai beberapa tahap penguatan di dalamnya dengan menggunakan gandengan dc. Akibatnya op-amp tak punya kutub di daerah frekuensi rendah dan mempunyai lebih dari dua kutub pada daerah frekuensi tinggi. Agar op-amp dapat diberi berbagai nilai factor balikan tanpa mengakibatkan ketidakmantapan (osilasi), maka op-amp harus menggunakan kompensasi frekuensi . pada beberapa macam op-amp seperti misalnya 741, LM 324, RC 4739 dan XR 4196 kompensasi frekuensi sudah dipasang dalam IC . Op-amp tersebut dikatakan mempunyai *kompensasi dalam* . Pada beberapa macam IC yang lain kita harus menambahkan kapasitor dan resistor pada kaki-kaki tertentu untuk kompensasi frekwensi. Op-amp ini dikatakan mempunyai *kompensasi luar*. Beberapa contoh kompensasi luar adalah 748, 709, LM 301, LM 308, dan LF357.

Tanggapan amplitudo op-amp dengan kompensasi dalam seperti pada op-amp 741 dilukiskan pada gambar .7.6.



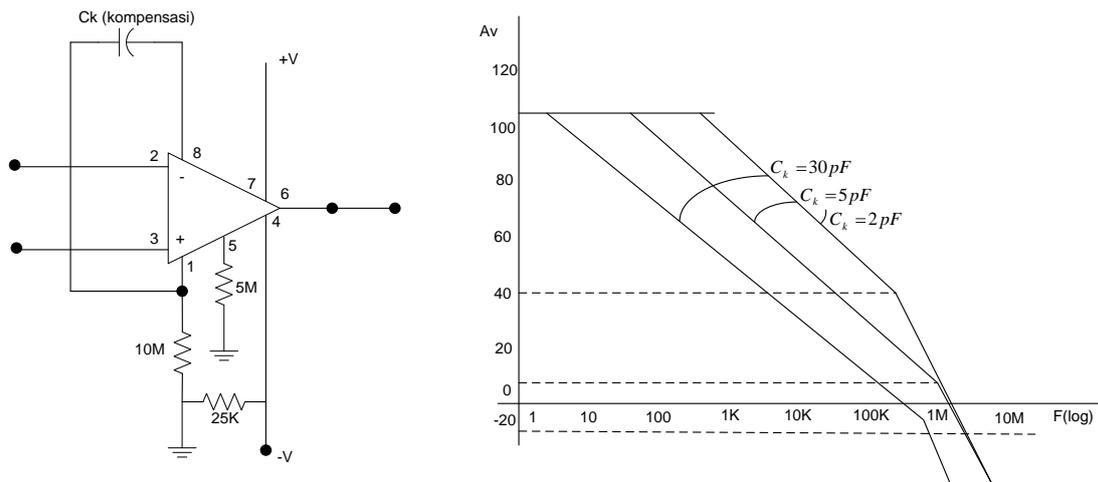
Gambar 7.6 Tanggapan amplitudo 741

Misalkan kita ingin menentukan tanggapan amplitude penguat lingkur tertutup sebesar $A_{v, it} = 40$ dB. Kita tarik garis ab pada $A_v = 40$ dB. Bagan Bode untuk lingkur tertutup diberikan oleh garis patah abc, dan tanggapan frekwensinya dilukiskan dengan garis putus-putus (gambar 7.7). Dari gambar 7.7 tampak bahwa jika digunakan penyangga dengan penguatan satu (0 dB), 741 dapat mempunyai frekwensi potong atas 1 M Hz. Dengan kata lain dapat dikatakan, *lebar pita pada penguatan satu kali* adalah 1 MHz. Op-amp LM 357 misalnya mempunyai lebar pita pada penguatan satu kali sebesar 20 MHz.



Gambar 7.7 Tanggapan amplitudo lingkur untuk penguatan $A_{v, it} = 40$ dB

Untuk op-amp dengan kompensasi-luar tanggapan amplitudo lingkaran terbuka bergantung pada rangkaian kompensasi yang dipasang. Op-amp 748 mempunyai rangkaian didalam IC yang tepat sama dengan 741, tetapi tanpa kompensasi kutub dominant pada transistor keluarannya. Pada 748 kapasitor untuk kompensasi harus dipasang diluar IC. Op-amp 709 menggunakan dua rangkaian kompensasi frekwensi yaitu kompensasi masukan dan kompensasi keluaran.



Gambar 7.8 Op-amp 748 beserta tanggapan amplitudonya; **(a)** diagram kaki beserta rangkaian untuk offset; **(b)** tanggapan amplitudo.

Jika dipasang kapasitor kompensasi $C_k = 30 \text{ pF}$, tampak tanggapan amplitudo turun dengan kemiringan -6 dB/oktaf dari penguatan lebih dari 100 dB hingga kira-kira -10 dB . Pada keadaan ini 748 dapat digunakan sebagai penyangga dengan penguatan satu kali. Untuk nilai kapasitansi $C_k = 5 \text{ pF}$ pada penguatan dibawah $A_v = 10 \text{ dB}$, tanggapan amplitudo turun dengan kemiringan lebih curam -6 dB/oktaf . Pada keadaan ini 748 tak dapat digunakan untuk penguatan lingkaran tertutup kurang dari 10 dB , atau agar lebih pasti jangan digunakan untuk penguatan lebih dari 20 dB , atau 10 kali. Untuk $C_k = 2 \text{ pF}$ jangan gunakan 748 untuk penguatan kurang dari 40 dB atau 100 kali.

Keuntungan op-amp dengan kompensasi luar ialah pada nilai penguatan tinggi kita dapat mempunyai frekuensi potong atas yang lebih tinggi dari op-amp kompensasi dalam.

Laju belok

Laju belok menyatakan sifat op-amp terhadap isyarat besar berupa isyarat persegi atau denyut, yaitu untuk perubahan tegangan yang mendadak. Laju belok dinyatakan

dengan $\frac{v}{\mu s}$ yang menyatakan berapa volt isyarat keluaran berubah dalam waktu 1

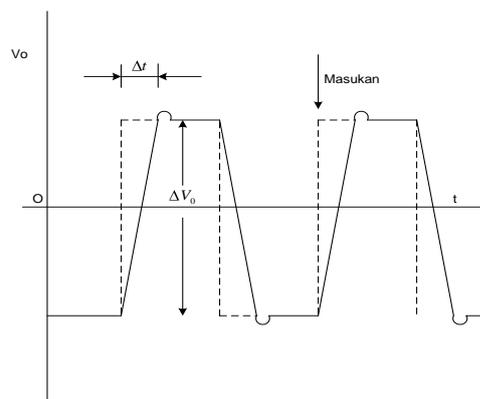
μs , jika masukan diberi isyarat berbentuk tingkap. Op-amp untuk keperluan umum

biasanya mempunyai laju belok sekitar $0,5 \frac{v}{\mu s}$, seperti 741, 709 301 dan sebagainya.

Op-amp LF 357 dengan lebar pita untuk penguatan satu sebesar 20 M Hz mempunyai

laju belok $50 \frac{v}{\mu s}$. Op-amp LH 0024 mempunyai laju belok $500 \frac{v}{\mu s}$. Untuk laju belok

yang lebih tinggi orang harus menggunakan op-amp hybrid yang merupakan campuran IC dan diskret. Pengaruh laju belok pada bentuk isyarat keluaran dilukiskan pada gambar 7.9



Gambar 7.9 Pengaruh laju belok pada bentuk isyarat keluaran

Pada gambar 7.9 di atas laju belok dapat ditentukan dari $\frac{\Delta v_o}{\Delta t}$. Laju belok disebabkan

oleh pengisian dan pengosongan muatan kapasitor kompensasi. Makin kecil kapasitor kompensasi luar makin tinggi laju belok. Jika kita bekerja dengan op-amp kompensasi luar kita dapat mengatur nilai laju belok yang lebih tinggi dengan

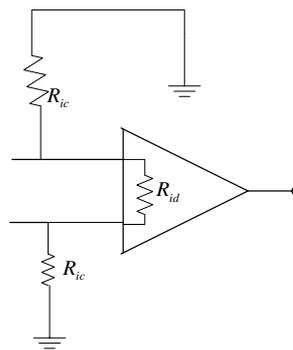
menggunakan kapasitansi yang kecil, dengan kemandapan balikan yang bersangkutan.

Impedansi masukan dan keluaran

Op-amp yang ideal mempunyai impedansi atau hambatan takberhingga dan hambatan keluaran nol. op-amp IC yang paling populer yaitu 741 mempunyai hambatan masukan kira-kira $1\text{ M}\Omega$, dan hambatan keluaran $75\ \Omega$. Op-amp lain yang banyak digunakan yaitu 709, mempunyai hambatan masukan kira-kira $150\text{ K}\Omega$, dan hambatan keluaran $200\ \Omega$. Op-amp IC LF 157 yang mempunyai tahap penguat difensial menggunakan JFET, mempunyai impedansi masukan $10^{12}\ \Omega$.

Impedansi masukan yang dinyatakan dalam lembar data op-amp adalah untuk keadaan lingkaran terbuka. Ada dua pengertian tentang impedansi masukan, yaitu masukan difrensial R_{id}

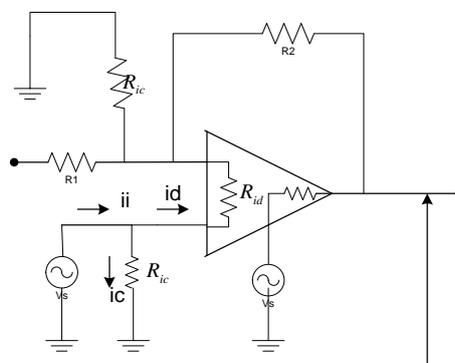
Dan impedansi masukan modus bersama R_{ic} kedua impedansi ini dilukiskan pada gambar 7.10



Gambar 7.10 Impedansi masukan Pada IC op-amp

Untuk menentukan R_i penguat, kita pasang suatu sumber tegangan tetap v_i , dan kita

hitung arus yang ditarik i_i , maka $R_i = \frac{v_i}{i_i}$



Gambar 7.11 Impedansi masukan pada penguat tak membalik

Dari gambar 7.11

$$i_i = i_c + i_d$$

tetapi

$$i_c = \frac{v_i}{R_{ic}}$$

$$i_d = \frac{v_{ab}}{R_{id,lb}} \text{ dan } v_{ab} = \frac{v_o}{A_{v,lb}}$$

$$\text{sehingga } i_d = \frac{v_o}{R_{id,lb} A_{v,lb}}$$

$$\text{tetapi } v_o = A_{v,lt} v_i$$

$$\text{sehingga } i_d = \frac{A_{v,lt} v_i}{R_{id,lb} A_{v,lb}} = \frac{v_i}{R_{id,lb} \frac{A_{v,lb}}{A_{v,lt}}}$$

$$\text{dapat dituliskan } i_d = \frac{v_i}{R_{id,ef}}$$

$$\text{dengan } R_{id,ef} = \frac{A_{v,lb}}{A_{v,lt}} R_{id,lb}$$

$$\text{oleh karena } i_i = i_c + i_d$$

$$i_i = \frac{v_i}{R_{ic}} + \frac{v_i}{R_{id,ef}}$$

$$\text{maka } \frac{1}{R_i} = \frac{i_i}{v_i} = \frac{v_i}{R_{ic}} + \frac{v_i}{R_{id,ef}}$$

atau

$$R_i = R_{id,ef} // R_{ic} \text{ dengan } R_{id,ef} = \frac{A_{v,lb}}{A_{v,lt}} R_{id,lb}$$

lembaran data op-amp biasanya menyatakan impedansi masukan diferensial. Jadi untuk 741 $R_{id} \cong 1\text{M}\Omega$ dan untuk 709 adalah $R_{id} = 200\text{M}\Omega$ impedansi masukan modus bersama R_{ic} biasanya jauh lebih besar daripada R_{id} (lingkar terbuka) yang mempunyai nilai hambatan tak terlalu besar, tetapi pada keadaan lingk tertutup mempunyai nilai efektif yang besar. Sebagai contoh marilah kita bahas impedansi masukan penguat tak membalik seperti gambar 7.11

pada keadaan lingkaran tertutup hambatan masukan penguat adalah

$$R_i = (R_{id,ef} + R_{ic} // R_2 // R_1) // R_{ic}$$

$$\approx R_{id,ef} // R_{ic}$$

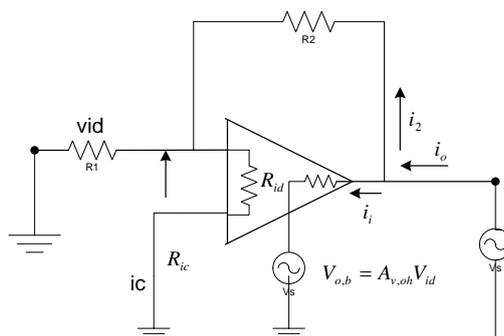
$R_{id,ef}$ adalah impedansi masukan difrensial dilihat dari difrensial a dan b, pada keadaan lingkaran terbuka $R_{id,ef} = R_{id,lb}$. Nyata bahwa walaupun $R_{id,lb}$ mungkin mempunyai nilai tak terlalu besar, tetapi keadaan lingkaran tertutup tampak mempunyai nilai efektif sebesar

$$R_{id,ef} = \frac{A_{v,lb}}{A_{v,lt}} R_{id,lb}$$

Pada op-amp dalam keadaan lingkaran tertutup mungkin $R_{id,ef} \cong R_{ic}$ sehingga

$$R_{in} = R_{id,ef} // R_{ic}$$

Impedansi keluaran



Gambar 7.12 Menentukan $R_{o,lt}$

Impedansi keluaran op-amp dalam keadaan lingkaran tertutup dapat mempunyai nilai yang jauh lebih kecil daripada impedansi keluaran lingkaran terbuka. Ini dapat kita tunjukkan dengan uraian sebagai berikut. Untuk menentukan impedansi keluaran kita pasang suatu sumber tegangan khayal v_o , hingga arus i_o yang ditarik dari v_o maka

$$R_o = v_o / i_o$$

dari gambar

$$i_o = i_1 + i_2$$

$$i_2 = \frac{v_o}{R_1 + R_2}$$

$$i_1 = \frac{v_{o,lb}}{R_{o,lb}} = \frac{A_{v,lb} v_{id}}{R_{o,lb}}$$

$$v_{id} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o = \frac{v_o}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

$$= \frac{v_o}{A_{v,lt}}$$

$$i_o = \frac{A_{v,lb} x \frac{v_o}{A_{v,lt}}}{R_{o,lb}} + \frac{v_o}{R_1 + R_2}$$

$$R_o = \frac{i_o}{v_o} = \frac{1}{R_{o,lb} \frac{A_{v,lt}}{A_{v,lb}}} + \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{R_{o,lt}} \text{ atau}$$

$$R_{o,lt} = \left(R_{o,lb} \frac{A_{v,lt}}{A_{v,lb}} \right) // (R_1 + R_2)$$

$$R_{o,lt} = \left(R_{o,lb} \frac{A_{v,lt}}{A_{v,lb}} \right)$$

karena $R_{o,lb} \frac{A_{v,lt}}{A_{v,lb}} \ll (R_1 + R_2)$