Institutt for teknisk kybernetikk
Fakultet for informasjonsteknologi, matematikk og elektroteknikk

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU)

Faglig kontakt under eksamen: Trond Andresen, tlf. **7359 4358**, mobil **9189 7045**
T.A. går to veiledningsrunder, ca. kl. 1015 - 1100, og ca. kl. 1315 - 1345

Eksamen i SIE3005 reguleringsteknikk

torsdag 15. mai 2003

Tid: 0900 - 1300 (til 1500 for de med 100%-eksamen)

Sensur vil foreligge seinest 5. juni. Følg før det også med på fagets nettsted om flervalgsdelen av eksamen.

Hjelpemiddelkombinasjon B1: Kalkulator med tomt minne tillatt. Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemidler tillatt, unntatt Rottmanns formelsamling.

Prosenttallene angir den relative vekt oppgavene tillegges ved bedømmelsen.

Flere spørsmål kan besvares meget enkelt ved å bruke **formelsamlinga** bakerst i oppgavesettet. **Se kjapt gjennom den før du begynner**. Sjekk den alltid før du gir opp! Men du må forklare hvordan du bruker noe, når du henter det fra formelsamlinga. Noen spørsmål skal besvares ved å **måle ut verdier på figurer i oppgavesettet** – i slike tilfeller godtas en viss "måleunøyaktighet"! Der hvor rubrikk for studentnr. etc. er angitt på sider i oppgavesettet, **kan man tegne i figurer og levere det påtegnede arket som en del av besvarelsen**.

STUDENTS MAY ANSWER THIS EXAM IN ENGLISH IF THAT IS PREFERRED.

Oppgavene på side 1 – 4 skal løses av alle, både de som tar 70%- og de som tar 100%-eksamen.

Oppgave 1 (30 %)

Gitt prosessen $$h_u(s) = K\frac{1 - T_1 s}{s^2}, \quad K = 0.01\,, \; T_1 = 5 \tag{1.1}$$

Du skal bruke regulatoren $$h_r = K_p\frac{1 + T_2 s}{1 + \alpha T_2 s}\,, \; \alpha < 1\,. \tag{1.2}$$

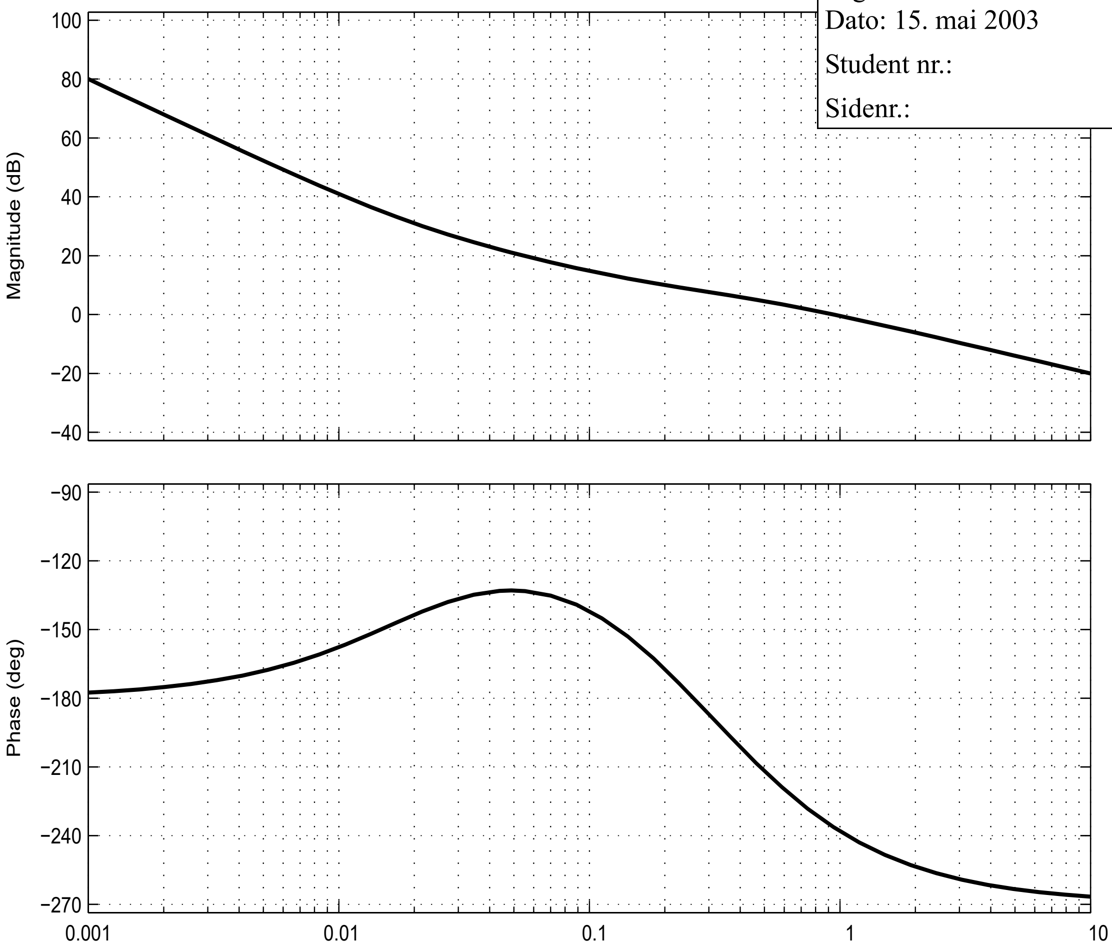
a) (2 %) Hva kaller vi denne type regulator? Hvorfor er dette et fornuftig valg av regulatortype for den gitte prosessen (kort, verbalt svar)?

b) (10 %) Figur 1.1 neste side viser Bode-diagram for $h_0 = h_r h_u$, med $T_2 = 50$, $\alpha = 0.05$, og $K_p = 1$. Er systemet stabilt med denne forsterkninga? (Begrunnet svar!)
Tegn inn asymptoter for amplitude og fase, og levér den påtegnede figur som en del av besvarelsen. Det skal framgå hvordan du finner asymptotene, det er ikke nok å "tilpasse dem" til de gitte kurver. Spesielt må du angi hvordan du fastlegger hvor venstre del av asymptoten til $|h_0|$ krysser 0-dB-linja.

c) (6 %) Regulatoren (1.2) skal nå realiseres diskret. Hva er den viktigste negative virkninga av å bruke diskret regulator, og hvordan kan vi tilnærmet få fram denne virkninga ved å analysere som om vi bruker kontinuerlig regulator? Bruk denne metoden, og skissér inn det modifiserte faseforløpet du da får for h_0 i figur 1.1. Tastetida (samplingstida) er $T = 1$.

d) (5 %) Bestem ved hjelp av Bodediagrammet den K_p som gir forsterkningsmargin omtrent $\Delta K = 6\text{dB}$. Vurdér ut fra det dårligere faseforløpet ved kryssfrekvensen p.g.a. diskret regulator: Er tastetida valgt liten nok?

Fag nr.: SIE3005
Dato: 15. mai 2003
Student nr.:
Sidenr.:



figur 1.1 (se også side 4)

---

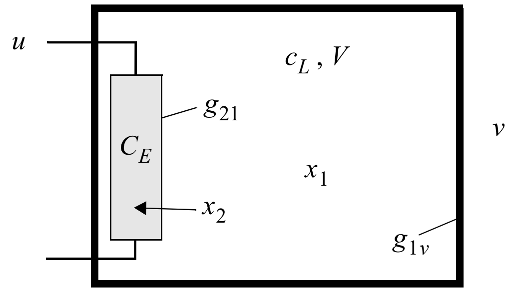
e) (3 %) *For enkelhets skyld forutsetter vi i resten av denne oppgaven kontinuerlig regulator (1.2).* Reguleringssystemets stabilitet kan da vurderes ved hjelp av Rouths kriterium. Du skal ikke sette inn tallverdier, men bruke de algebraiske uttrykkene (1.1) og (1.2) slik de står. Sett opp Rouths tabell for det lukkede systemet.

f) (3 %) Forklar med utgangspunkt i Rouths kriterium hva slags krav som må stilles til T_2 sammenlignet med T_1. Dette kunne du sagt ut fra et enklere verbalt resonnement, bare ved å betrakte (1.1) og (1.2) uten å måtte bruke Rouths kriterium. Forklar det også!

g) (1 %) Hvis du skulle brukt Rouths kriterium (vi forutsetter fortsatt kontinuerlig regulering) og prosessen (1.1) hadde inneholdt en tidsforsinkelse, hva måtte du ha gjort da?

Oppgave 2 (20 %)

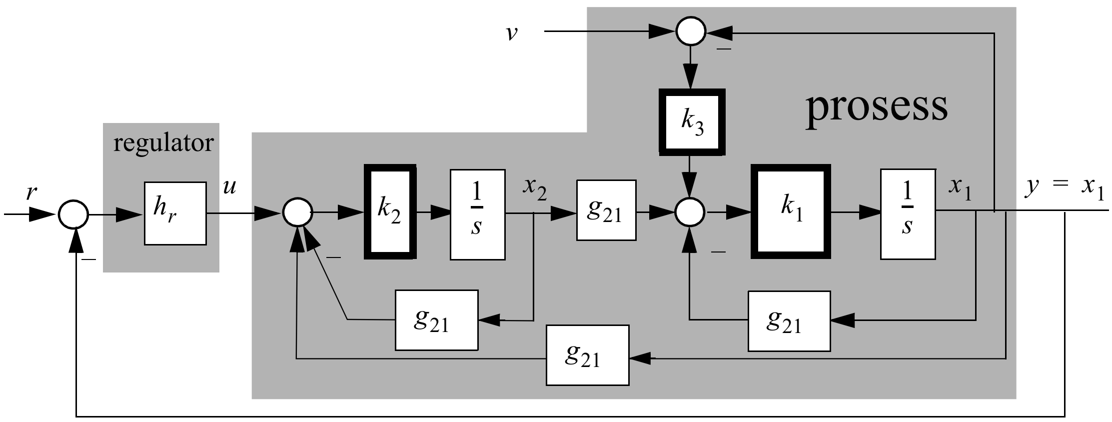
Et rom varmes opp av en ovn med en viss termisk treghet. Rommet har varmetap til omgivelsene. Rommet med ovn er skissert til høyre:



Vi har:

$x_1 = y$	:	Temperatur i rom, antas jevnt fordelt [$°C$].
x_2	:	Temperatur i ovn [$°C$].
v	:	Temperatur ute [$°C$].
u	:	Pådrag til ovn [W].
C_E	:	Varmekapasitet i ovn [$J/°C$]
c_L	:	Spesifikk varmekapasitet for luft [$J/(m^3\ °C)$].
V	:	Volum av rom [m^3].
g_{21}, g_{1v}	:	Varmeovergangstall ovn/rom og rom/ute [$W/°C$].

Figur 2.1 viser blokkdiagrammet for prosessen (= rom + ovn) med seriekompensasjon:



figur 2.1

a) (7 %) Finn størrelsene k_1, k_2, k_3 i figur 2.1.

Fra nå av kan du for enkelhets skyld bruke betegnelsene k_1, k_2, k_3 i resten av oppgaven, uten å sette inn for disse størrelsene:

b) (6 %) Forutsett ingen ytre tilbakekobling, dvs. $h_r = 0$. Vis at transferfunksjonen fra v til y blir:

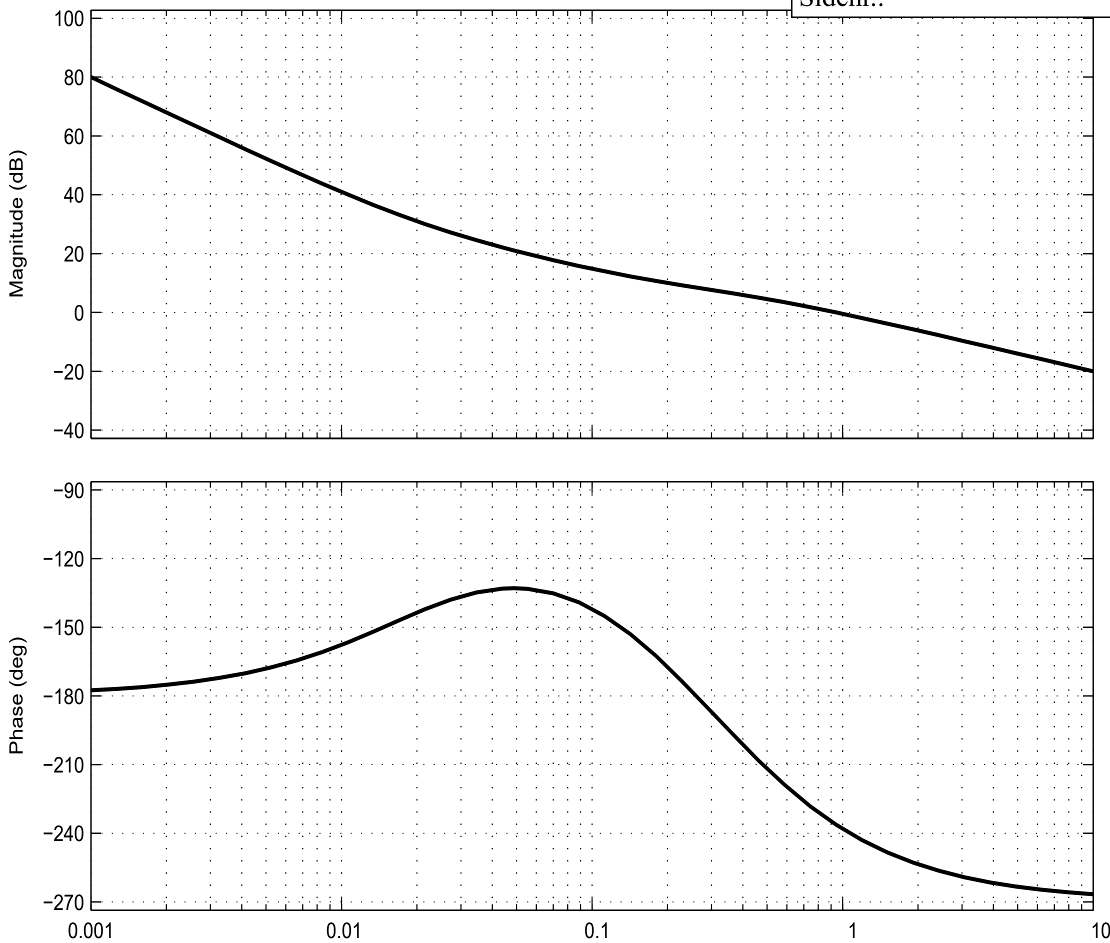
$$h_{vy}(s) = \frac{k_1 k_3 (s + k_2 g_{21})}{s^2 + [g_{21}(k_1 + k_2) + k_1 k_3]s + k_1 k_2 k_3 g_{21}} \qquad (2.1)$$

c) (2 %) Forutsett fortsatt ingen ytre tilbakekobling, dvs. $h_r = 0$.
Ut fra (2.1): Hva blir $y(\infty)$ når $v = v_0 =$ konst.?
Er svaret rimelig (kort fysisk, verbal forklaring)?

d) (3.5 %) Anta at du har måling av utetemperaturen v. Finn den ideelle (= dynamiske) foroverkopling fra v til u. Kommentér. (Tips: Den har formen $h_{fi} = -K_f(1 + T_f s)$.)
Tegn inn blokken h_{fi} med forbindelser i blokkdiagrammet i figur 2.1, og levér arket.

e) (1.5 %) Finn så en konstant (= statisk) foroverkopling med utgangspunkt i den ideelle. Hva oppnår du med denne konstante foroverkoplingen?

Fag nr.: SIE3005
Dato: 15. mai 2003
Student nr.:
Sidenr.:



Ekstra figur 1.1 hvis du trenger den

Seksjon med flervalgsoppgaver ("multiple choice")

Les alt dette nøye før du begynner:

Dere som har 100%-eksamen (full eksamen) skal gjøre alle flervalgsoppgavene.

Dere øvrige som tar 70%-eksamen, dvs. hvor resultatet fra midtsemesterprøven skal telle med i karakteren, skal hoppe over oppgavene O1 – O11, og bare gjøre oppgavene O12 – O19. Ikke kryss av noe som helst i feltene som gjelder oppgavene O1 – O11.

I de fleste oppgavene i denne seksjonen skal man krysse av bare *ett* av flere svaralternativer. Hvis man prøver å "gardere" ved å krysse av flere enn ett kryss der hvor det bare skal være ett kryss, nulles resultatet på oppgaven. Dette gjelder bortsett fra der hvor det er sagt spesielt fra at det kan være *flere riktige kryss* i den aktuelle oppgave.

Noen oppgaver har færre svaralternativer enn A – F. Avkryssing på overflødige svaralternativer ignoreres ved sensuren, så hvis man kommer i skade for å gjøre dette, teller det ikke.

Feil svar gir minuspoeng, så det er bedre å ikke krysse av, enn å tippe. Poeng for svaralternativ er satt slik at summen av alle mulige alternativ på en gitt oppgave = 0. Svært gale svar gir mer minus enn litt gale svar. Prosenttallet som oppgis ved hver oppgave forteller hva man kan oppnå ved helt korrekt avkryssing.

Svarskjemaet skal krysses av med **blå eller svart kulepenn**, slik: ☒ . Krysser du feil, kan krysset "slettes" ved å fylle hele ruta med blekk: ■ . Når du skal slette et kryss på denne måten, er det viktig at ruta blir helt full av farge, slik at ikke noe av det hvite papiret synes inne i ruta. Korrekturlakk er forbudt, det kan skape problemer for arkmateren ved optisk innlesing. Og ikke brett svarskjemaet på noe vis.

Studentnummeret skal skrives pent to ganger. Skriv siffer omtrent slik: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9. (Ikke skriv noe i feltet "Eventuell ekstra ID".)

Tips om arbeidsmåte: Ikke kryss av på svarskjemaet før du er ferdig med oppgavene. For hver oppgave noterer du et annet sted koden for plassering av riktig kryss, f.eks. "B", hvis du mener den aktuelle oppgave skal ha kryss der. Så kan du like før innlevering overføre slik informasjon til svarskjemaet, oppgave etter oppgave, i form av riktig plasserte kryss. Merk da at både **oppgavenummer og bokstaver for svaralternativ er (for det meste) trykket i tilfeldig ombyttet rekkefølge på svarskjemaet**, forskjellig for hver student. Så pass på hvor du setter kryssene!

Du får utdelt to identiske eksemplarer av svarskjemaet (hvis ikke, be om to nye og identiske svarskjemaer fra eksamensvakta. De er identiske når nummeret øverst på hvert skjema er det samme. Kontrollér det!). Det ene svarskjemaet krysses av og innleveres. Det andre beholdes. Det kan du bruke til å lage en kopi av svarskjemaet før levering, og har med det muligheten til å kontrollere dine kryss mot fasiten som blir lagt ut på Veven. Fasiten, og dine poeng for flervalgsdelen av denne eksamen, kunngjøres via fagets nettsted på "oppslagstavla", sannsynligvis før 31. mai. Følg med der! Den endelige sensur, som gjelder hele besvarelsen, kommer seinest 5. juni. Hvis den er ferdig før, varsles dette på fagets oppslagstavle.

Utfylt svarskjema skal legges inn i den øvrige besvarelse og leveres sammen med den.

Oppgavesettets sider 6, 7 og 8 skal rives av og leveres for seg (for makulering).

I **O1 – O6 (alle 2 %)** er det gitt 6 transferfunksjoner. Samtidig er det oppgitt 6 enhetssprang-responser A til F, se figur til høyre. Hver transferfunksjon skal koples til riktig sprangrespons.

O1: $\dfrac{1+2s}{(1+0.5s)^2}$

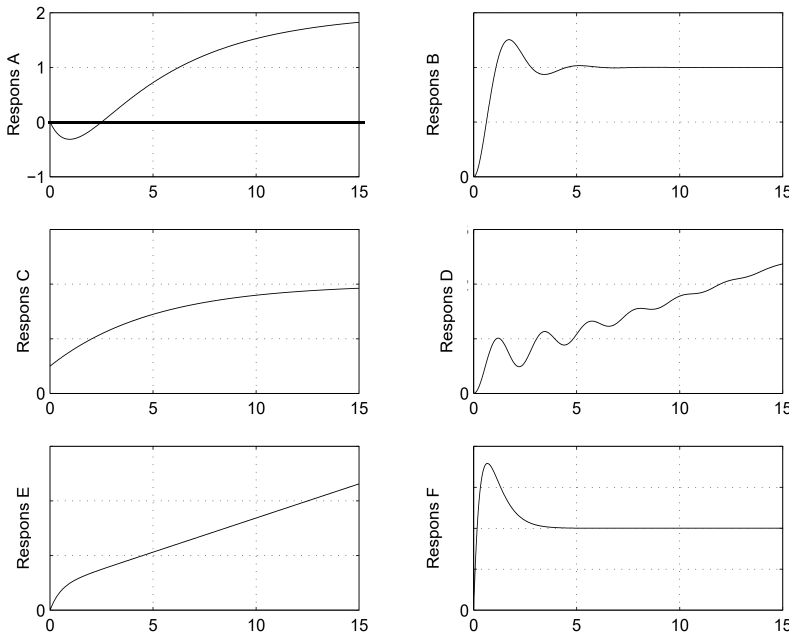
O2: $\dfrac{2(1-2s)}{(1+s)(1+5s)}$

O3: $\dfrac{1+4s}{8s(1+0.5s)}$

O4: $\dfrac{64}{64+6.4s+s^2}$

O5: $\dfrac{1+4s}{s^3+0.5s^2+8s}$

O6: $\dfrac{2(1+1.25s)}{(1+5s)}$



O7 (4 %) Relativ dempningsfaktor ζ for 2.ordens-delen av transferfunksjonen i O5 er

A: 0.1188 B: 0.1105 C: 0.1024 D: 0.0931 E: 0.0884 F: 0.0732

O8 (3 %)

Sprangresponsen for transferfunksjonen i O6 ovenfor, starter i $y(0)$ =

A: 0.0 B: 2.5 C: 1 D: 0.5 E: 2 F: 5

O9 (4 %) Her kan flere påstander (kryss) være riktige.

A: For en fasevariabel tilstandsromform er tilstandene de deriverte av hverandre.

B: Det finnes uendelig mange tilstandsrommodeller som gir samme impulsrespons for et system.

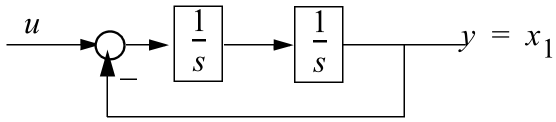
C: Et lineært tidsinvariant system kan alltid representeres med et sett av differensiallikninger.

D: Når det lineære systemet har kompleks konjugerte egenverdier, kan det ikke bringes på diagonal form.

E: Et autonomt system kan ikke inneholde en tidsforsinkelse.

F: Det er ikke mulig å finne en algebraisk løsning for responsen til en prosess med tidsforsinkelse i tilbakekoplingen.

O10 (3 %) Gitt systemet :



En tilstandsrommodell er

	matrisene **A**, **B**, **C**		matrisene **A**, **B**, **C**
A	$\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}$	D	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$
B	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$	E	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$
C	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$	F	$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$

O11 (4 %)

Hva blir transisjonsmatrisen $\mathbf{\Phi}(t)$?

A	$\begin{bmatrix} e^{-t} & e^{t} \\ -e^{t} & e^{-t} \end{bmatrix}$	D	$\begin{bmatrix} 1 & \sin t \\ -\sin t & 1 \end{bmatrix}$
B	$\begin{bmatrix} \cos t & \sin t \\ -\sin t & \cos t \end{bmatrix}$	E	$\begin{bmatrix} \sin t & \cos t \\ -\sin t & \cos t \end{bmatrix}$
C	$\begin{bmatrix} e^{-t}\cos t & e^{-t}\sin t \\ -e^{-t}\sin t & e^{-t}\cos t \end{bmatrix}$	F	$\begin{bmatrix} \cos t & 1 \\ -1 & \cos t \end{bmatrix}$

Fra og med her skal også de med 70%-eksamen løse flervalgsoppgaver:

O12 (4 %) Her kan flere påstander (kryss) være riktige.

A: Foroverkopling fra referansen bedrer et systems stabilitet.

B: Foroverkopling fra forstyrrelsen bedrer et systems stabilitet.

C: Ziegler-Nichols metode krever ikke at prosessens modell er kjent.

D: Anti-windup (anti-integrator-overlading) trengs for en PI-regulator når det er metning i pådraget.

E: Intern tilbakekopling, sett i forhold til seriekompensasjon, kan ikke gi hurtigere regulering uten at det går ut over stabilitetsmarginene.

F: Et system med tidsforsinkelse er et ikke-minum-fase-system.

O13 – O18, se nedenfor:
Gitt tre systemer, **S1 - S3**. Systemene utsettes for sprang- eller rampefunksjoner som vist.
Kryss av alternativ A på svarskjemaet hvis kombinasjonen av system og inngangssignal gir null stasjonært avvik,
B hvis inngangssignal og system gir $0 < \quad e(\infty) = \text{konst.} < \infty$,
eller C hvis inngangssignal og system gir $e(\infty) = \infty$.

O13 (2 %) System **S1** og signal **a**.

O14 (2 %) System **S1** og signal **b**

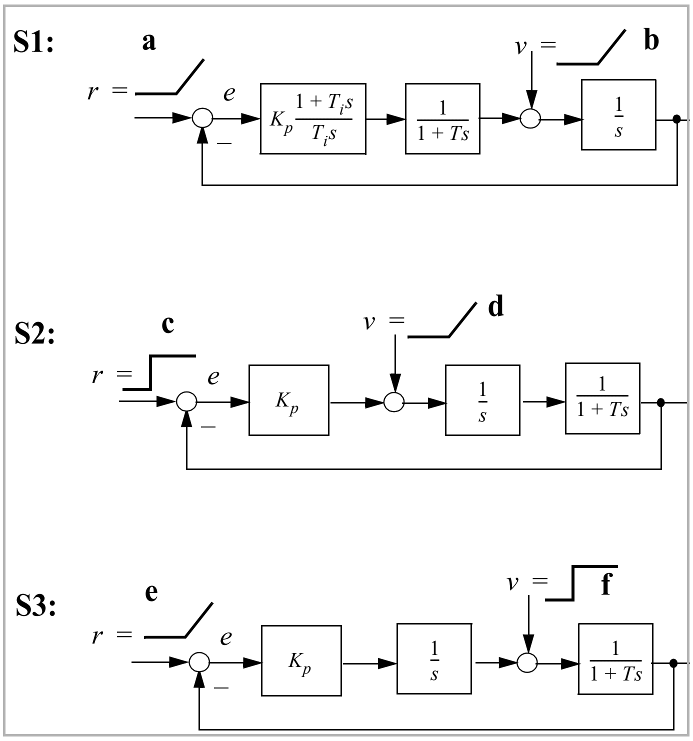
O15 (2 %) System **S2** og signal **c**

O16 (2 %) System **S2** og signal **d**

O17 (2 %) System **S3** og signal **e**

O18 (2 %) System **S3** og signal **f**

(Svaralternativene D, E og F lar du bare stå blanke i disse oppgavene.)



O19 (4 %)

Det rekursive uttrykket for det diskrete pådraget $u[k]$ for regulatoren i oppgave 1c (side 1 i dette oppgavesettet), med $K_p = 0.17$, blir:

A: $u[k] = \frac{2}{3}u[k-1] + 2.86e[k]$,

B: $u[k] = \frac{2}{3}u[k-1] + 2.86e[k] - 2.81e[k-1]$,

C: $u[k] = \frac{2}{3}u[k-1] - \frac{1}{3}u[k-2] + 2.86e[k] - 2.81e[k-1]$,

D: $u[k] = \frac{2}{3}u[k-1] - \frac{1}{3}u[k-2] + 2.86e[k]$

E: $u[k] = u[k-1] - \frac{1}{3}u[k-2] + 2.86e[k] - 2.81e[k-1]$,

F: $u[k] = u[k-1] + 2.86e[k] - 2.81e[k-1]$

(Tips: Svaret kan om ønskelig finnes uten å sette inn tallverdier – bare ved å eliminere uaktuelle alternativer).

Formelsamling

(4 sider, noe av dette trenger du kanskje...)

$$\lim_{t \to \infty} f(t) = \lim_{s \to 0} sf(s) \qquad \text{(V.1)}$$

$$\lim_{t \to 0} f(t) = \lim_{s \to \infty} sf(s) \qquad \text{(V.2)}$$

$$\mathcal{L}[\dot{f}(t)] = sf(s) - f(t)\big|_{t=0} \quad , \quad \mathcal{L}[\ddot{f}(t)] = s^2 f(s) - sf(t)\big|_{t=0} - \dot{f}(t)\big|_{t=0} \qquad \text{(V.3)}$$

Residuregning: $$f(t) = \sum_{a_i} \frac{1}{(m-1)!} \left[\frac{\partial^{m-1}}{\partial s^{m-1}} \{(s-a_i)^m f(s) e^{st}\} \right] \Bigg|_{s = a_i} \qquad \text{(V.4)}$$

$$|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}| = 0 \qquad \text{(V.5)}$$

Rettlinja bevegelse: $f = ma$ Rotasjon: $d = J\dot{\omega}$ (V.6)

Folding (konvolusjon):

$$y(t) = h(t) * u(t) = \int_0^t h(t-\tau)u(\tau)d\tau, \quad \mathcal{L}[h(t) * u(t)] = h(s)u(s) \qquad \text{(V.7)}$$

Linearisering:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\bigg|_{\mathbf{x}^p, \mathbf{u}^p} \Delta \mathbf{x} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}}\bigg|_{\mathbf{x}^p, \mathbf{u}^p} \Delta \boldsymbol{u} \quad , \quad \mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}}\bigg|_{\mathbf{x}^p, \mathbf{u}^p} = \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots \\ \cdots \; \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \right|_{\mathbf{x}^p, \mathbf{u}^p} \qquad \text{(V.8)}$$

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta \boldsymbol{u}$$

Gitt en åpen prosess $h_0(s)$ med N_p poler i høyre halvplan.
Vektoren $1 + h_0(j\omega)$ får en netto vinkeldreining lik

$$\Delta\angle(1 + h_0) = -2\pi(N_n - N_p) \quad \text{når } \omega \text{ går fra } -\infty \text{ til } \infty . \qquad \text{(V.9)}$$

N_n blir da antall poler i h.h.p. for det lukkede (tilbakekoplede) system.

Merk: Dreieretning er definert positiv *mot* urviseren.Merk: Dreieretning er definert positiv *mot* urviseren.

Rouths kriterium:
For stabilitet kreves for det første at alle koeffisienter i det karakteristiske polynom (nevnerpolynomet i det lukkede system) må ha samme fortegn. Dessuten må alle koeffisienter i den venstre kolonne i Rouths tabell (nedenfor) ha samme fortegn.

Kall det karakteristiske polynom: $\alpha_n s^n + \alpha_{n-1} s^{n-1} + \ldots + \alpha_1 s + \alpha_0$

Rouhs tabell blir da (i tilfellet vist her er *n* et oddetall):

$$
\begin{array}{llll}
\alpha_n & \alpha_{n-2} & \cdots & \alpha_1 \\
\alpha_{n-1} & \alpha_{n-3} & \cdots & \alpha_0 \\
\beta_{n-1} & \beta_{n-3} & \cdots & \\
\zeta_{n-1} & \zeta_{n-3} & \cdots & \\
. & & & \\
. & & & \\
. & & & \\
\sigma_{n-1} & \sigma_{n-3} & & \\
\eta_{n-1} & & & \\
\omega_{n-1} & & &
\end{array}
\tag{V.10}
$$

De nye koeffisientene i tabellen framkommer etter følgende regler:

$$\beta_{n-1} = \frac{\begin{matrix}\alpha_n & \alpha_{n-2} \\ \alpha_{n-1} & \alpha_{n-3}\end{matrix}}{\alpha_{n-1}} = \frac{\alpha_{n-1}\alpha_{n-2} - \alpha_n\alpha_{n-3}}{\alpha_{n-1}}$$

$$\beta_{n-3} = \frac{\begin{matrix}\alpha_n & \alpha_{n-4} \\ \alpha_{n-1} & \alpha_{n-5}\end{matrix}}{\alpha_{n-1}} = \frac{\alpha_{n-1}\alpha_{n-4} - \alpha_n\alpha_{n-5}}{\alpha_{n-1}}$$

osv.

$$s \text{ erstattes med } \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1} \tag{V.11}$$

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \frac{\tau}{2}s}{1 + \frac{\tau}{2}s} \tag{V.12}$$