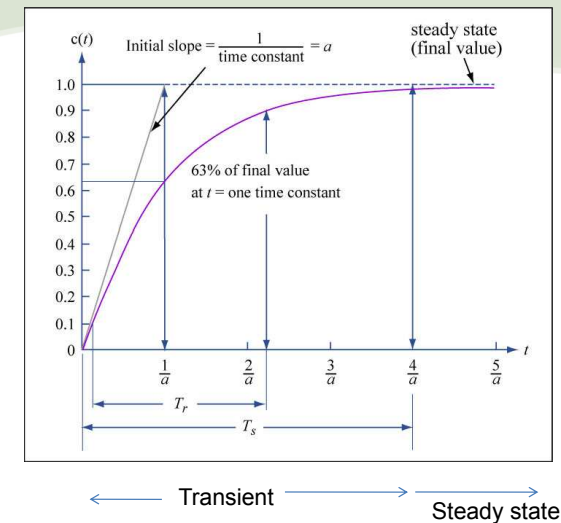


Bab 4: Perhitungan Karakteristik Dinamik

Dr. Ir. Yeffry Handoko Putra, M.T

134

Kondisi Pengukuran



135

- **Karakteristik dinamik** dapat dinyatakan sebagai respon sistem pada
 - saat transien pada input konstan
 - diberikan input yang berubah terhadap waktu.
- **Karakteristik dari “orde instrumen”**
 - Instrumen orde nol dikarakterisir oleh : **sensitivitas = K (perbandingan output-input)**
 - Instrumen orde satu dikarakterisir oleh : **sensitivitas (K) dan konstanta waktu (τ)**
 - Instrumen orde dua dikarakterisir oleh : **gain (K) dan dua macam konstanta waktu (τ_1 dan τ_2) atau frekuensi natural (ω_n) dan perbandingan redaman (ξ)**
 - Instrumen orde tinggi dikarakterisir seperti pada instrumen orde nol, orde satu atau orde 2 ditambah dengan waktu mati.

136

- **Respon instrumen pada saat transien (untuk input konstan)**
 - Instrumen orde nol, respon instrumen persis seperti inputnya
 - Instrumen orde satu, respon instrumen perlu waktu untuk mencapai keadaan steady (harga konstan)
 - Sistem orde dua, menghasilkan overshoot.
 - Sistem orde tinggi sistem tidak merespons sebelum waktu mati terlewati.
- **Efek dinamik pada keadaan steady state untuk input konstan**
 - Untuk instrumen dengan semua orde, memberikan harga respons (output) yang juga konstan, dimana harga respons (e_o) sama dengan perkalian antara sensitivitas (K) dan input (e_i)

$$e_o = K e_i$$

137

Parameter yang terkait pada sistem dinamis

- **Waktu settling (settling time):** waktu yang diperlukan supaya harga respons sistem mencapai kesalahan 5% dari harga steady state
- **Waktu mati (dead time):** waktu yang diperlukan sistem untuk mulai merespons diukur terhadap saat input yang diberikan
- **Konstanta waktu (time constant):** parameter pada sistem orde I, yang tergantung pada parameter fisik sistem
Contoh pada sistem termal $\tau = \frac{MC_v}{hA}$
- **Waktu naik (rise time):** waktu yang diperlukan oleh sistem supaya harga responsnya naik dari 5% sampai 95% harga steady state

138

Sistem orde Nol

- Adalah sistem yang respons dinamik nya dapat diabaikan, sehingga jika mendapatkan input akan langsung respons seperti yang diharapkan
- Sistem orde nol adalah sistem teoritis, karena tidak akan terjadi pada situasi riil.
- Persamaan sistem orde nol adalah:
$$e_o = K e_i$$
- Dikarakterisir oleh parameter sensitivitas saja (K).
- Jika respons transien tidak menjadi perhatian, maka suatu sistem dinyatakan sebagai sistem orde nol.

139

Sistem Orde I tipe nol, Sistem Termal

- Jika suatu benda dengan volume V dan luas permukaan A, pada temperatur T_b dimasukkan dalam cairan yang temperaturnya T_c ($T_c > T_b$), maka temperatur benda T_b akan naik sampai terjadi kesetimbangan energi termal antara cairan dan benda.
- Persamaan energi

Energi masuk – Energi keluar = Energi Tersimpan

- Energi termal masuk ke benda dari cairan:

$$Q = h A (T_c - T_b) dt$$

- Energi keluar benda = 0, jika benda tenggelam dalam cairan
- Energi tersimpan dalam benda:

$$Q = M C_v \Delta T_b$$

140

- Persamaan kesetimbangan Energi Termal Benda:

$$h A (T_c - T_b) \Delta t = M C_v \Delta T_b$$

h = koefisien perpindahan kalor

A = luas kontak antara benda dengan cairan

M = massa benda

C_v = kapasitas kalor benda

ΔT_b = perubahan temperatur benda

Δt = perubahan waktu

- Persamaan diferensial:

$$M C_v dT_b/dt + h A T_b = h A T_c$$

- Sistem termal disebut sebagai sistem orde I tipe nol, karena orde diferensiasi input nol.

141

- Persamaan diferensial Sistem Orde I tipe nol dalam bentuk umum:

$$\tau \frac{de_o}{dt} + e_o = Ke_i$$

- Di mana $\tau = \frac{MC_v}{hA}$ dan $K = 1$

- Solusi persamaan diferensial dalam domain waktu menyatakan respons sistem sebagai fungsi waktu,
- Solusi persamaan diferensial dalam domain frekuensi menyatakan respons frekuensi sistem.

142

Respons Sistem Orde I dalam domain waktu.
Solusi Pers differensial orde I tipe nol, untuk input Step

$$\frac{MC_v}{hA} \frac{dT_b}{dt} + T_b = T_c \quad \text{atau} \quad \tau \frac{dT_b}{dt} + T_b = T_c$$

- Solusi umum (transien):

$$e_o = (Ce^{-t/\tau})$$

- Input step

$$e_i = \begin{cases} \hat{e}_i & \text{untuk } t \geq 0 \\ 0 & \text{untuk } t < 0 \end{cases}$$

- Solusi Khusus $e_o = K\hat{e}_i$

- Solusi Total

$$e_o = Ce^{-t/\tau} + K\hat{e}_i$$

- Syarat awal: pada $t = 0$ $e_o = 0$, maka

$$C = -K\hat{e}_i$$

- Sehingga Solusi Total

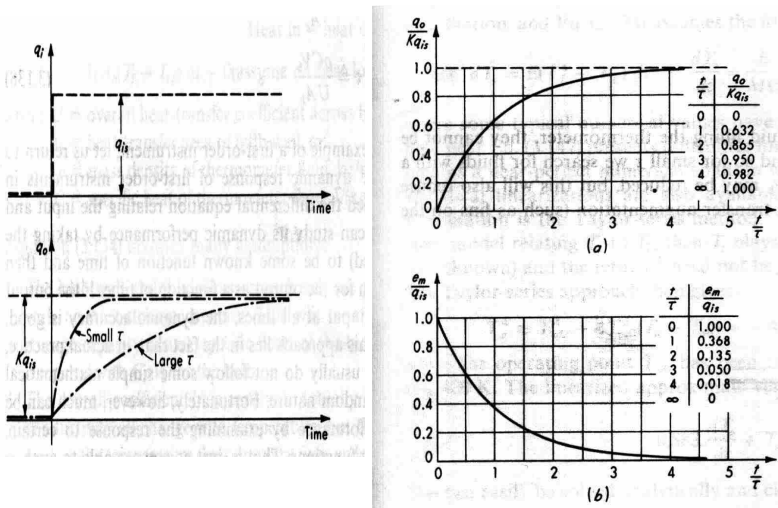
$$e_o = K\hat{e}_i(1 - e^{-t/\tau})$$

- Jika respons transien mati maka output sistem mengikuti bentuk input

$$e_o = K\hat{e}_i$$

143

Respons sistem orde I tipe nol pada input step dan kesalahan respons pada saat transien



144

Respons Orde I untuk Input ramp

- Input ramp

$$e_i = \begin{cases} \alpha t & \text{untuk } t \geq 0 \\ 0 & \text{untuk } t < 0 \end{cases} \quad \alpha = \frac{\partial e_i}{\partial t}$$

- Solusi umum (transien)

$$e_o = (Ce^{-t/\tau})$$

Solusi khusus

- Misal $e_o = At + B$

- $de_o/dt = A$

- Pada $t > 0$

$$\tau \frac{de_o}{dt} + e_o = Ke_i$$

$$\tau A + (At + B) = K\alpha t$$

$$(\tau A + B) + At = K\alpha t$$

Sehingga $A = K\alpha$

$$\tau A + B = 0 \rightarrow B = -K\alpha\tau$$

Solusi khusus:

$$e_o = K\alpha(t - \tau)$$

145

Respons orde I untuk Input ramp (cont)

- Solusi (respon) total

$$e_o = (Ce^{-t/\tau}) + K\alpha(t - \tau)$$

- Syarat awal:

pada $t = 0 \rightarrow e_o = 0$

$$0 = C(1) - K\alpha\tau \rightarrow$$

$$C = K\alpha\tau$$

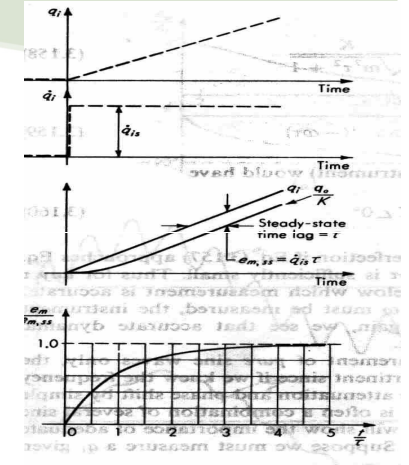
- respons sistem:

$$e_o = K\alpha\tau e^{-t/\tau} + K\alpha(t - \tau)$$

146

Respons Sistem Orde I tipe nol untuk input Ramp

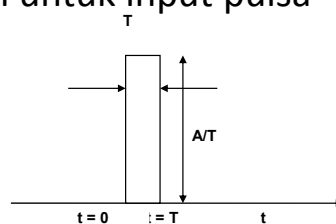
- Respons sistem ini untuk input ramp mempunyai keterlambatan respons selama τ
- Artinya pada suatu waktu $t = t_1$ input yang masuk pada sistem seharga $e_{i1} = \alpha t_1$, seharusnya output sistem adalah $e_o = K\alpha t_1$, atau $e_o/K = \alpha t_1$ tetapi kenyataannya $e_o/K = \alpha(t_1 - \tau)$. Jadi pada $t = t_1$ terjadi kesalahan respons sebesar $\Delta e_o = \alpha\tau$
- Input ramp terjadi pada saat “start-up” dari suatu sistem proses atau sistem lainnya, karena itu sistem kontrol pada saat start up dibedakan dengan saat operasi, yaitu saat telah dicapai keadaan steady dari sistem.



147

Respons orde I tipe nol untuk input pulsa

$$e_i = \begin{cases} 0 & \text{untuk } t < 0 \\ A/T & \text{untuk } 0 < t < T \\ 0 & \text{untuk } t > T \end{cases}$$



- Solusi umum:

$$e_o = Ce^{-t/\tau}$$

– Untuk $t = 0, e_o = 0$

– Untuk $0 < t < T,$

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

– Pada $t = T \rightarrow$

$$e_o = \frac{KA}{T}(1 - e^{-T/\tau})$$

– Pada $t > T \rightarrow$

$$e_o = (Ce^{-t/\tau})$$

– Sehingga pada $t = T$

$$Ce^{-T/\tau} = \frac{KA}{T}(1 - e^{-T/\tau})$$

$$C = \frac{KA}{T} \frac{(1 - e^{-T/\tau})}{e^{-T/\tau}}$$

148

- Solusi total sistem orde I tipe 0 untuk input pulsa

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

- Pada $T \rightarrow 0,$ maka harga

$$C = \lim_{T \rightarrow 0} \frac{KA(1 - e^{-T/\tau})}{T e^{-T/\tau}} = KA \frac{-(-1/\tau)e^{-T/\tau}}{e^{-T/\tau} + T(-1/\tau)e^{-T/\tau}} = \frac{KA}{\tau}$$

- Maka

$$e_o = \frac{KA}{\tau} e^{-t/\tau}$$

- Respons sistem orde I tipe nol untuk input pulsa:

$$e_o = \frac{KA}{\tau} e^{-t/\tau}$$

– Di mana

pada $t = 0 \rightarrow e_o = KA/\tau$ pada $t = \text{besar} \rightarrow e_o = 0$

- Output sinyal pulsa untuk sistem orde I tipe nol berbentuk sinyal yang meluruh dari $e_o = KA/\tau$ menuju ke harga 0 untuk t yang besar

149

Respons orde I tipe nol untuk input sinusoida

- Input sinusoida:
$$e_i = \begin{cases} \hat{e}_i \sin \omega t & \text{untuk } t \geq 0 \\ 0 & \text{untuk } t < 0 \end{cases}$$
- Respons umum:
$$e_o = (C e^{-t/\tau})$$
- Respons khusus:
$$e_o = \hat{e}_o \sin(\omega t + \theta)$$

$$\frac{de_o}{dt} = \hat{e}_o [\omega \cos(\omega t + \theta)]$$
- Persamaan diferensial

$$\tau [\hat{e}_o \omega \cos(\omega t + \theta)] + \hat{e}_o \sin(\omega t + \theta) = K \hat{e}_i \sin(\omega t)$$

$$\hat{e}_o \{ \cos(\omega t) [\omega \tau \cos \theta + \sin \theta] + \sin(\omega t) [-\omega \tau \sin \theta + \cos \theta] \} = K \hat{e}_i \sin(\omega t)$$

$$\omega \tau \cos \theta + \sin \theta = 0 \rightarrow \tan \theta = -\omega \tau \rightarrow \theta = -\tan^{-1}(\omega \tau)$$

$$\sin \theta = \frac{-1}{\sqrt{(\omega \tau)^2 + 1}} ; \cos \theta = \frac{\omega \tau}{\sqrt{(\omega \tau)^2 + 1}}$$

150

$$\hat{e}_o (-\omega \tau \sin \theta + \cos \theta) = K \hat{e}_i \quad \frac{\hat{e}_o}{\hat{e}_i} = \frac{K}{-\omega \tau \left(\frac{-\omega \tau}{\sqrt{(\omega \tau)^2 + 1}} \right) + \frac{1}{\sqrt{(\omega \tau)^2 + 1}}} = \frac{K}{\sqrt{(\omega \tau)^2 + 1}}$$

- Respons pada input sinusoida, setelah transien mati:
$$e_o = \frac{K \hat{e}_i}{\sqrt{(\omega \tau)^2 + 1}} \sin(\omega t + \theta)$$

$$\hat{e}_o = \frac{K \hat{e}_i}{\sqrt{(\omega \tau)^2 + 1}} ; \quad \theta = -\tan^{-1}(\omega \tau)$$
- Dari persamaan ini dapat dilihat bahwa perbandingan amplitudo dan beda fasa output-input merupakan modulus dan argumen fungsi transfer sinusoida.

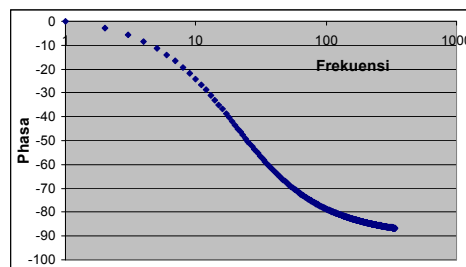
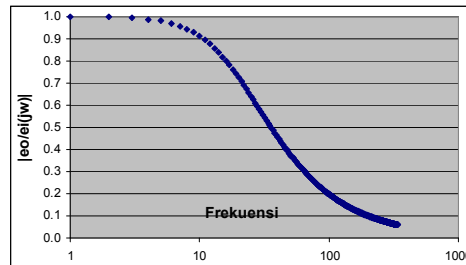
$$\left| \frac{e_o(j\omega)}{e_i} \right| = \frac{K}{\sqrt{(\omega \tau)^2 + 1}} ; \quad \theta = -\tan^{-1}(\omega \tau)$$

151

- Perbandingan amplitudo dan beda fasa sinyal output-input dinyatakan sebagai respons frekuensi sistem pada input sinusoida:

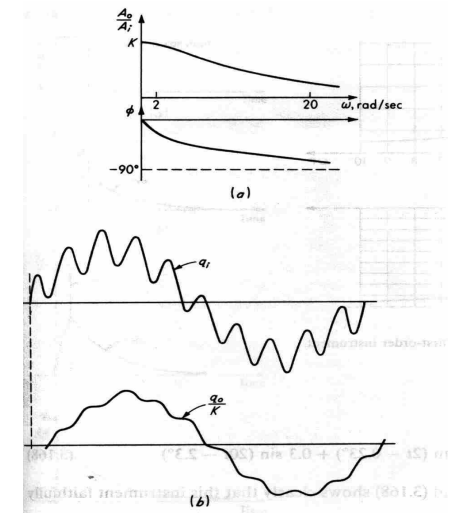
$$\frac{\hat{e}_o}{\hat{e}_i} = \left| \frac{e_o(j\omega)}{e_i} \right| = \frac{K}{\sqrt{(\omega \tau)^2 + 1}}$$

$$\theta = -\tan^{-1}(\omega \tau)$$



152

- Perbandingan amplitudo output-input sebagai fungsi frekuensi input digambarkan pada gambar di samping.
- Sistem orde I tipe nol dapat dinyatakan sebagai LFP (low pass filter).
- Jika diberikan input yang mengandung 2 frekuensi (frekuensi rendah dan tinggi), maka sistem akan memfilter frekuensi tinggi dan melewati frekuensi rendah.



153

Contoh Soal: $\left| \frac{e_o(j\omega)}{e_i} \right| = \frac{K}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}} \quad ; \quad \theta = -\tan^{-1}(\omega\tau)$

- Carilah daerah frekuensi input yang akan memberikan kesalahan penguatan maksimum 5% (ω_{co}), dan cari juga beda fasa output-input pada $\omega = \omega_{co}$

$$0,95K = \frac{K}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}}$$

$$\omega_{co} = \frac{1}{\tau} \sqrt{(1/0,95)^2 - 1}$$

$$\theta = -\tan^{-1}(\omega\tau)$$

- Pada $\omega \ll 1/\tau$,

$$\left| \frac{e_o(j\omega)}{e_i} \right| = K$$

Contoh Soal:

- Carilah settling time, rise time sistem orde I tipe nol jika mendapatkan input step:

$$e_i = \begin{cases} \hat{e}_i & \text{untuk } t \geq 0 \\ 0 & \text{untuk } t < 0 \end{cases}$$

Jika $\tau = 20$ detik.

- Jawab: Settling time

$$e_o = K\hat{e}_i(1 - e^{-t/\tau})$$

$$0,95K\hat{e}_i = K\hat{e}_i(1 - e^{-t/\tau})$$

$$0,05 = e^{-t/\tau}$$

$$\ln(0,05) = -3,04 = -t/\tau$$

$$t = 60 \text{ detik}$$

- Rise time:

$$0,05K\hat{e}_i = K\hat{e}_i(1 - e^{-t/\tau})$$

$$0,95 = e^{-t/\tau}$$

$$-t/\tau = \ln(0,95) \rightarrow t_1 = 1,48$$

$$t_r = 60 - t_1 = 58,52 \text{ detik}$$

Sistem Orde I tipe satu

$$\tau \frac{de_o}{dt} + e_o = K\tau \frac{dx_i}{dt}$$

$$Q = K_q x_i$$

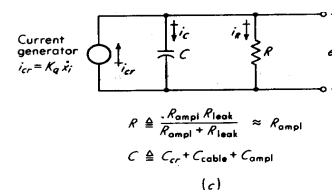
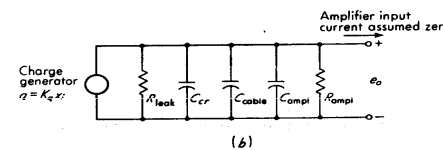
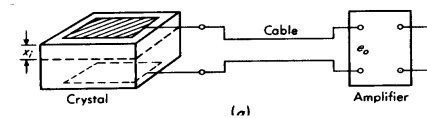
- Salah satu instrumen yang mempunyai karakteristik dinamik orde I tipe satu adalah sensor **piezoelektrik**.
- Bahan piezoelektrik mempunyai sifat:
 - Jika dimensi benda berubah, maka muatan listrik yang dapat tersimpan di dalam bahan akan berubah
 - Jika muatan listrik dalam bahan, maka dimensi benda berubah

- Arus listrik adalah perubahan muatan listrik persatuan waktu:

$$i_{cr} = K_q \frac{dx_i}{dt}$$

- Pada bahan piezoelektrik yang dihubungkan dalam rangkaian tertutup, akan muncul arus listrik i_{cr} , jika dimensi bahan berubah oleh suatu sebab

- Rangkaian pengganti sistem piezoelektrik



- Persamaan arus listrik:

$$i_{cr} = i_C + i_R$$

$$e_o = \frac{1}{C_{tot}} \int i_C dt = i_R R_{tot}$$

$$C_{tot} \frac{de_o}{dt} = i_{cr} - i_R = K_q \frac{dx_i}{dt} - \frac{e_o}{R_{tot}}$$

$$C_{tot} R_{tot} \frac{de_o}{dt} + e_o = K_q R_{tot} \frac{dx_i}{dt}$$

$$\tau \frac{de_o}{dt} + e_o = K\tau \frac{dx_i}{dt}$$

$$\tau = R_{tot} C_{tot} \quad ; \quad K = \frac{K_q}{C_{tot}}$$

- Persamaan fungsi transfer:

$$\frac{e_o}{x_i}(D) = \frac{K\tau D}{\tau D + 1}$$

- Persamaan diferensial

$$\tau \frac{de_o}{dt} + e_o = K\tau \frac{dx_i}{dt}$$

- Solusi umumnya** sama seperti sistem orde I tipe nol

$$e_o = (Ce^{-t/\tau})$$

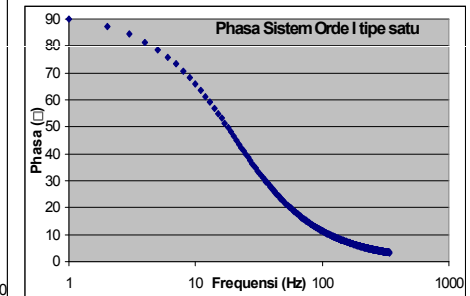
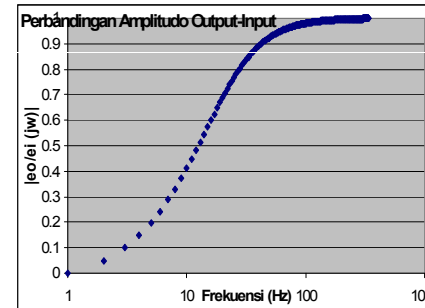
- Solusi khusus tergantung pada input yang bekerja pada sistem

- Input step → mempunyai respons seperti respons sistem orde I tipe nol untuk input pulsa.
- Input ramp → mempunyai respons seperti respons sistem orde I tipe nol untuk input step
- Input sinusoida → berfungsi sebagai HPF (High Pass Filter)

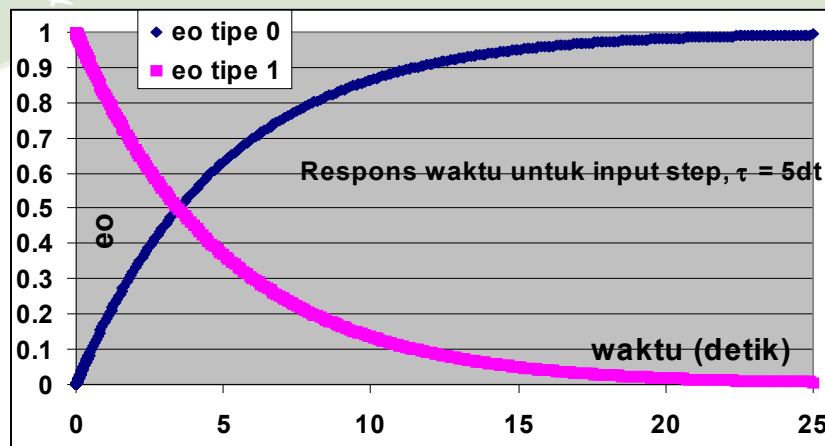
Respons frekuensi sistem orde I tipe satu

- Perbandingan amplitudo dan beda fasa output-input:

$$\left| \frac{e_o}{x_i}(j\omega) \right| = \frac{K\omega\tau}{\sqrt{(\omega\tau)^2 + 1}} \quad \theta = 90^\circ - \tan^{-1}(\omega\tau)$$

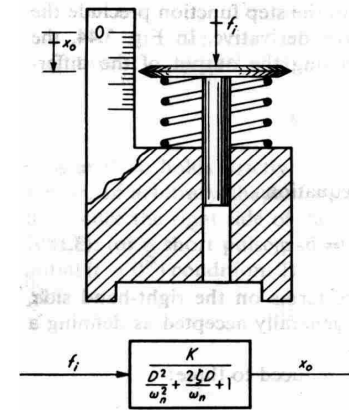


Respons waktu sistem orde I tipe satu



Sistem orde II

- Contoh instrumen dg dinamika orde II



- Load cell adalah instrumen untuk mendeteksi harga gaya (fi) dengan output berupa defleksi pegas
- Persamaan antara harga gaya fi, dengan defleksi xo adalah persamaan Hukum Newton II:

$$\Sigma F = m a = m \frac{d^2 x_o}{dt^2}$$

$$f_i - K_s x_o - B \frac{dx_o}{dt} = m \frac{d^2 x_o}{dt^2}$$

- Persamaan diferensial orde II

$$m \frac{d^2 x_o}{dt^2} + K_s x_o + B \frac{dx_o}{dt} = f_i$$

- Bentuk Fungsi Transfer:

$$\frac{x_o}{f_i}(D) = \frac{1}{mD^2 + BD + K_s}$$

- Bentuk Umum:

$$\frac{x_o}{f_i}(D) = \frac{K}{D^2/\omega_n^2 + 2\xi D/\omega_n + 1}$$

$$K = \frac{1}{K_s} \quad \omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{m}} \quad \xi = \frac{B}{2\sqrt{K_s m}}$$

- Respon dalam domain waktu
 - Respon umum (respon transien)
 - Respon khusus (tergantung macam input)

- **Respon umum:**

$$m \frac{d^2 x_o}{dt^2} + K_s x_o + B \frac{dx_o}{dt} = 0$$

- **Solusi umum:**

$$x_o = C_1 e^{-t/\tau_1} + C_2 e^{-t/\tau_2}$$

$$\tau_1 = \frac{1}{\omega_n (\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})}$$

$$\tau_2 = \frac{1}{\omega_n (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})}$$

162

- Jika $\xi < 1$, maka

$$\sqrt{\xi^2 - 1} = \sqrt{-(1 - \xi^2)} = i\sqrt{1 - \xi^2}$$

$$\tau_1 = \frac{1}{\omega_n (\xi - i\sqrt{1 - \xi^2})}$$

$$\tau_2 = \frac{1}{\omega_n (\xi + i\sqrt{1 - \xi^2})}$$

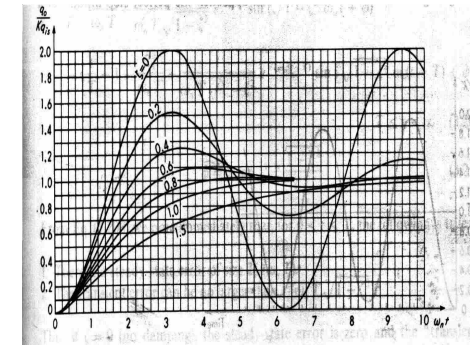
- Respon transien

$$x_o = C e^{-\xi \omega_n t} \left(e^{i\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2}} - e^{-i\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2}} \right)$$

- atau

$$x_o = C e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2} + \theta)$$

- Respon transien orde II



163

- Jika $\xi = 0$, maka respons sistem akan berosilasi terus menerus, dengan frekuensi = ω_n

$$x_o = x_i \sin(\omega_n t)$$

- Jika $\xi = 1$, maka $\tau_1 = \tau_2$ respons sistem menjadi:

$$x_o = C e^{-\omega t} (1 + \omega_n t)$$

Output sistem tidak berosilasi, dan respons transien akan lebih cepat mati, dibandingkan jika $\tau_1 \neq \tau_2$

Respon khusus sistem tergantung pada input

- Pada input step, output sistem mempunyai harga konstan.
- Pada input ramp, output sistem juga ramp dengan kecepatan naik/ turun yang sama dengan inputnya
- Pada input sinusoida, output sistem juga sinusoida dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi input, tetapi amplitudo dan fasanya tergantung pada perbandingan frekuensi input dengan frekuensi natural sistem (ω_n)

164

Kesimpulan : Ada 4 macam respons umum sistem Orde II, pada input step $e_i = \hat{e}_i$ untuk $t = 0$

- jika $\xi = 0$, respons berupa sinusoida murni (sistem undamped)

$$e_o / K \hat{e}_i = 1 - \sin(\omega_n t)$$

- jika $\xi < 1$, respons akan menuju ke harga steady state dengan fluktuasi pada $t \sim \infty$ (sistem underdamped)

$$e_o / K \hat{e}_i = 1 - \frac{e^{-\xi \omega_n t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\omega_n t \sqrt{1 - \xi^2} + \theta)$$

- jika $\xi = 1$, respons akan menuju ke harga steady state tanpa fluktuasi pada $t \sim \infty$

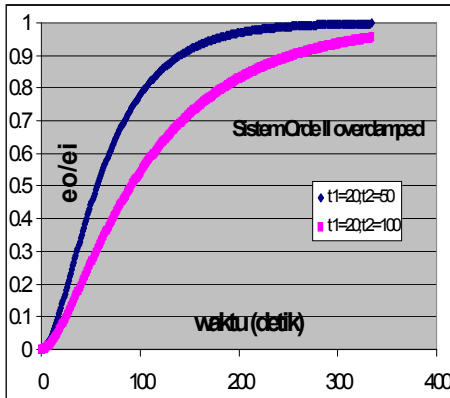
$$e_o / K \hat{e}_i = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)$$

- jika $\xi > 1$, respons akan menuju ke harga steady state tanpa fluktuasi pada $t \sim \infty$ (sistem overdamped)

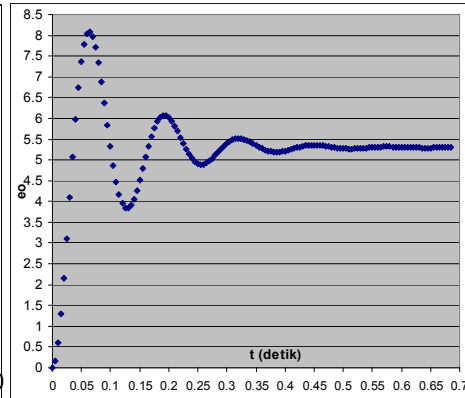
$$e_o / K \hat{e}_i = 1 + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-t/\tau_1} - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} e^{-t/\tau_2}$$

165

- overdamped.



- underdamped



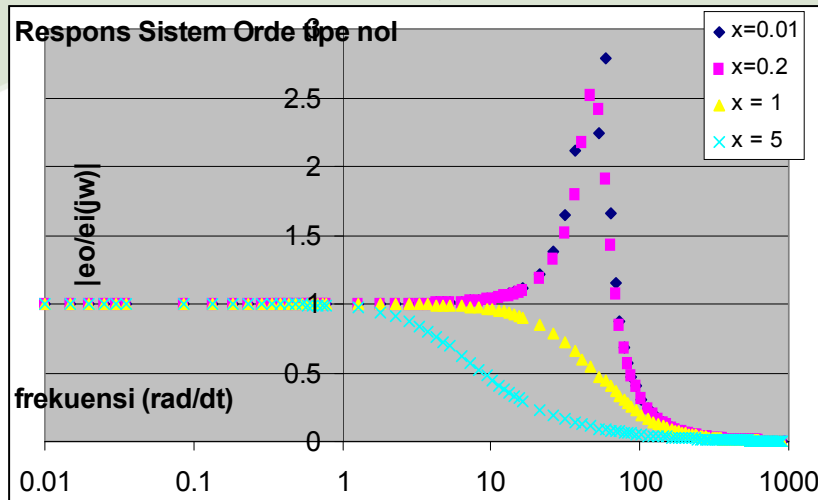
Respon Frekuensi Sistem Orde II

- Seperti pada sistem orde I, respon frekuensi sistem orde II dapat diturunkan dari harga modulus dan argumen fungsi transfer

$$\frac{e_o}{e_i}(D) = \frac{K}{D^2/\omega_n^2 + 2\xi D/\omega_n + 1}$$

$$\left| \frac{e_o}{e_i}(j\omega) \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2\xi\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad \theta = -\tan^{-1}\left(\frac{2\xi\omega/\omega_n}{1 - (\omega/\omega_n)^2}\right)$$

Respon frekuensi sistem orde II tipe nol, $\omega_n=50$ rad/dt



Macam sistem orde II

- Sistem orde II tipe nol: merupakan karakteristik dinamik loadcell (detektor gaya F_i) dan aselerometer (detektor percepatan a_i)

$$\frac{x_o}{F_i}(D) = \frac{K}{D^2/\omega_n^2 + 2\xi D/\omega_n + 1}$$

- Sistem orde II tipe satu: merupakan karakteristik dinamik velocitymeter (v_i)

$$\frac{x_o}{v_i}(D) = \frac{KD}{D^2/\omega_n^2 + 2\xi D/\omega_n + 1}$$

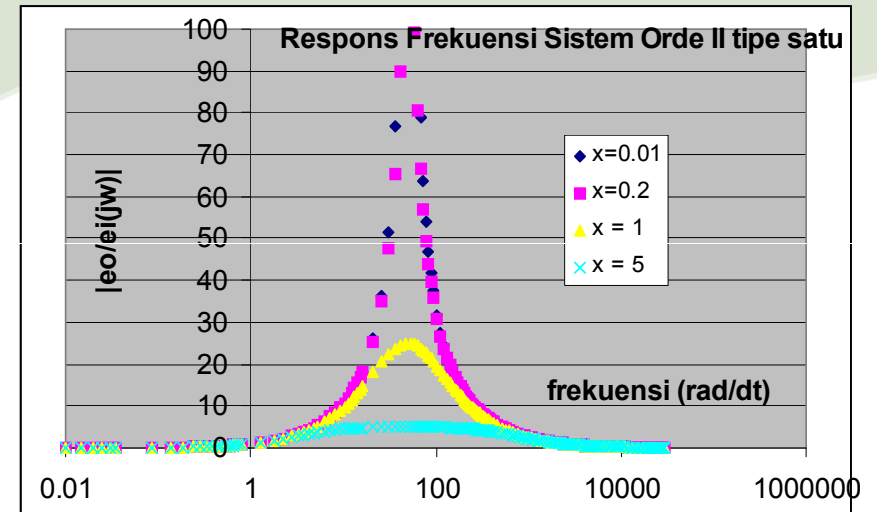
- Sistem orde II tipe satu: merupakan karakteristik dinamik displacement meter (x_i)

$$\frac{x_o}{x_i}(D) = \frac{KD^2}{D^2/\omega_n^2 + 2\xi D/\omega_n + 1}$$

- Ketiga macam tipe karakteristik sistem orde II tersebut mempunyai penyebut yang sama, tetapi pembilang dengan orde operator D yang berbeda.
- Secara matematis, respons sistem orde dua tipe satu → sinyal input mengalami diferensiasi sekali,
 - jika input sistem ramp → setelah dideferensier sekali menjadi input step.
 - jika input sistem step → setelah dideferensier sekali menjadi input pulsa.
 - jika input sistem sinusoida → setelah dideferensier sekali menjadi input sinusoida dengan beda fasa 90° dan amplitudo = $K \omega \hat{e}_i$

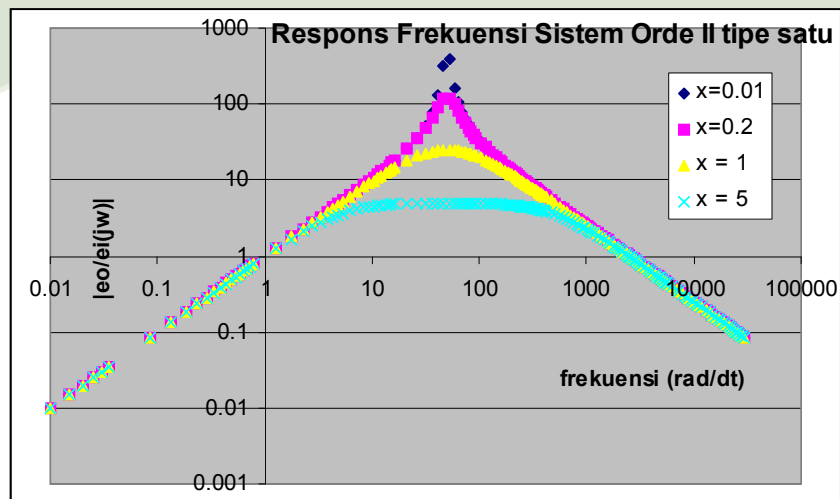
170

Respons frekuensi sistem orde II tipe satu



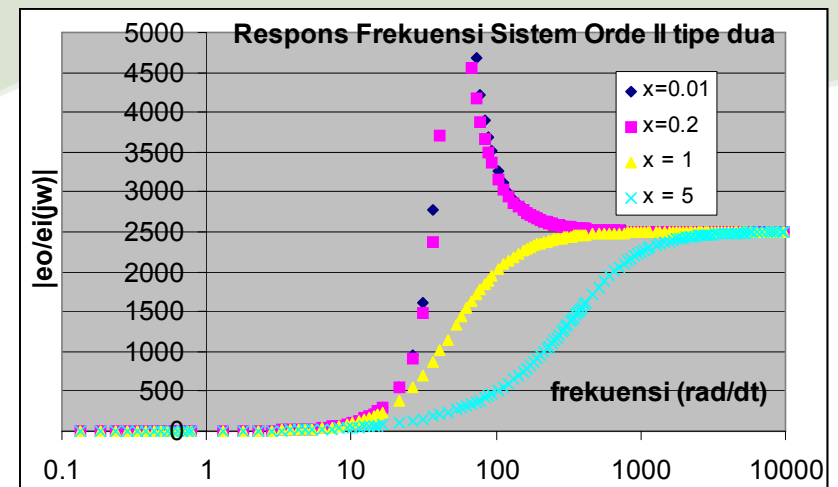
171

Respons frekuensi sistem orde II tipe satu



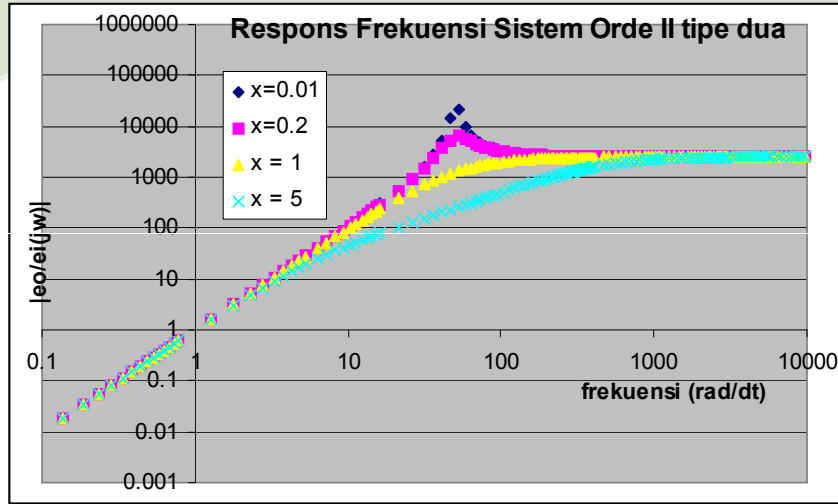
172

Respons frekuensi sistem orde II tipe dua



173

Respons frekuensi sistem orde II tipe dua



Instrumen dengan orde tinggi

$$\frac{e_o}{e_i}(D) = \frac{1}{(\tau_1 D + 1)(\tau_2 D + 1)(\tau_3 D + 1) \dots (\tau_n D + 1)}$$

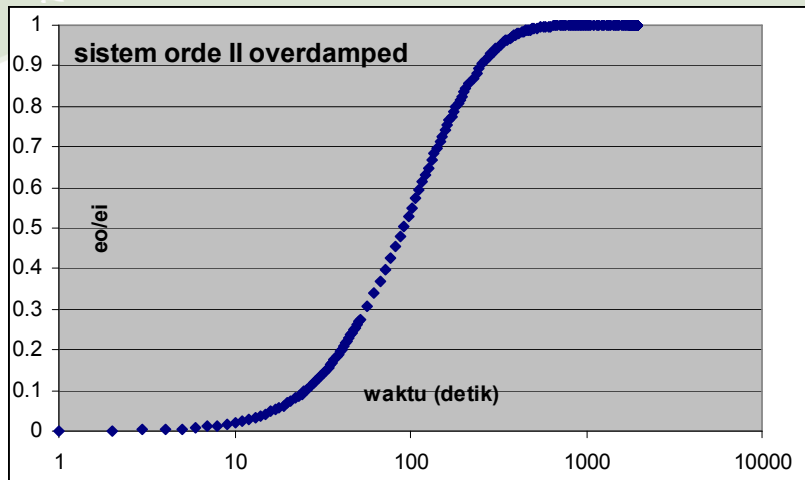
$$\frac{e_o}{e_i}(D) = \frac{1}{(\tau_1 D + 1)(D^2/\omega_{n1}^2 + 2\xi_1 D/\omega_{n1} + 1) \dots (\tau_n D + 1)(D^2/\omega_{nn}^2 + 2\xi_n D/\omega_{nn} + 1)}$$

$$\frac{e_o}{x_i}(D) = \frac{Ke^{-t/\tau_{di}}}{\tau D + 1} \quad \frac{x_o}{F_i}(D) = \frac{Ke^{-t/\tau_{di}}}{D^2/\omega_n^2 + 2\xi D/\omega_n + 1}$$

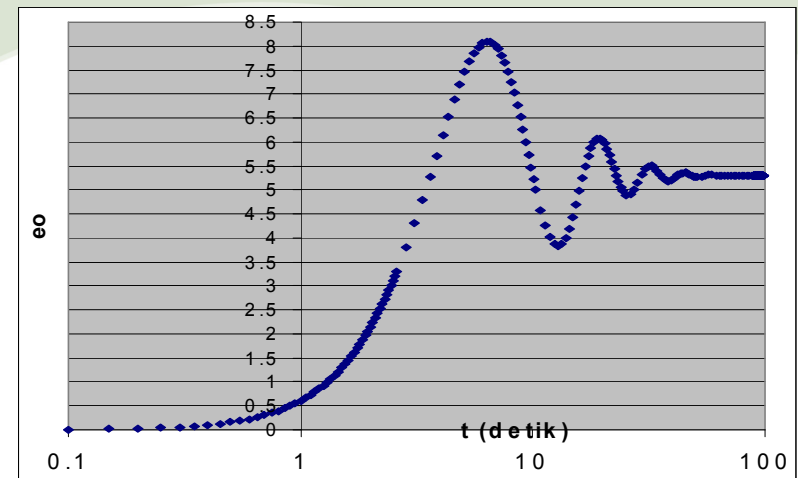
$$\frac{e_o}{x_i}(D) = \frac{Ke^{-t/\tau}}{(\tau_1 D + 1)(\tau_2 D + 1)}$$

- Respons waktu sistem orde tinggi akan menampilkan waktu mati (dead time)

Sistem orde II overdamped, terlihat sbg sistem dgn waktu mati dengan waktu mati, $\tau_1=20$ dt, $\tau_2 = 100$ dt



Sistem orde II underdamped, dengan $\omega_n= 50$ rad/dt, dan $\xi = 0,2$



Pendekatan respons waktu dan respons frekuensi Instrumen Orde tinggi (dengan waktu mati)

