DIMENSIONERING AV DIGITAL REGULATOR FÖR REGLERING AV UTLOPPSAREAN TILL TURBOJETMOTOR

BO ELIASSON

RE-176 Maj 1976
Inst. för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola

DIMENSIONERING AV DIGITAL REGULATOR FÖR REGLERING AV UTLOPPSAREAN TILL TURBOJETMOTOR

Examensarbete utfört sommaren och hösten 1975 vid
Volvo Flygmotor och Institutionen för Reglerteknik, LTH.

Bo Eliasson

Handledare: Gerry Örnberg, VFA
Björn Wittenmark, LTH

SAMMANFATTNING

Denna rapport utgör dokumentation av resultat vid simulering och några olika principer vid digital reglering.

I rapporten redovisas en matematisk modell av utloppsareaaregleringen på en turbojetmotor.
Vid simuleringen har tonvikten lagts på regulatorernas känslighet mot parametervariationer i systemet, samt styrsignalernas storlek och utsignalens beteende vid olika regleringar.
Slutligen redovisas programmering av modell och regulatorer i programspråket FORTRAN.
Indata för några olika regleringar har också angivits.

ABSTRACT

This report provides results of simulations and a few different methods of designing controllers for sampled data systems.

In the report a mathematical model of the exhaust nozzle control of a turbofan engine is shown. During the simulations great attention has been paid to the sensitivity of the regulators against variations of the parameters in the system, and the behaviour of control signal and output signal for different types of controllers. The programs of the model and the controllers in FORTRAN are also given. Input-data for a few different controllers are shown.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING SID

1. BESKRIVNING AV REGLERSYSTEM FÖR TURBO-JETMOTOR.

1.1 INLEDNING

Examensarbetet har i första hand inriktats på kontruktion och testning av olika regulatorer till den matematiska modellen av areaservot.
Samtliga regulatorer i rapporten, som i praktiken kan anses komma att användas, har simulerats såväl kontinuerligt som digitalt på grund av kravet på så rippelfri utsignal som möjligt.
Vidare har stor vikt lagts på regulatorernas uppförande vid variation i den matematiska modellens parametrar. Dessutom har styrsignalernas storlek till servot kontra snabbhet och förstärkning särskilt studerats.

I kap 4, jämföres de olika resultaten och lämplig reglering anges.

Kap 5 innehålller referenser och slutligen ges ett appendix, innehållande programbeskrivning och programmering av servo och regulatorer. Olika modeller och regulatorer kan väljas som indata.

I ett pågående forskningsprogram vid Volvo Flygmotor studeras alternativa reglermetoder för nästa generation av avancerade turbojetmotorer. Arbetet är för närvarande inriktat på studium av efterbrännkammarens (EBK) reglering. Regleringen har primärt två uppgifter, dels att reglera bränsletillförseln, dels att reglera trycket i ebk:n med hjälp av utloppsarean.
En förutsättning för användning av ebk:n är att dess funktion ej stör grundmotorn. Av detta skäl regleras i dag tryckförhållandet över turbinerna till önskat värde med hjälp av utloppsarean.

Examensarbetet omfattar en jämförelse av olika reglermetoders användbarhet för reglering av utloppsarean, samt konstruktion av olika regulatorer.

Utvärdering av de olika metoderna och regulatortyperna ska göras på en digital motormodell, en s k dynamisk simulator, vilken simulerar motorn med tillhörande reglersystem.

Areaaregleringsdelen i ebk-regulatorn har därvid anpassats till en digital elektronisk reglering, med den nya hårdvara som förväntas i ett framtida system.

1.2 NUVARANDE HYDROMEKANISKA REGLERSYSTEM

Införda beteckningar och storheter för ebk- och gasgenerator-reglering se fig 1.2.1 resp fig 1.2.2 på efterföljande sidor. Gasgeneratorns regulator har till uppgift att skydda motorn från otillåtna drifttillstånd, samt att ge den bästa verkningsgraden vid såväl transienter som stationära driftpunkter.

Enl fig 1.2.2 korrigeras pilotens begärda varvtal (dragkraft) med inloppstemp och inloppstryck.
Varvtalsdifferensen omvandlas till ett bränsle/lufttal (B/PB).
Multiplikation med brännkammartrycket PB ger sedan det önskade bränsleflödet.

PRINCIPSCHEMA ÖVER GASGENERATORN OCH EFTERBRÄNNKAMMAREN (EBK), SAMT VIKTIGA STORHETSBETECKNINGAR.

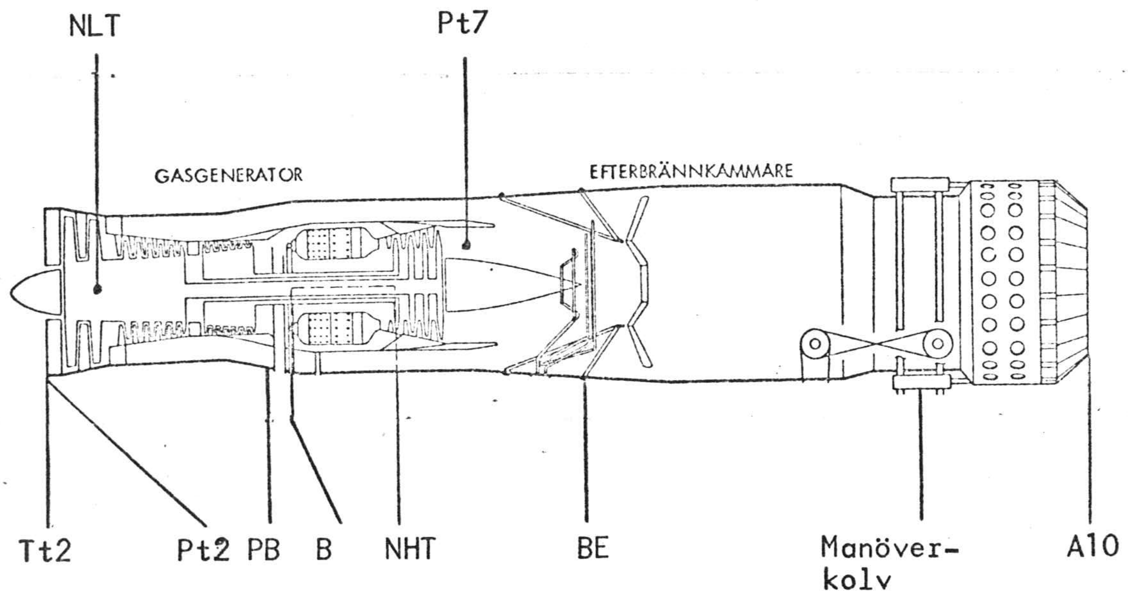


Fig 1.2.1

Tt2: Inloppstemperatur
Pt2: Inloppstryck
Pt7: Tryck efter turbinen
PB: Brännkammartryck
NLT: Lågtrycksrotorns varvtal
NHT: Högtrycksrotorns varvtal
B: Bränsleflöde till gasgeneratorn
BE: Bränsleflöde till ebk:n
A10: Utloppsarean

GASGENERATORNS REGLERING

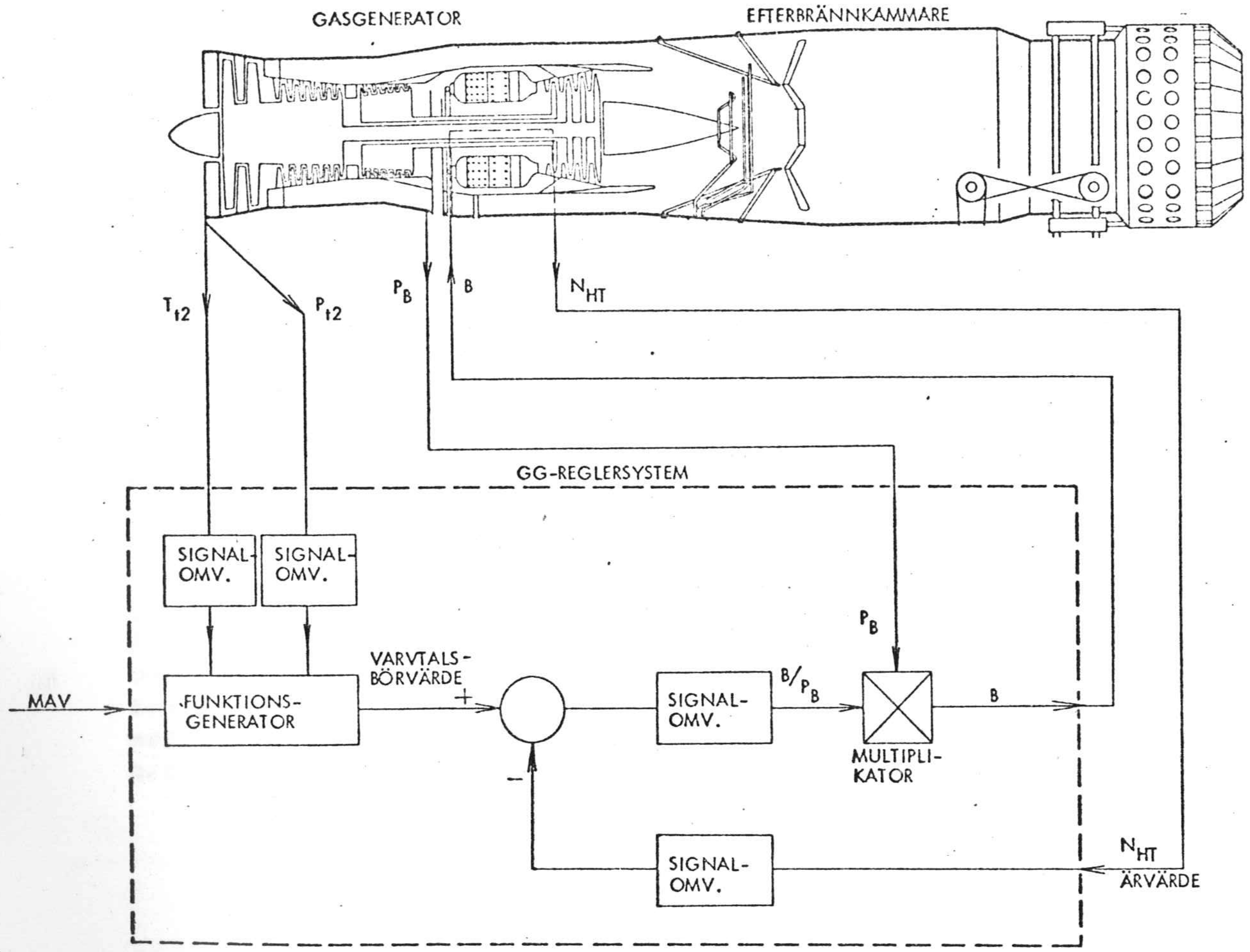


Fig 1.2.2

Ebk-reglering (se fig 1.2.3)

Ebk-regleringen har två huvuduppgifter.

1) Reglera bränsletillföreln så att den av föraren begärda dragkraften erhålles.

2) Reglera trycket i ebk:n så att huvudmotorn ej störs.

Bränsleflödet till ebk:ns olika zoner (3 st) korrigeras med hänsyn till inloppstemp och brännkammartryck (funk-gen). Den korrigerade utsignalen från funk-gen ger lämpligt bränsleluftal (BE/PB). Multiplikation med brännkammartrycket (PB) ger motsvarande bränsleflöde.

Areaoregleringen har till uppgift att hålla gasgeneratorn på en lämplig driftpunkt vid olika flygfall och yttre förhållanden. Upptändning och eldning i ebk:n skall således påverka gasgeneratorn så lite som möjligt.

På grund av motorns konstruktion (dubbelströmsmotor) är den särskilt känslig för tryckstörningar i ebk:n. Fläktens tryckuppsättning kan då bli så ogynnsam att pumpning sker, eller att fläktens varvtal blir för högt. Av dessa skäl regleras tryckförhållandet (π_t = PB/Pt7) över turbinerna enligt en i gasgeneratorns regulator bildad referensfunktion (π TREF). Skillnaden i tryckförhållande $\Delta\pi$ T = π T - π TREF användes som reglerparameter och ger via en PI-regulator ett areabehov, som summeras till det areabehov eldningen kräver. Jämförelse göres med verklig area och skillnaden styr ut areaservot så att korrekt area erhålles.

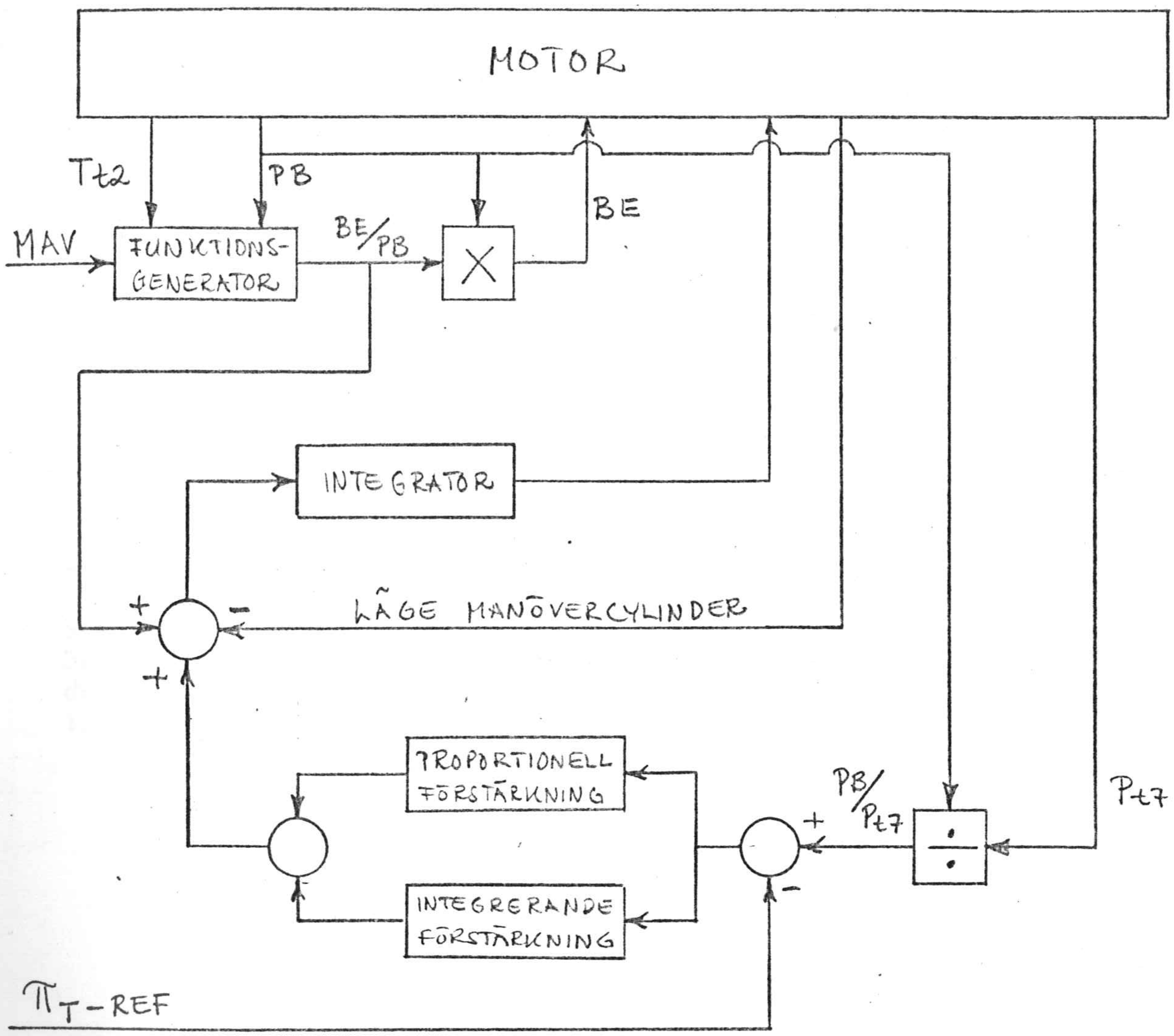


Fig 1.2.3

Efterbrännkammarens reglering

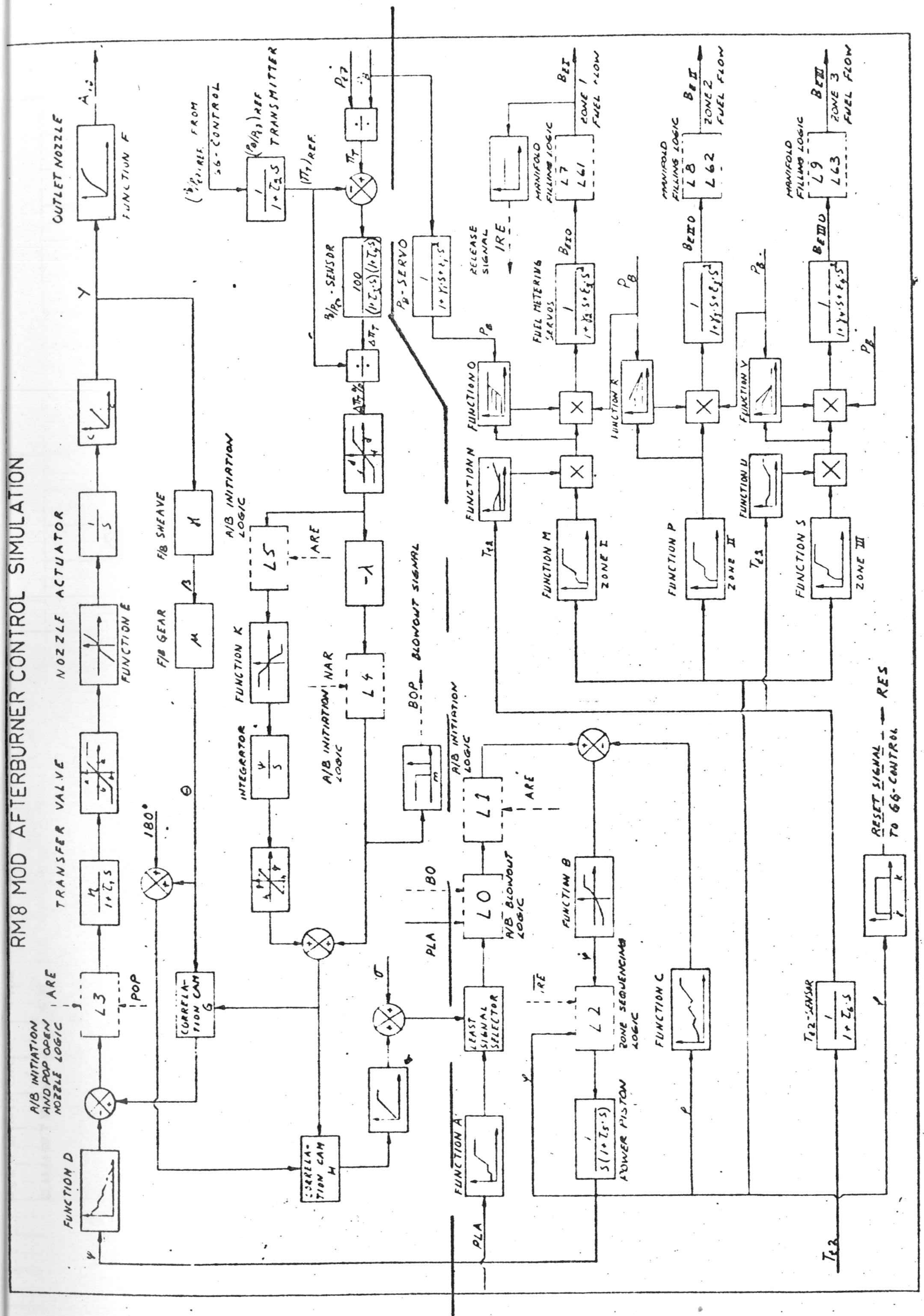
Beskrivning av det hydromekaniska ebk-reglersystemet i simulatorn

I fig 1.2.4 ovanför den streckade linjen är den nuvarande hydr.-mek areaaregleringen schematiskt återgiven. Areabehovet från π_T-regl har till uppgift att fintrimma arean kring ett visst jämviktsläge, ty grundmotorn skall störas så lite som möjligt.

Under den streckade linjen är de funktioner som reglerar bränslet till de olika zonerna (3 st) i ebk:n utritade. Tillhörande upptändnings- och avstängningslogik för ebk:n finns även utritad. På grund av eldning i ebk:n erhålles från denna del en signal (φ), som är ett mått på areabehovet. φ-signalen finns längst till vänster (se fig 1.2.4)

Den del av ebk-regleringen som finns ovanför den streckade linjen har omarbetats för att passa den digitala elektroniska regleringen (se fig 1.2.5) med det nya areaservot. Fig 1.2.5 utgör ett principschema över den digitala areaaregleringen.

Schemat visar reglering av arean utgående från en π_T-referens. Som tidigare har nämnts kommer även andra reglermetoder att utvärderas. Exempelvis kan arean regleras med utgångspunkt från fläktens tryckförhållande (π_{gg} = Pt7/Pt2).



Principschema över nuvarande reglersystem.

Fig 1.2.4

FÖRKLARINGAR TILL DE OLIKA
ENHETERNA, SE MOTSVARANDE
SIFFRA I SPEC.-DEL.

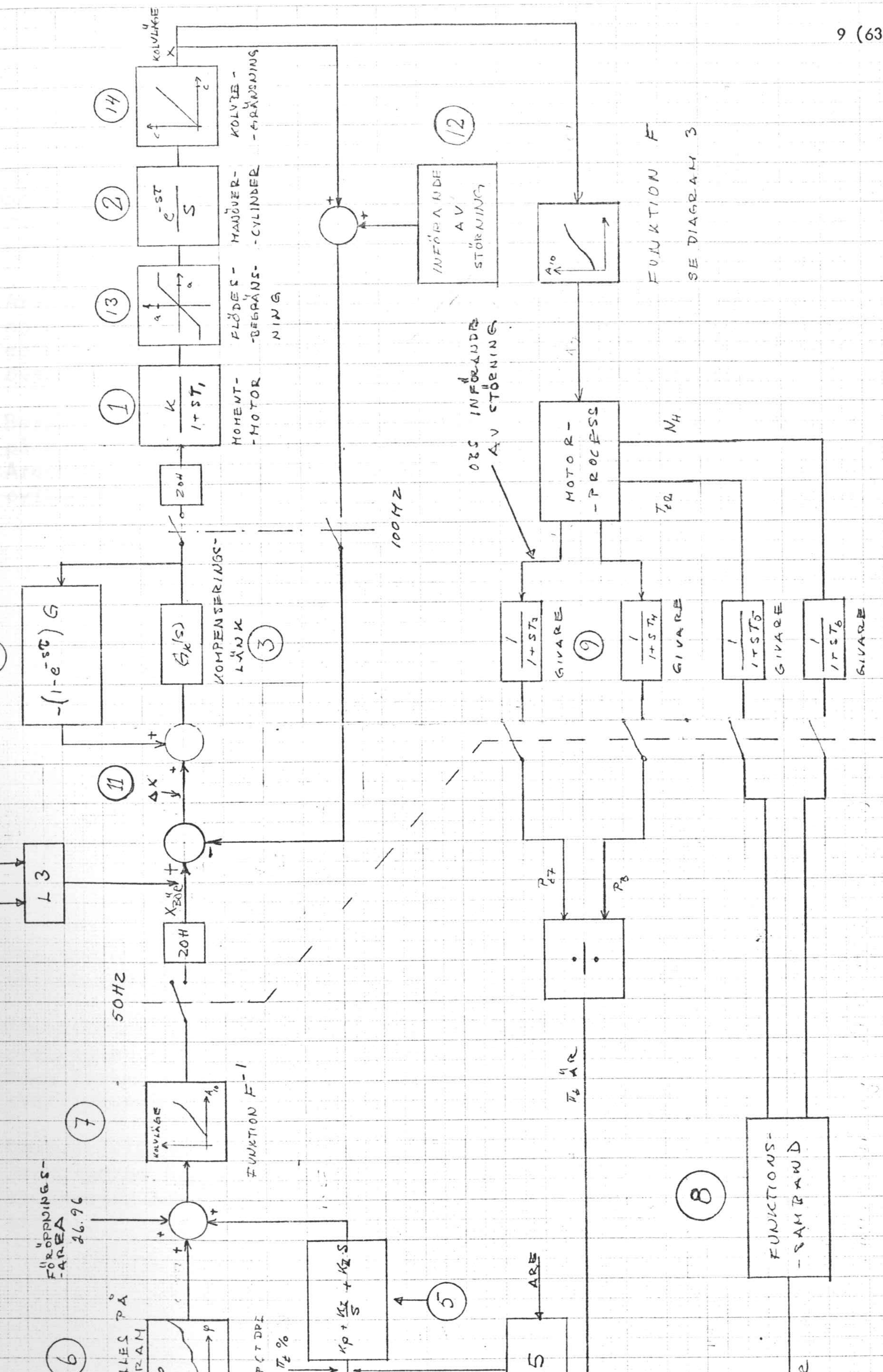


Fig 1.2.5

2. PROBLEMFORMULERING

2.1 MATEMATISK MODELL (se fig 1.2.5)

Areaservoloopens verkställande organ är en momentmotor samt fyra manövercylindrar, vilka ställer om arean. Area-loopen slutes över datorn, vars samplingsfrekvens är 100 Hz. Den yttre loopen slutes över motorn och datorn. Samplingsfrekvensen är här 50 Hz.

Beroende på olika reglermetoder kommer olika parametrar att mätas på motorprocessen. Denna driftpunktsreglering sker med en PID-regulator. Areabehovssignalen beräknas i datorn och omvandlas till motsvarande cylinderläge, vilket utställes på areaservot med en frekvens av 50 Hz.

INNERLOOP

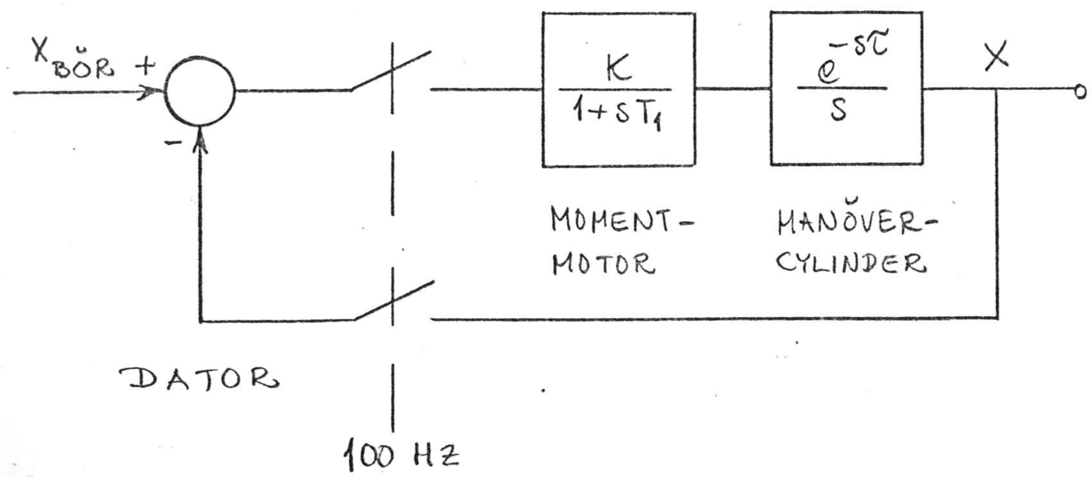


Fig 2.1.1.

Laplacetransform av momentmotorns och kolvens överföringsfunktion.

Förstärkningen K är produkten av momentmotorns och manöverkolvens förstärkning.

Momentmotorns överföringsfunktion har approximerats med en första ordningens funktion. Detta är i vårt fall en lämplig approx, ty enligt Moog Technical Bulletin 103 gäller denna upp till omkr 50 Hz. Max skärfrekvens för de olika regulatorfallen är omkr 10 Hz.

Manövercylindern representeras av en integrator. På grund av de långa ledningarna från pump till kolv, vilofriktion och acceleration av areamassor har en tidsfördröjning (τ) införts $\tau = 2$ T (T är samplingstiden).

YTTERLOOP

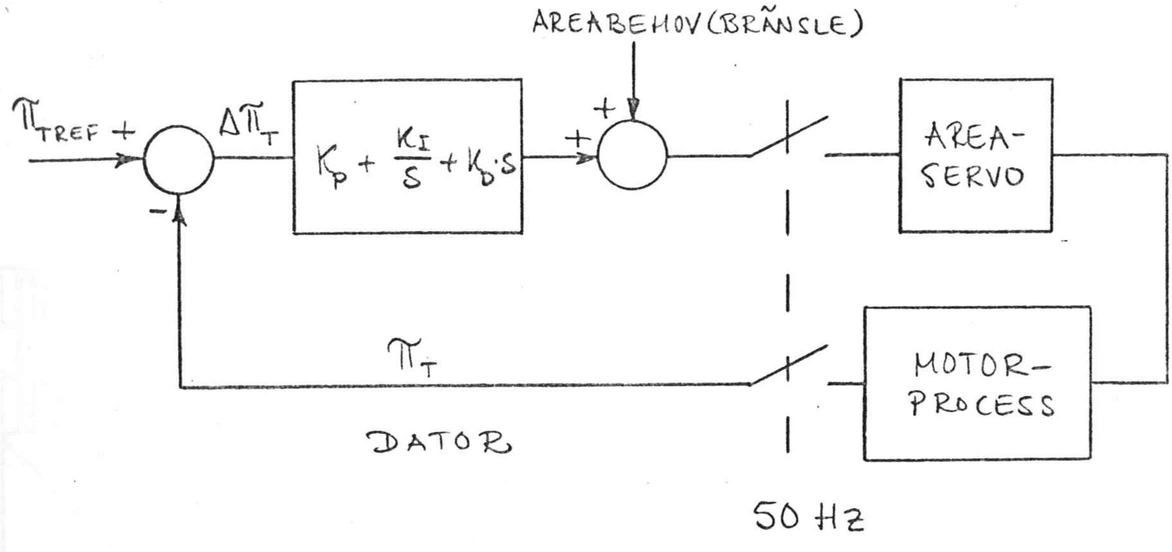


Fig 2.1.2

Ytterloopen är ritad för π_t-reglering, men kan modifieras för reglering av arean med hjälp av andra motorparametrar. Motorns driftlinje regleras med en PID-reg. π_t-ref bildas ur NHT och Tt2. Areabörvärdet består av två signaler, en från π_t-regl och en från bränslemängden, som tillföres ebk:n. Dessa båda signaler uppdateras på areaservot med frekvensen 50 Hz.

Andra reglermetoder än π_t-regl kommer att användas, t ex π_{gg}-regl. Se fig 2.1.3.

π_{gg}-reglering

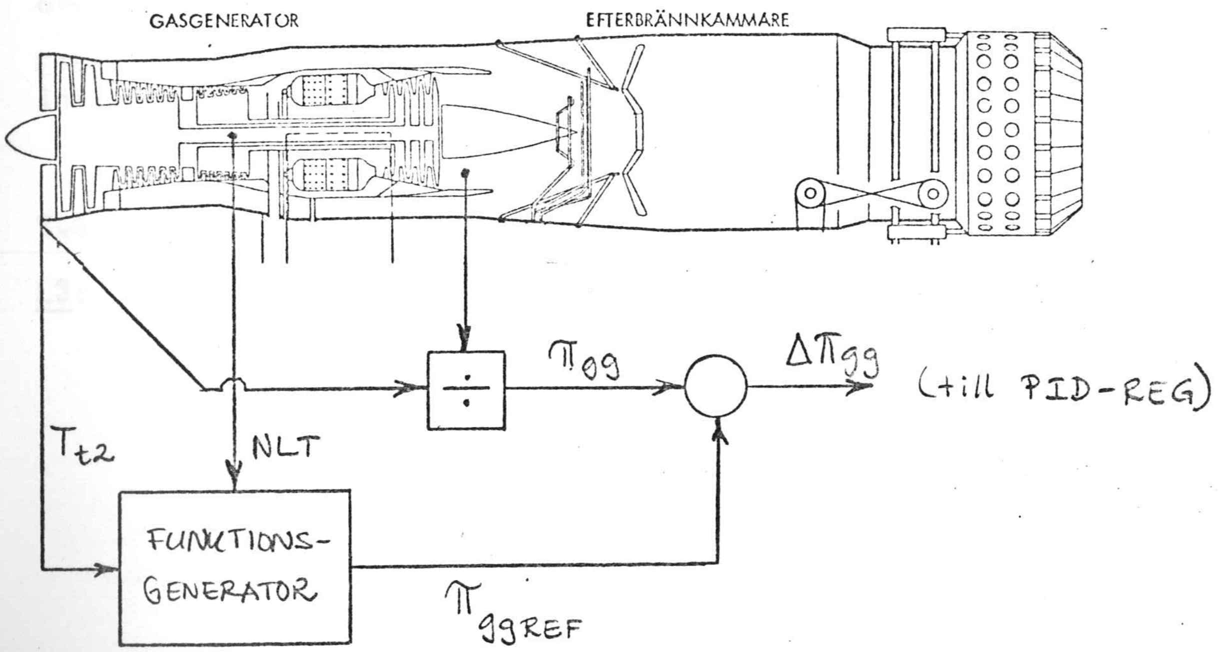


Fig 2.1.3

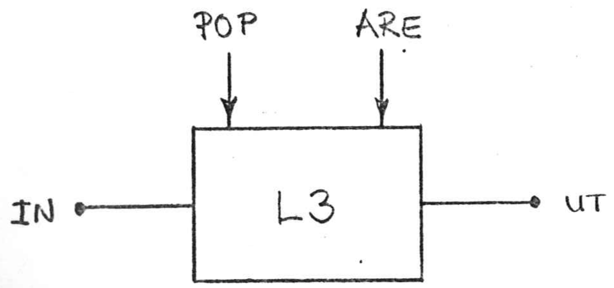
Beskrivning av resterande delar i fig 1.2.5.

ρ-signalen omvandlas till en ekvivalent area i block nr 6. Detta areabehov plus π_t-regl behov summeras tillsammans med föröppningsarean till ett totalt areabehov före block nr 7. Föröppningsarean har till uppgift att minska tryckstörningarna över grundmotorn då ebk:n tändes.

Efter block 7 erhålles ekvivalent manöverkolvläge, vilket är insignal till servot.

Två logikblock finns utritade, nämligen L3 och L5.

L3:



UT = IN om ARE = 1

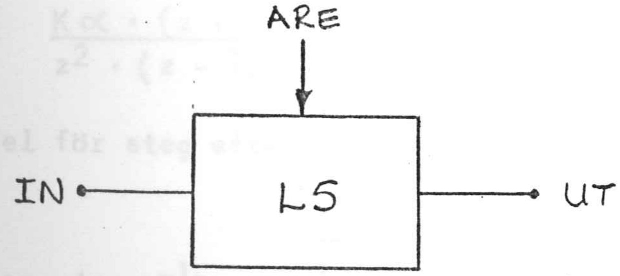
UT = MAX AREA om POP = 1

UT = MIN AREA för övriga fall

ARE = 1, om högtrycksrotorns varvtal (NHT) är större än ebk aktiveringsvarv och pilotens gaspådrag är större än 70°.

POP = 1, om landstället är belastat och NHT är mindre än ett visst varvtal

L5:

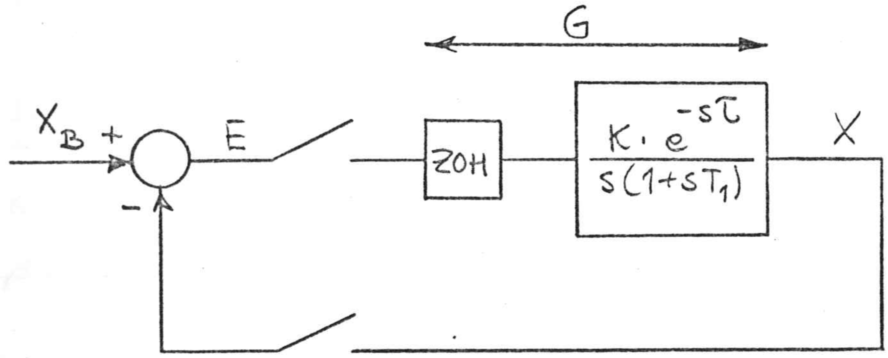


UT = IN och ARE = 1

I övriga fall är UT = 0

2.2 ANALYS AV OKOMPENSERADE OCH KOMPENSERADE SYSTEMETS REGLEREGENSKAPER.

System:



$$\frac{E}{X_B} = \frac{1}{1 + G(z)}$$

Systemet reglerar ett steg felfritt.

Motivering:

$$G(s) = \frac{1 - e^{sT}}{s} \cdot \frac{K \cdot e^{-s\tau}}{s(1 + sT_1)}$$

$$G(z) = (1 - z^{-1}) \cdot z^{-2} \cdot G_1(z)$$

$$G_1(z) = \frac{K\alpha \cdot z \cdot (z + \gamma)}{(z - 1)^2 \cdot (z - \beta)}$$

$$G(z) = \frac{K\alpha \cdot (z + \gamma)}{z^2 \cdot (z - 1) \cdot (z - \beta)}$$

Reglerfel för steg efter oändlig tid betecknas med C_0

$$C_0 = \lim_{z \to 1} (1 - z^{-1}) \cdot \frac{\frac{1}{1 - z^{-1}}}{1 + G(z)} = \frac{1}{1 + G(1)} = 0$$

Reglerfel för ramp betecknas med C_1.

$$C_1 = \lim_{z \to 1} \frac{(1 - z^{-1}) \cdot \frac{Tz}{(z - 1)^2}}{1 + G(z)} =$$

$$= \lim_{z \to 1} \frac{T \cdot z^2 \cdot (z - \beta)}{K\alpha \cdot (z + \gamma)} = 0.017$$

$K = 60$; $\alpha = 0{,}0027$; $\gamma = 0.801$

$\beta = 0.513$

Vid reglering av en parabel erhålles ett stationärfel som är oändligt stort.

Felkoefficienter vid olika regleringar

Prop -regulator (Se fig 2.2.1)

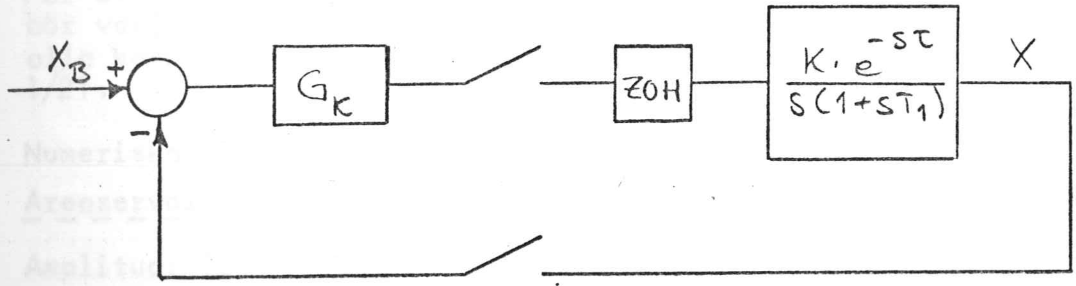


Fig 2.2.1
Innerloop.

$G_K = 0.25$ (proportionell regulator)

$C_0 = 0$

$C_1 = 0.067 = 6,7\ \%$

$C_2 = \infty$

Fasavancerad kompensering

$$G_K(z) = \frac{1.235 - 0.633\ z^{-1}}{1 + 0.802\ z^{-1}} \quad \text{(nominellt filter)}$$

$C_0 = 0$

$C_1 = 0.017 = 1,7\ \%$

$C_2 = \infty$

Störningar och brus

Stokastiskt brus införes i areaservoloppens negativa återkoppling, samt för tryckmätning i vissa betydelsefulla punkter.

Några kommentarer:

För att undvika obehaglingheter, på grund av vikningseffekten, bör varje samplare föregås av ett filter, som effektivt eliminerar alla komponenter i den samplade signalen med frekvenser högre än 1/2T.

Numeriska värden på brusamplitud och - frekvens:

Areaservoloopen.

Amplitud: 1,5 mm (0,06 inch)

Frekvens: 0 - 50 Hz

Π_t-regleringen (Pt7-mätningen)

Amplitud: 4,82 kPa (0,7 psi)

Frekvens: 0 - 25 Hz

2.3 SPECIFIKATIONER PÅ DET NYA REGLERSYSTEMET.

Enligt tidigare prov i testrigg med ett areaservo bestående av en momentmotor och ställcylindrar har följande resultat framkommit.

På grund av den tidigare nämnda tidsfördröjningen erhölls omkring 10 % översving vid ungefär 60 ggr förstärkning på areaservot. Med tanke på tryckspikar i pumpar och mekaniska påkänningar är detta en oacceltabelt hög översving.

I stället vore det önskvärt att ha en kretsförstärkning på omkring 60 och stegsvaret översvängningsfritt, samt stigtiden omkring 0,2 sek. Detta skulle ge en betydligt snabbare reglering av arean än nuvarande hydromekaniska system presterar. Hur snabb man kan göra regleringen måste vägas mot rippel i utsignalen samt styrsignalens storlek till momentmotorn. Dessa synpunkter är viktiga med tanke på slitage av servot och tryckspikar i pumparna.

Sammanfattningsvis kan följande nämnas:

1) Så snabb reglering som möjligt av arean med små styrsignaler till servot samtidigt som utsignalen är rippelfri.

2) Regleringen bör vara relativt okänslig mot parametervariationer (τ, K och T_1).

3) Regleringen skall ha ett acceptabelt uppförande vid införande av störning, dvs utsignalens varians bör vara så liten som möjligt.

3. DIMENSIONERING AV DIGITAL REGULATOR FÖR AREAREGLERING

3.1 DIMENSIONERING AV FASAVANCERADE NÄT.

Systemet (fig 3.1.1) skall regleras så att specifikationerna på stegsvaret uppfylles.

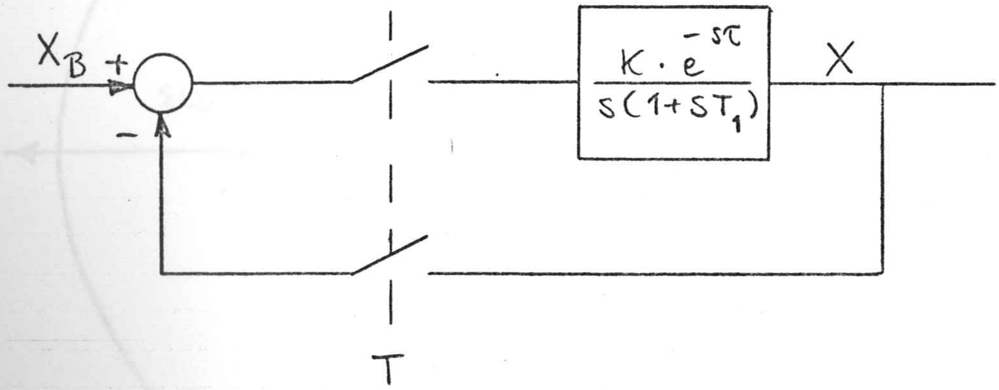


Fig 3.1.1

Lapacetransform för momentmotor och manövercylinder (kontinuerligt system).

$$X_B\ (s)\ \cdot\ \frac{K\ e^{-s\tau}}{s\ (1 + sT_1)} = X\ (s)$$

τ = 0,02 s
T_1 = 0,015 s
K = 60
SAMPLINGSTIDEN T = 0,02 s

Följande beteckningar införes

$$G\ (s) = \frac{K}{s\ (1 + sT_1)}$$

G (z) anger att G är given i z-transform på grund av att sampling sker.

Det kontinuerliga systemet är stabilt för alla K, men för det samplade gäller ej detta, ty fasmarginal förloras då sampling sker. Se fig 3.1.2.

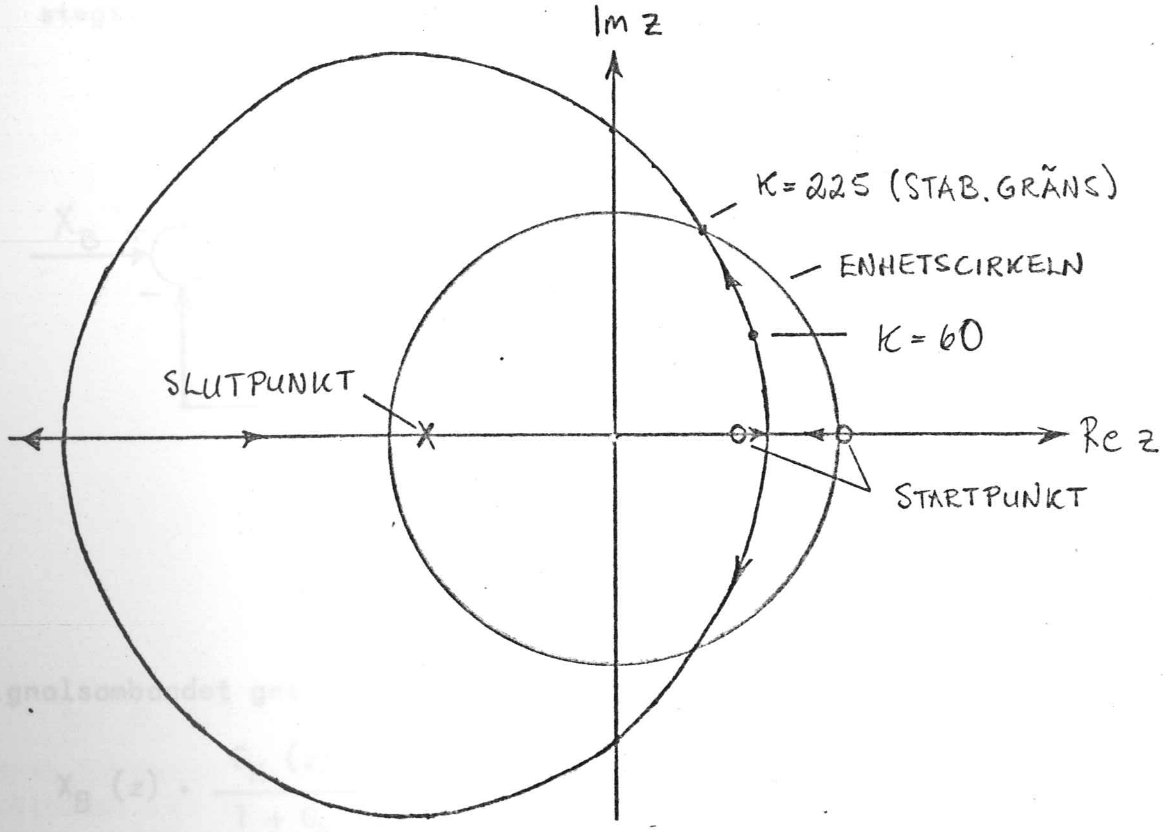


Fig 3.1.2

Rotorten för det samplade systemet utan tidsfördröjning.

Enl fig 3.1.2 blir det samplade systemet instabilt för K = 225.

Som första försök att reglera det givna systemet med tidsfördröjning konstrueras en Otto-Smith regulator.

Otto-Smith regulator

Beräkningsprincip.

1. Man ser till att det icke fördröjda systemets (fig 3.1.3) stegsvar uppfyller specifikationerna.

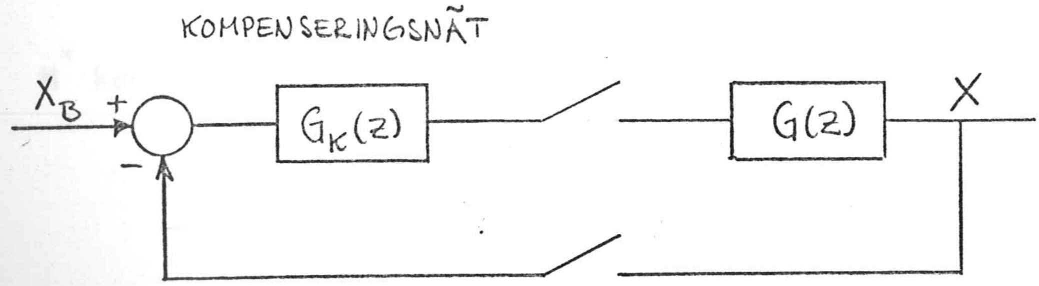


Fig 3.1.3

Kompenserat system.

Signalsambandet ges av:

$$X_B(z) \cdot \frac{G_K(z) \cdot G(z)}{1 + G_K(z) \cdot G(z)} = X(z)$$

2. Med tidsfördröjning skall samma stegsvar erhållas som i punkt 1, med den skillnaden att stegsvaret nu är förskjutet K steg (fig 3.1.4) I vårt fall är K = 2, ty τ = 2T (T = samplingstiden)

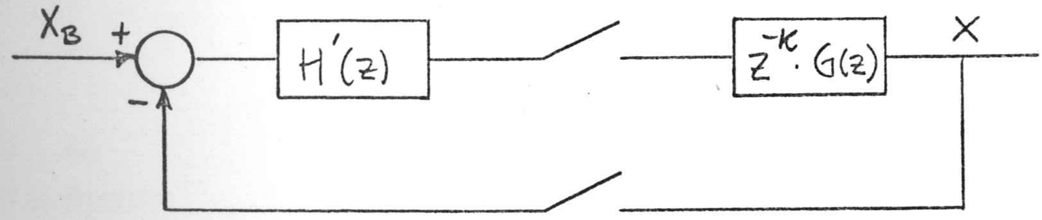


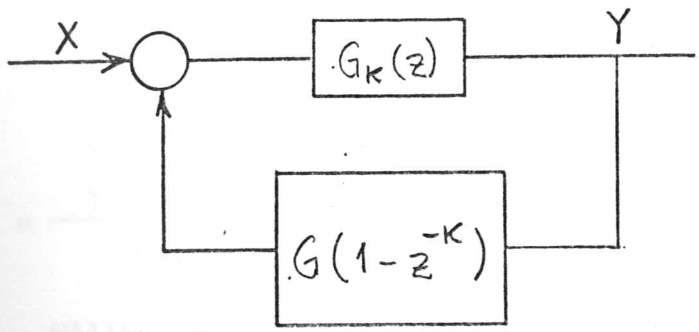
Fig 3.1.4

Med dessa förutsättningar får man följande likhet:

$$\frac{z^{-K} \cdot H' \cdot G}{1 + z^{-K} \cdot H' \cdot G} = \frac{z^{-K} \cdot G_K \cdot G}{1 + G_K \cdot G}$$

$$H' = \frac{G_K}{1 + G \cdot G_K (1 - z^{-K})}$$

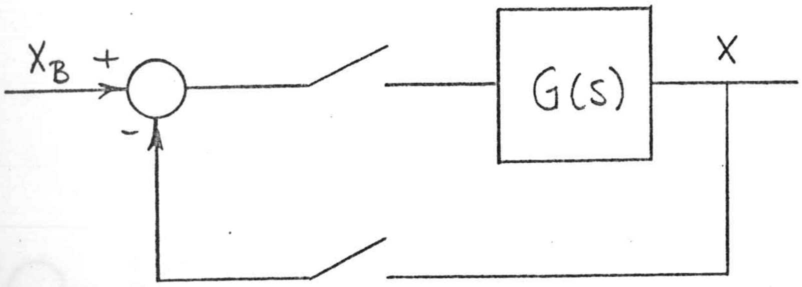
H' kan i blockschema konstrueras enl fig nedan.



$$X \cdot H' = Y$$

Först beräknas z-transformen för det slutna systemet utan fördröjning. För att uppfylla stegsvarsspec räcker det att G_K är en prop-regulator. Uppsnabbning av systemet är önskvärt, varför även ett fasavancerande filter konstrueras.

Bestämning av systemets z-transform utan fördröjning



$$G(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \cdot \frac{1}{(1 + sT_1)} \cdot \frac{K}{s}$$

Hållkrets | Momentmotor + Manövercylinder

$$X_B(s) \cdot \frac{G(s)}{1 + G(s)} = X(s)$$

$$X_B(z) \cdot \frac{G(z)}{1 + G(z)} = X(z)$$

$$G(s) = \frac{(1 - e^{-sT})\,K}{s^2\,(1 + sT_1)} \quad (=) \quad G(z) = \frac{K\alpha\,(z + \gamma)}{(z-1)(z-\beta)}$$

$K = 60$

$\alpha = 0,0027$

$\gamma = 0,801$

$\beta = 0,513$

$T = 0,02$ s

$T_1 = 0,015$ s

Sammanfattningsvis kan följande blockschema (fig 3.1.5) ritas då Otto-Smith regulator användes.

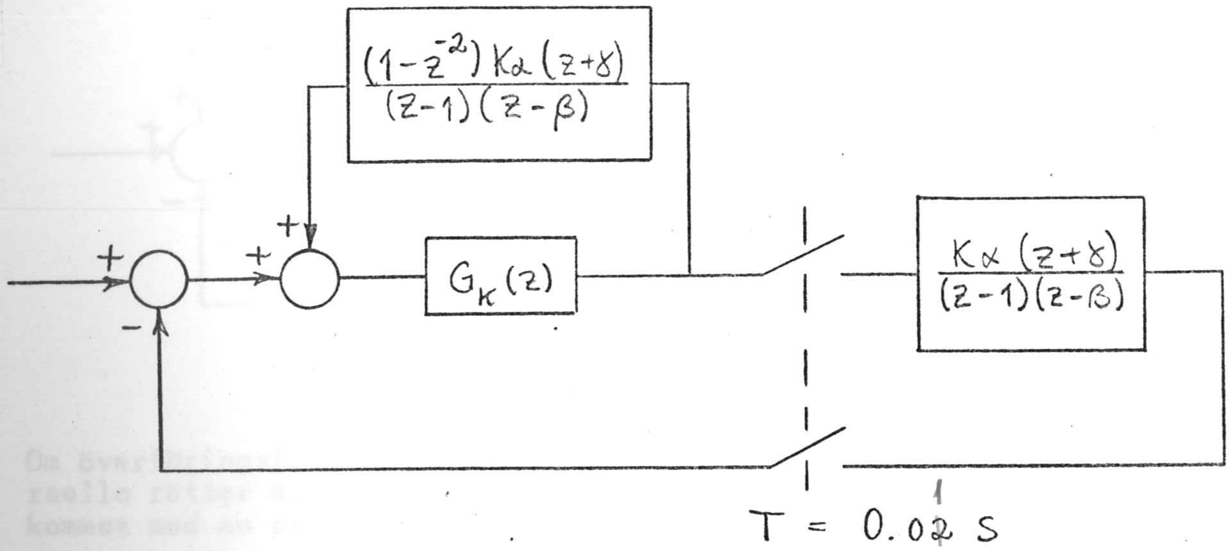
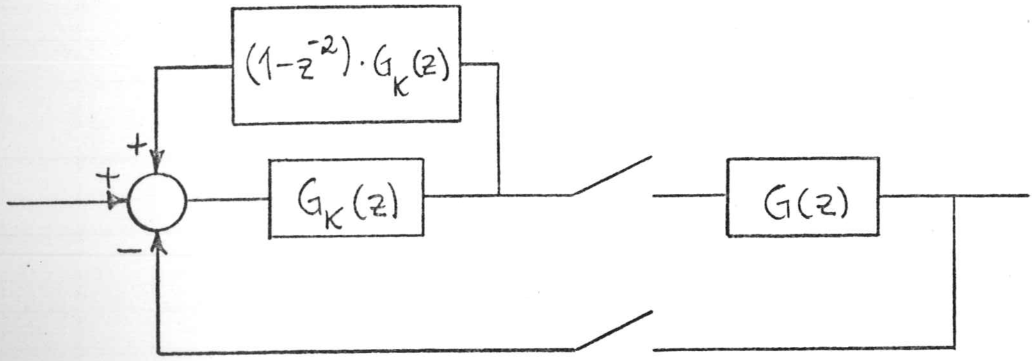


Fig 3.1.5

Blockschema i z-transform för systemet försett med Otto-Smith reg.

Bestämning av $G_K(z)$.



Om överföringsfunktionens nämnare, för det slutna systemet har reella rötter är stegsvaret översvängningsfritt. Detta kan åstadkommas med en proportionell regulator.

Välj $G_K(z) = 0.25$

För programmering av de olika blocken hänvisas till bilaga 2.

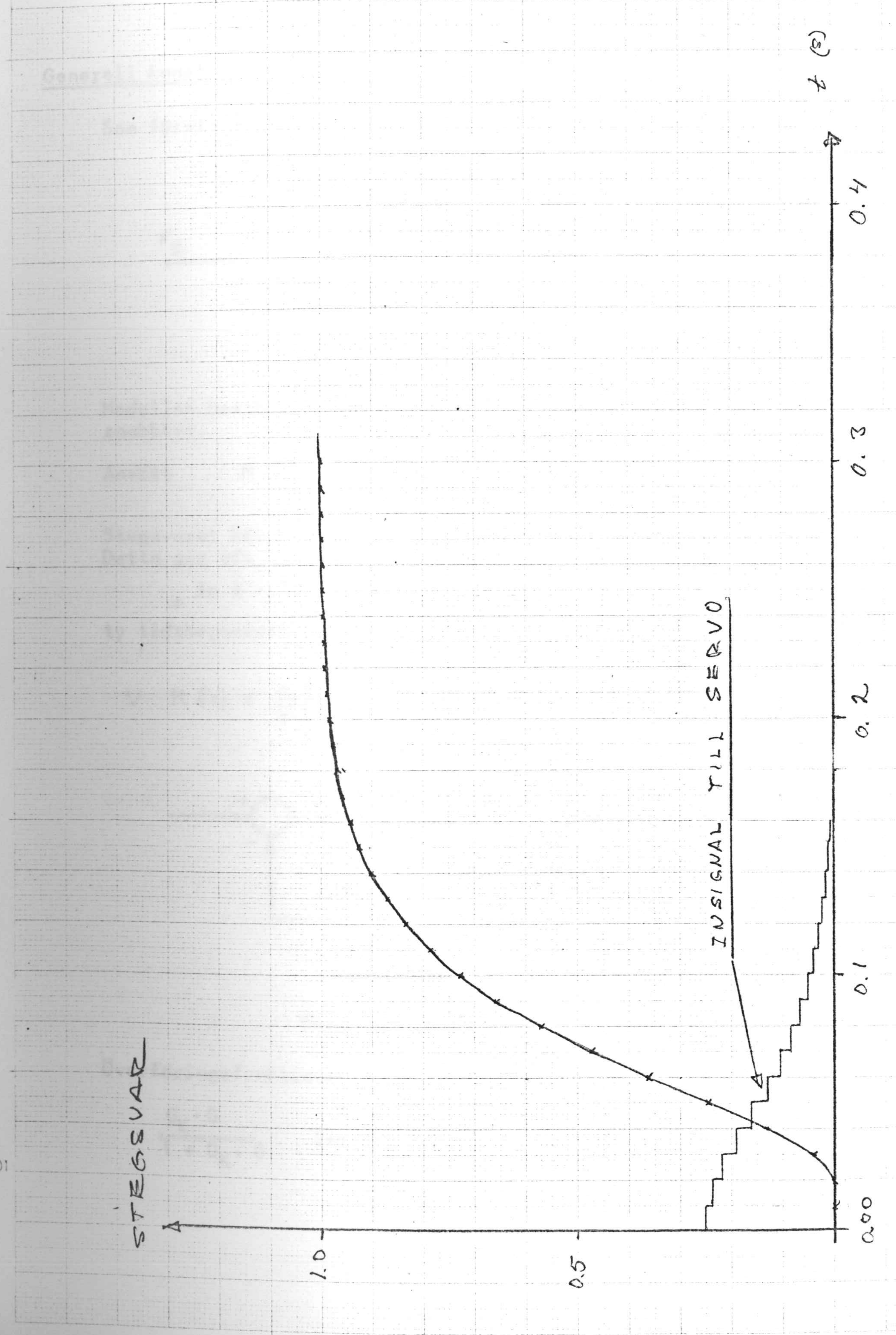
Stegsvar med proportionell regulator och Otto Smith-regulator har studerats med hjälp av detta program. Se fig 3.1.6. Stegsvaret regleras utan fel, eftersom en integrator finns i servot.

Rippel i stegsvaret kan ej studeras, därför att vi endast studerar utsignalen i samplingspunkterna. Insignalen till servot är acceptabel. Tidsspecifikationerna är uppfyllda.

Då man ökar kravet på insignalens utseende (t ex ramp) blir de stationära felen relativt stora med prop.-reg. Kravet på så snabb π_t-regl som möjligt gör att ett uppsnabbat system vore önskvärt.

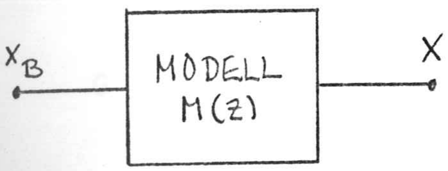
Fig 3.1.6

STEGSVAR MED PROPORTIONELL REGULATOR + OTTO SMITH



Generell konstruktionsmetod för filter

Som första försök ansättes en modell av grad 1 (se fig 3.1.7)



$X(z) = M(z) \cdot X_B(z)$

Fig 3.1.7

Modellen bestäms av specifikationerna till stegsvaret och av önskad snabbhet.

Ansätt $M(z) = \dfrac{1 - a}{z - a}$

Stegsvaret bör ha ett fel som är mindre än 0,1 efter 10 samplingar. Detta ger att

$e^{\ln a \cdot 10} = 0{,}1 \Rightarrow a \approx 0{,}8$

ty tidsberoendet har ett exponentiellt uppförande enl $\exp(\ln a/T \cdot t)$

$\therefore M(z) = \dfrac{0{,}2}{z - 0{,}8}$

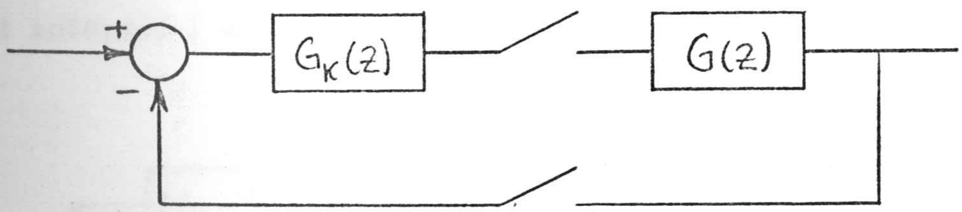


Fig 3.1.8
Blockschema för systemet

Överföringsfunktionen för det återkopplade systemet ges av

$\dfrac{G_K \cdot G}{1 + G_K \cdot G}$ (se fig 3.1.8)

Sätt nu $\dfrac{G_K \cdot G}{1 + G_K \cdot G} = M$

$$G_K\ (z) = \frac{M\ (z)}{(1 - M\ (z)) \cdot G\ (z)}$$

$$G\ (z) = \frac{0.162\ z + 0.130}{(z-1)\ (z - 0.513)}$$

$$\Rightarrow G_K\ (z) = \frac{1.235\ z - 0.633}{z + 0.802}$$

Detta filter kallas i fortsättningen för nominellt filter.

Regleringen kompletteras sedan med Otto Smith-regulatorn, som tar hand om tidsfördröjningen. Se fig 3.1.5. Detta system har testats på LTH med simuleringsprogrammet SIMNON.

Vid uttestningen har även hänsyn tagits till manöverkolvens max-hastighet. Max-kolvhastigheten är 0,3 m/s (11,8 inch/s). Insignalen till servot kallas ACCOT1. Utsignalen kallas ACTPOS.

Härefter följer testresultat. Se fig 3.1.9 - fig 3.1.16.

Uppsnabbat system har

$$G_K\ (z) = \frac{2.037 - 1.045\ z^{-1}}{1 + 0.802\ z^{-1}}$$

Bruset infördes i modellen enl fig 3.1.17 (se även fig 1.5)

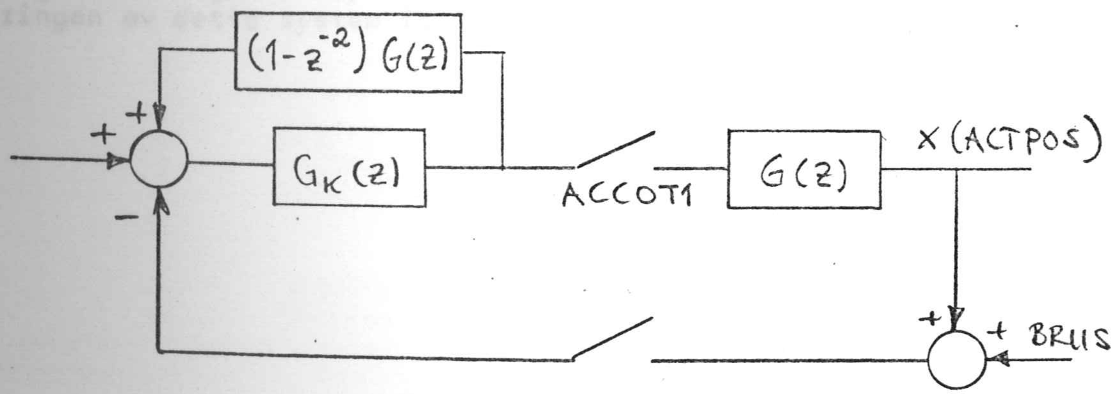


Fig 3.1.17

Brus införes i återkopplingen

Fig 3.1.9 visar den kontinuerliga ACTPOS, i vilken några samplingspunkter är utritade samt ACCOT1. Som synes är ej ACTPOS rippelfri. Styrsignalerna (ACCOT1) är relativt stora. Då hastighetsbegränsningen pålägges minskar ripplet, se fig 3.1.10.

I fig 3.1.11 återges det uppsnabbade systemets stegsvar. Styrsignalerna till servot är mycket stora.

Systemets känslighet mot parametervariationer återges i fig 3.1.13 och 3.1.14.

Stegsvaret svänger ej över i något fall i fig 3.1.13, men signalen har rippel. Införande av hastighetsbegränsning minskar ripplet något. För T_1 = 0,03 svänger stegsvaret över (fig 3,1,14), samt ripplet ökar då T_1 minskar.

Kolvlägets uppförande då brus införes i systemet återges i fig 3.1.15. Kolvläget är mycket knyckigt vilket ger upphov till slitage, och dessutom är styrsignalerna till servot stora.

Avslutningsvis kan följande sägas:

Det är önskvärt med små styrsignaler till servot, och systemet bör vara så rippelfritt som möjligt. Regleringen bör heller inte vara för känslig för parametervariationer. Regleringen, som presenterats, uppfyller tidsspecifikationerna i alla sammanhang. Om systemet är väl känt är ripplet någorlunda acceptabelt, men styrsignalerna till servot är för stora ur slitagesynpunkt.

Valet av modul (M(z)) och därmed kompenseringsnät (G_K (z)) kan göras på många sätt med hänsyn till specifikationer och systemets grad. Insignalerna till servot kan minskas genom att öka graden på M(z). Stegsvarets rippel minskar betydligt då insignalerna till servot minskar (Se kap 3.3).

Fasavancerade filter kombinerat med Otto-Smith regulator anses härmed slutbehandlat. En sammanställning av denna regulator och av övriga regulatorer ges i kap 4. Andra intressanta sätt att angripa regleringen av detta system följer i kap 3.2 och 3.3.

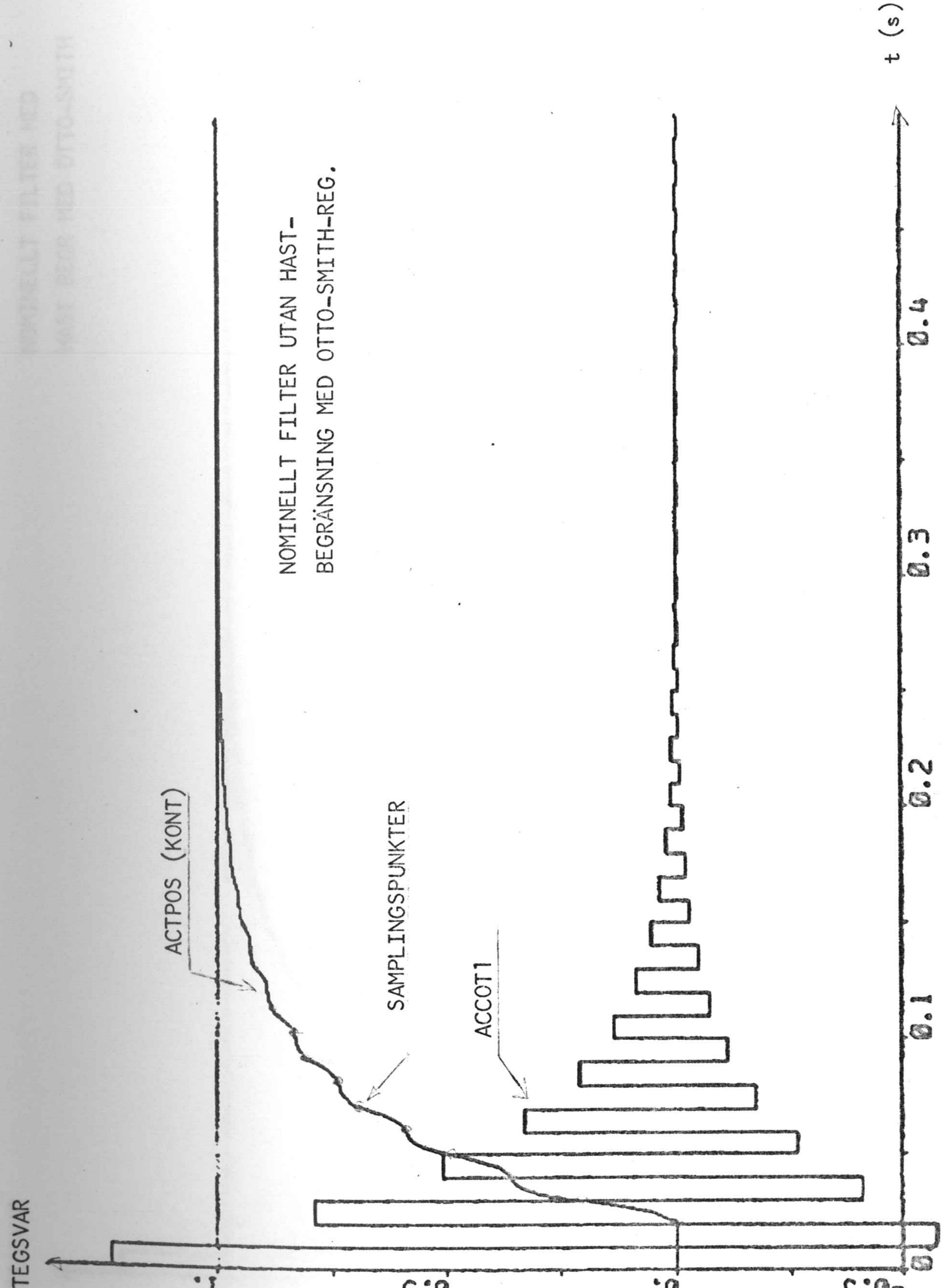

STEGSVAR
1.
0.5
0.
-0.5
0
0.1
0.2
0.3
0.4
t (s)
ACTPOS (KONT)
SAMPLINGSPUNKTER
ACCOT1
NOMINELLT FILTER UTAN HAST-
BEGRÄNSNING MED OTTO-SMITH-REG.

Fig 3.1.9

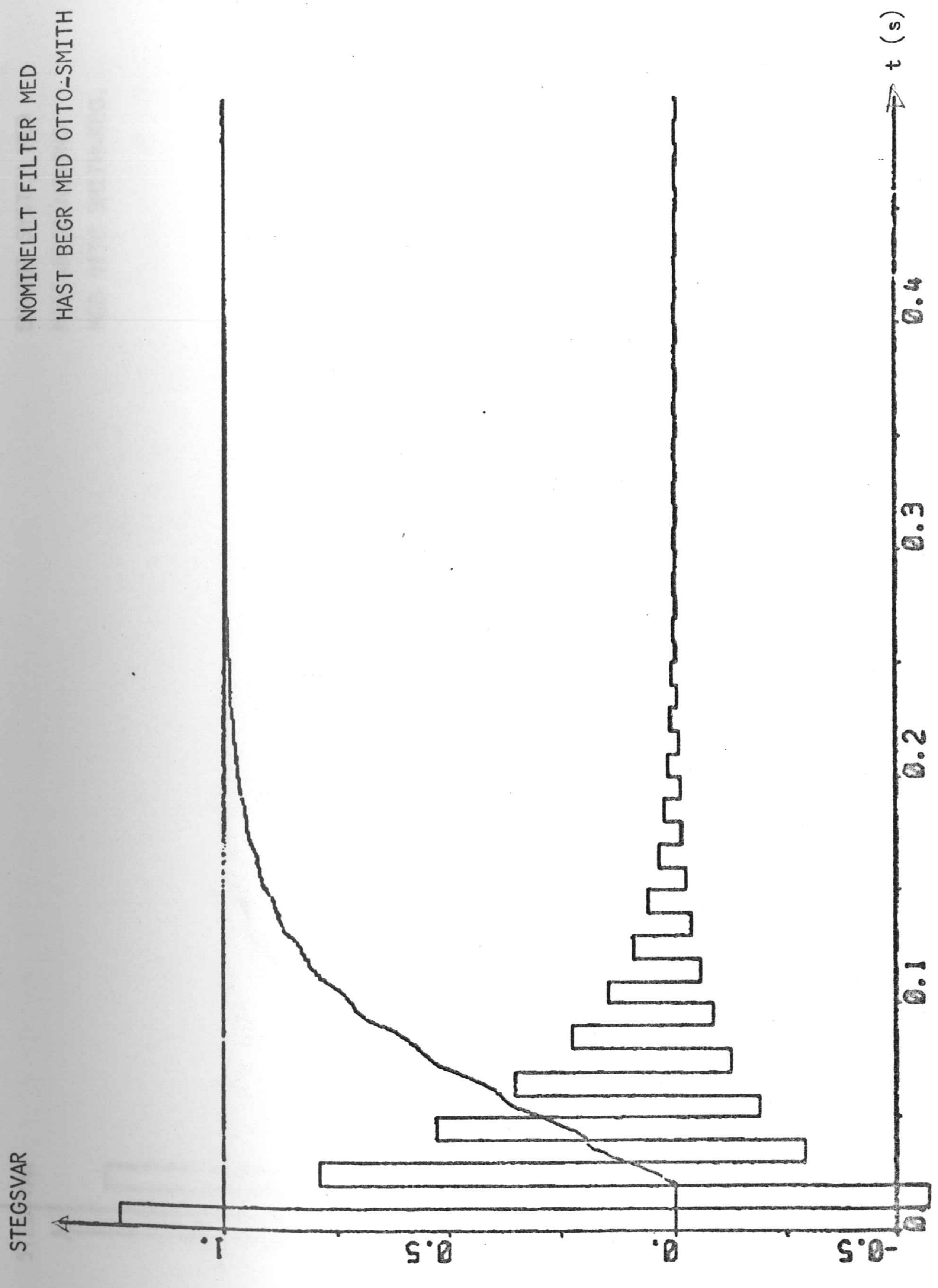

STEGSVAR
NOMINELLT FILTER MED
HAST BEGR MED OTTO-SMITH
t (s)
0.1
0.2
0.3
0.4
1.
0.5
0.
-0.5

Fig 3.1.10

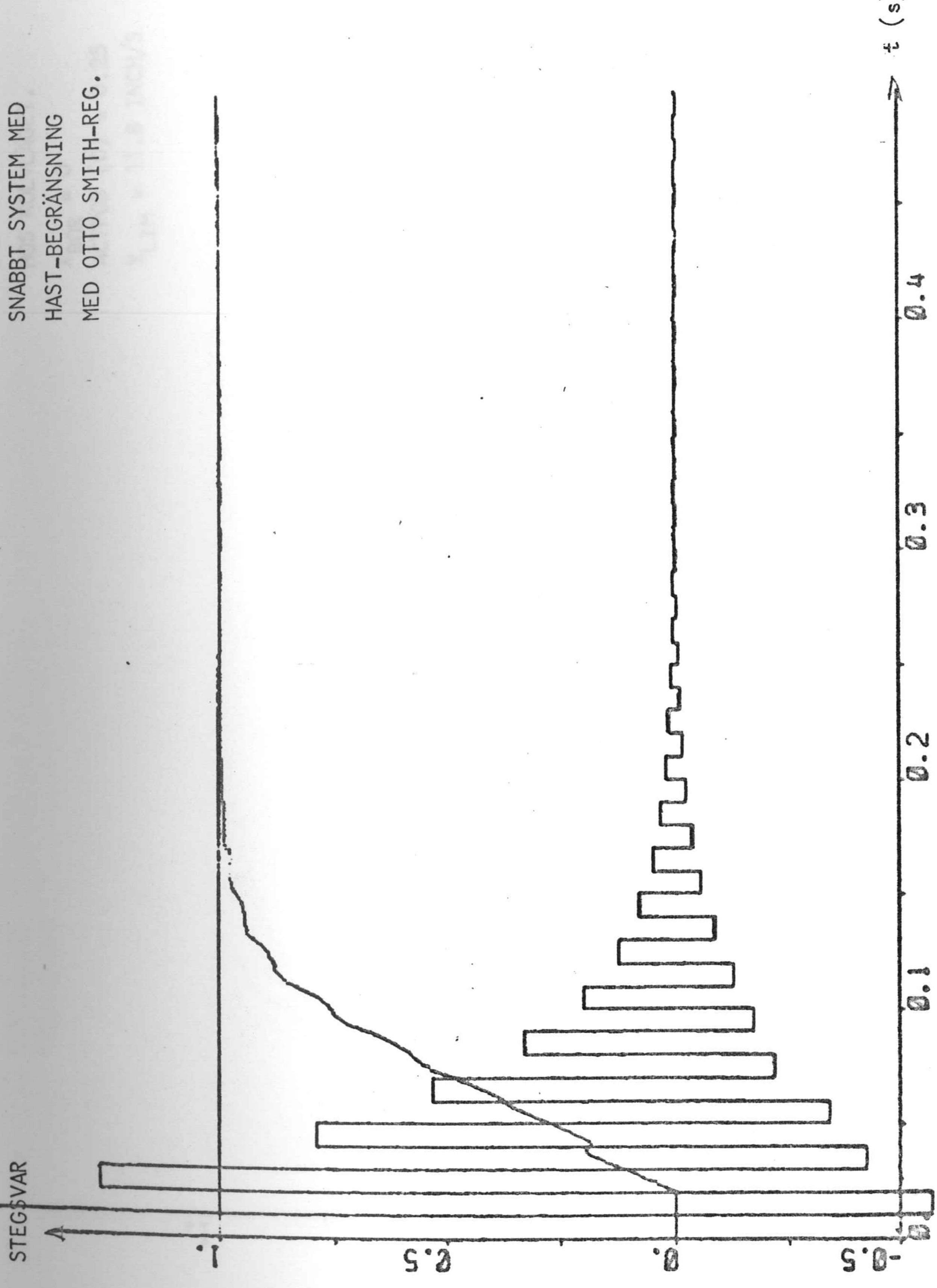

SNABBT SYSTEM MED
HAST-BEGRÄNSNING
MED OTTO SMITH-REG.
STEGSVAR
t (s)
1.
0.5
0.
-0.5
0
0.1
0.2
0.3
0.4

Fig 3.1.11

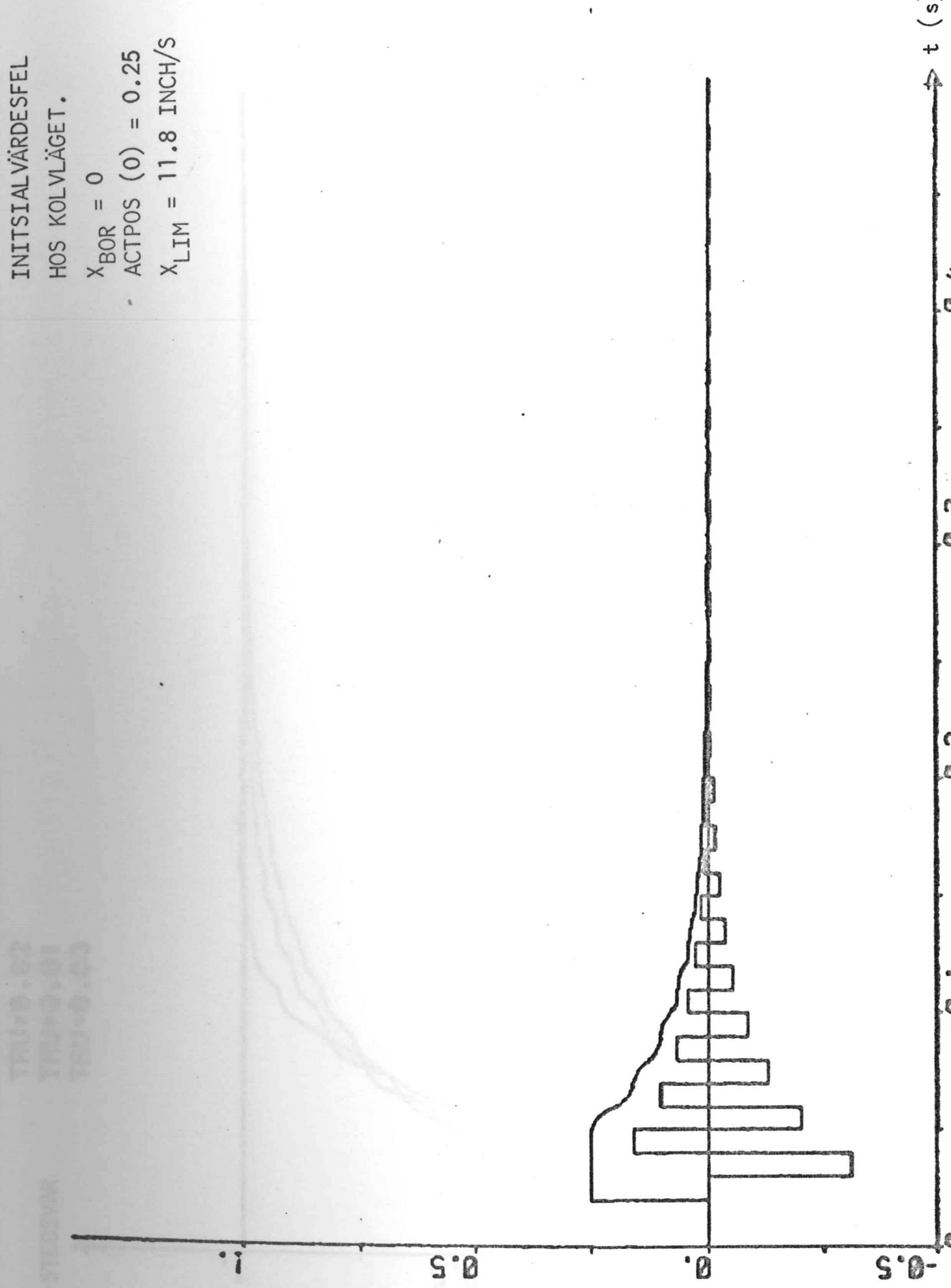

INITSIALVÄRDESFEL
HOS KOLVLÄGET.
X_{BOR} = 0
ACTPOS (0) = 0.25
X_{LIM} = 11.8 INCH/S
t (s)
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
1.
0.5
0.
-0.5

Fig 3.1.12

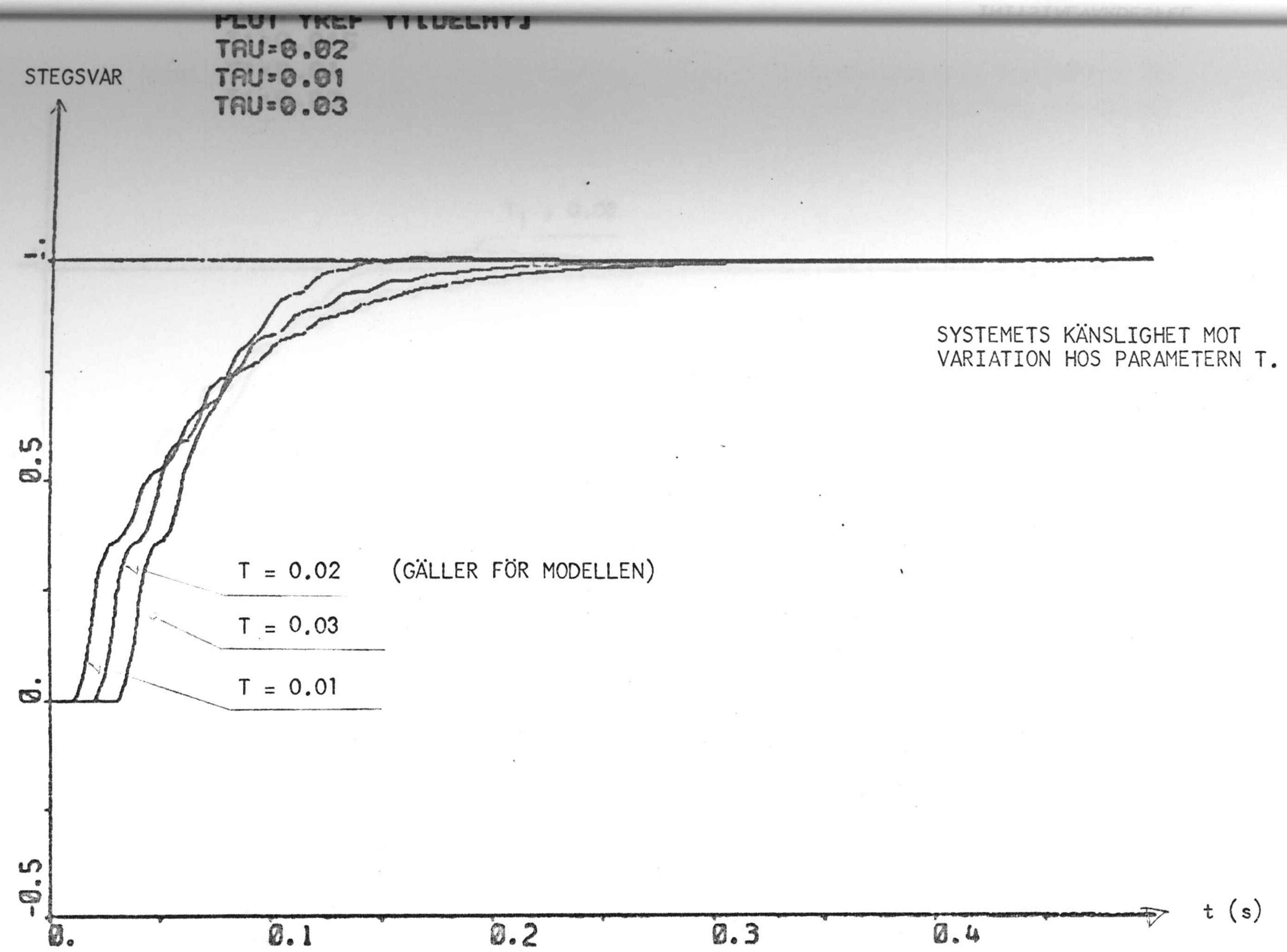

TAU=0.02
TAU=0.01
TAU=0.03
STEGSVAR
1.
0.5
0.
-0.5
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
t (s)
T = 0.02
T = 0.03
T = 0.01
(GÄLLER FÖR MODELLEN)
SYSTEMETS KÄNSLIGHET MOT
VARIATION HOS PARAMETERN T.

Fig 3.1.13

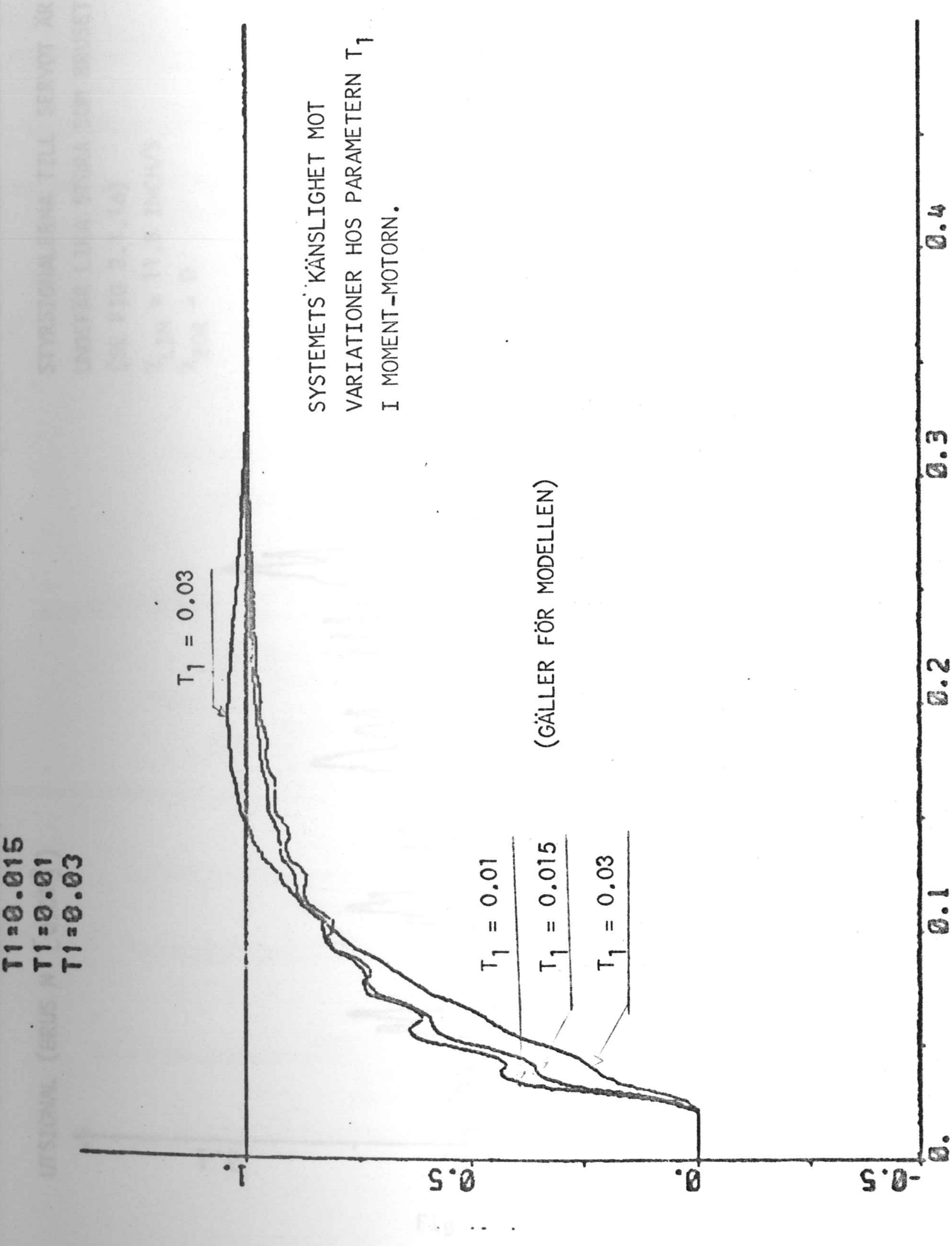

T1=0.015
T1=0.01
T1=0.03
SYSTEMETS KÄNSLIGHET MOT
VARIATIONER HOS PARAMETERN T_1
I MOMENT-MOTORN.
(GÄLLER FÖR MODELLEN)
T_1 = 0.01
T_1 = 0.015
T_1 = 0.03
T_1 = 0.03
1.
0.5
0.
-0.5
0.
0.1
0.2
0.3
0.4

Fig 3.1.14

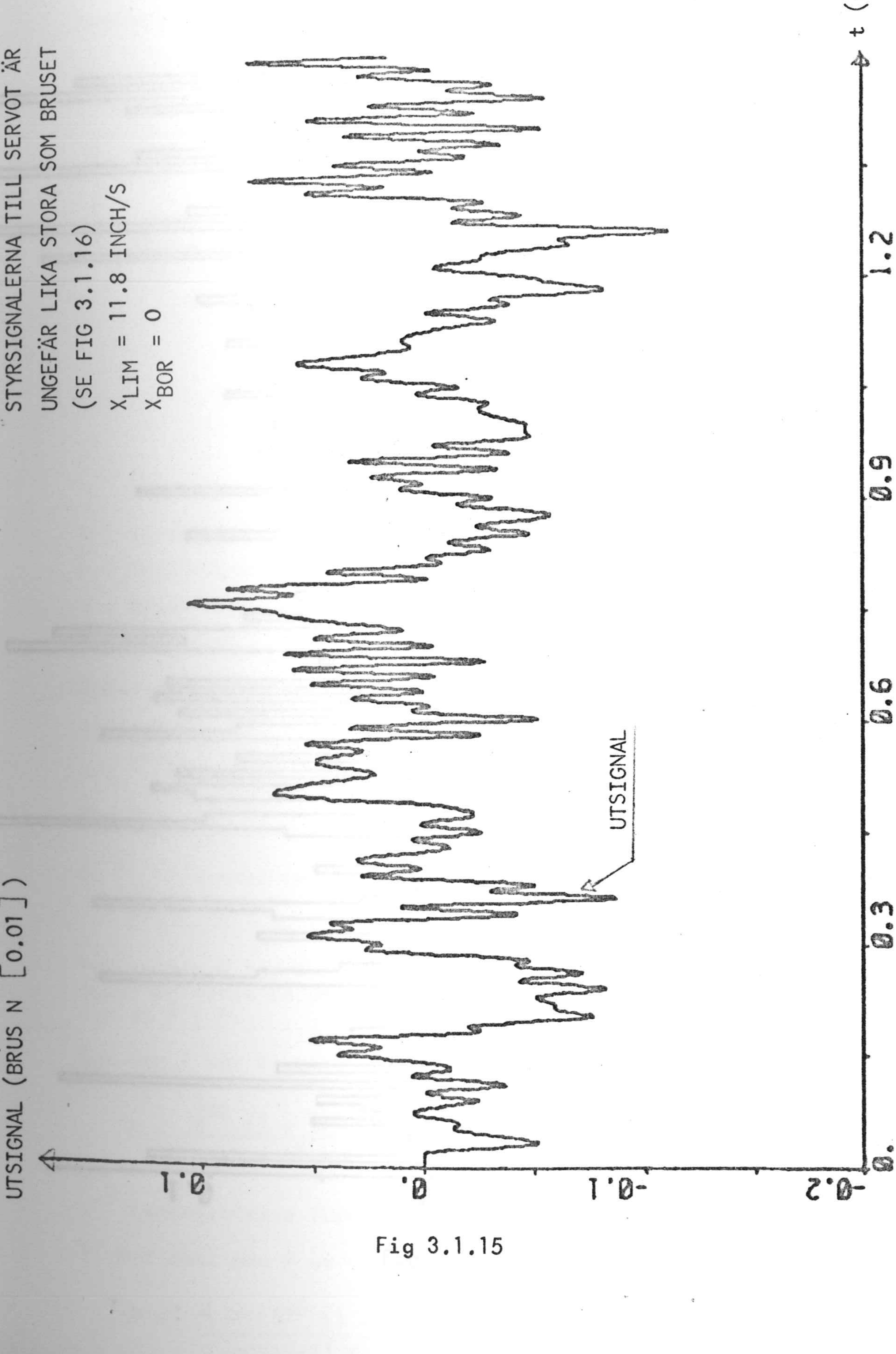

UTSIGNAL (BRUS N [0.01])
STYRSIGNALERNA TILL SERVOT ÄR
UNGEFÄR LIKA STORA SOM BRUSET
(SE FIG 3.1.16)
X_{LIM} = 11.8 INCH/S
X_{BOR} = 0
UTSIGNAL
0.1
0.
-0.1
-0.2
0.
0.3
0.6
0.9
1.2
t (s)

Fig 3.1.15

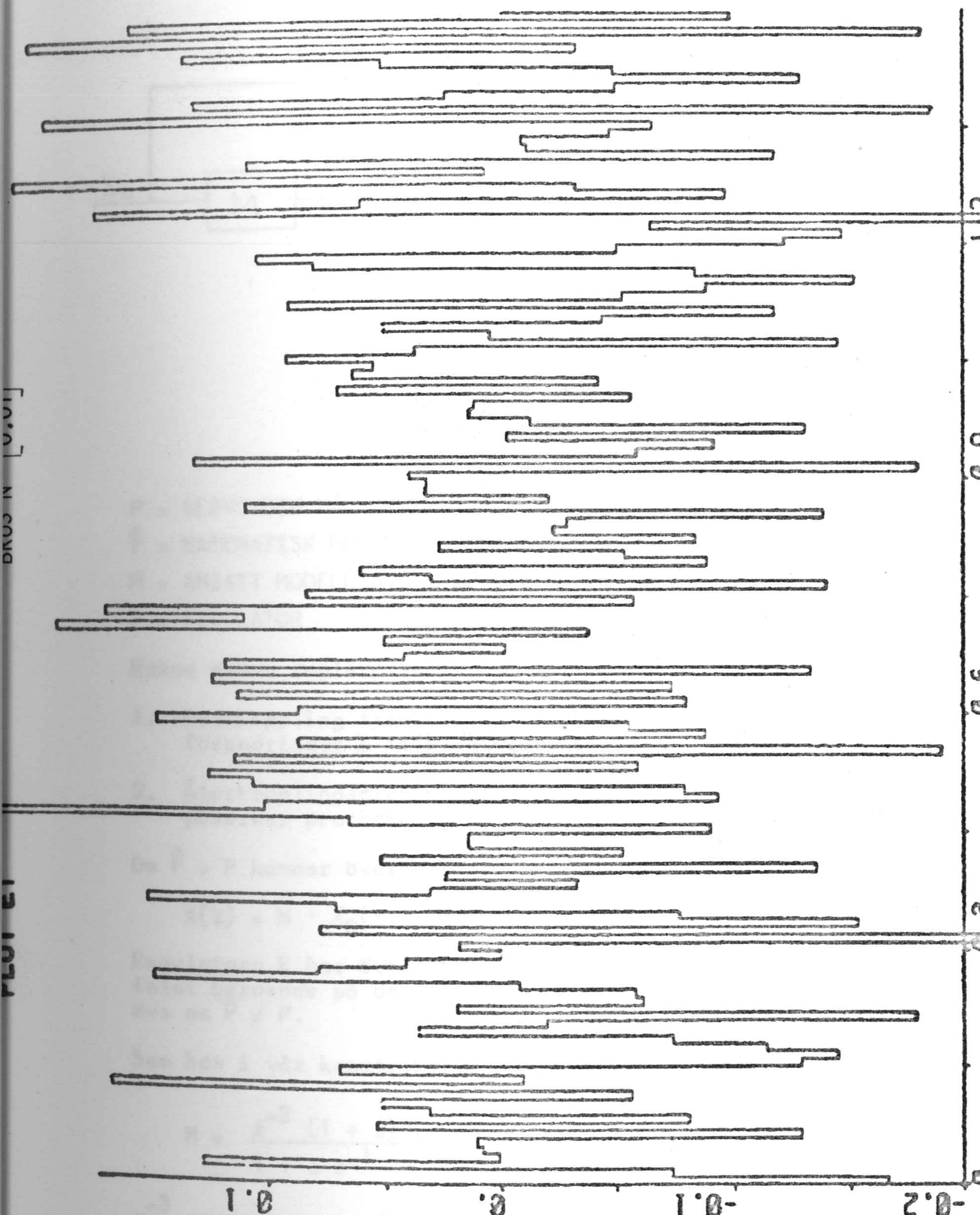


Fig 3.1.16

3.2 FRAMKOPPLING KOMBINERAT MED ÅTERKOPPLING

Regleringsprincip se Fig 3.2.1.

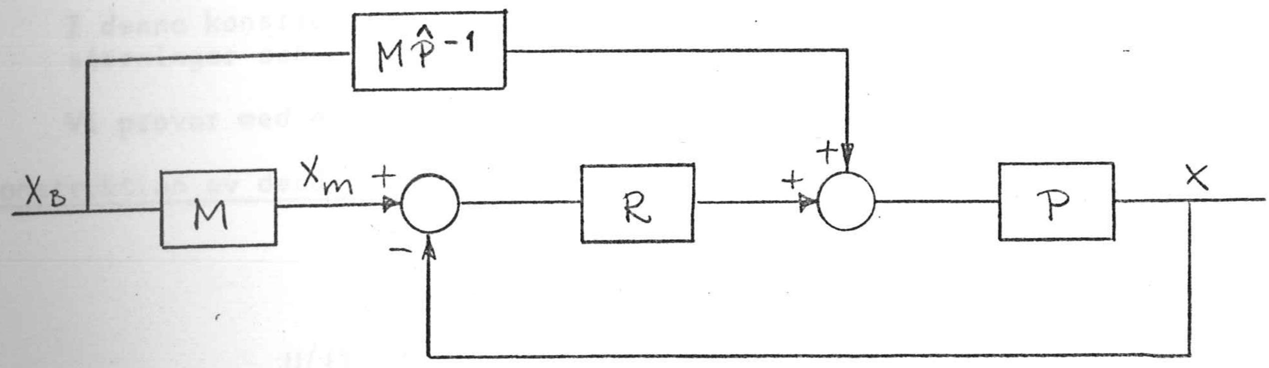


Fig 3.2.1

Blockschema.

P = SERVO OCH HÅLLKRETS

$\hat{P}$ = MATEMATISK MODELL AV P

M = ANSATT MODELL AV SYSTEMET

R = REGULATOR

Bakom denna reglerprincip ligger i första hand två filosofier:

1. Framkoppling från referenssignalen. Blocket $M\hat{P}^{-1}$ tar hand om förändringar i referenssignalen.
2. Återkopplingsgrenen med regulatorn tar hand om störningar som påverkar processen.

Om $\hat{P}$ = P kommer överföringsfunktionen från X_B till X att bli

$$X(t) = M \cdot X_B(t)$$

Regulatorn R har även till uppgift att i görligaste mån ta hand om felet beroende på den ofullständiga kännedomen om processen (P), dvs om $\hat{P} \neq P$.

Som bas i vår konstruktion av en systemreglering ansätter vi

$$M = \frac{z^{-3}\,(1 + a)}{1 + a\,z^{-1}}$$

z^{-3} representerar fördröjningen i systemet och hållkretsen.

I vårt fall ges P av

$$P = \frac{K\,\alpha \cdot z^{-3}\,(1 + \gamma\,z^{-1})}{(1 - z^{-1})\,(1 - \beta\,z^{-1})}$$

$K = 60$

$\alpha = 0.0027$

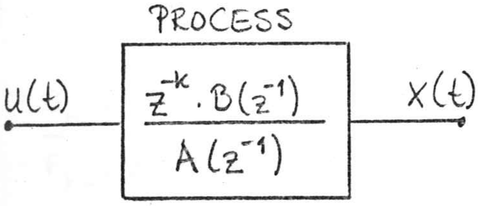
$\beta = 0.513$

$\gamma = 0.801$

I denna konstruktion kommer endast R att kopplas in då det finns störningar och om processen är ofullständigt känd.

Vi provar med en dead-beat-regulator.

Konstruktion av dead-beat-regulator



Bestäm en styrlag sådan att utsignalen blir noll efter så få samplingsintervall som möjligt.

Inför identiteten.

$$1 \equiv A(z^{-1}) \cdot F_{K-1}(z^{-1}) + z^{-k} \cdot G_{n-1}(z^{-1})$$

där $A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \ldots + a_n z^{-n}$

och $B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \ldots + b_n z^{-n}, \; b_0 \neq 0$

graden av F_{k-1} och G_{n-1} är k-1 resp n-1

d v s

$$F_{k-1} (z^{-1}) = 1 + f_1 z^{-1} \ldots + f_{k-1} z^{-(k-1)}$$

$$G_{n-1} (z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} \ldots + g_{n-1} z^{-(n-1)}$$

Identifiering av koefficienterna ger följande:

$0 = a_1 + f_1$

$0 = a_2 + a_1 f_1 + f_2$

o

o

o

$0 = a_{k-1} + a_{k-2} f_1 + \ldots + a_1 f_{k-2} + f_{k-1}$

o
o
o

$$0 = a_n f_{k-2} + a_{n-1} f_{k-1} + g_{n-2}$$

$$0 = a_n f_{k-1} + g_{n-1}$$

Då gäller att

$$X(t) = A(z^{-1}) \cdot F_{k-1}(z^{-1}) X(t) + z^{-k} G_{n-1}(z^{-1}) X(t)$$

$$= z^{-k} (F_{k-1}(z^{-1}) B(z^{-1}) U(t) + G_{n-1}(z^{-1}) X(t))$$

Om $U(t) = - \dfrac{G_{n-1}(z^{-1})}{F_{k-1}(z^{-1}) B(z^{-1})} \cdot X(t)$

Då fel regleras är

$- X(t) \cdot R = U$ (Se fig 3.2.1)

$$R = \frac{G_{n-1}(z^{-1})}{F_{k-1}(z^{-1}) B(z^{-1})}$$

I vårt fall är K = 3

$$B(z^{-1}) = K\alpha (1 + \gamma z^{-1})$$

$$\gamma = 0.801$$

$$K\alpha = 0.162$$

Ur identiteten erhålles

$$1 = (1 - 1.513z^{-1} + 0.513z^{-2}) (1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}) + z^{-3} (g_0 + g_2^{-1})$$

Efter identifieringen erhålles

$$R = \frac{(11.8037 - 5.6247z^{-1})}{1 + 2.314z^{-1} + 2.9881z^{-2} + 1.4227z^{-3}}$$

I modellen som ansattes väljes $a = -0.6$. Systemet simulerades med $X_B = 1.0$. X plottades (se fig 3.2.2). Som synes ripplar den kontinuerliga utsignalen kraftigt. Det visade sig att styrsignalerna till servot var större än 1.0 i början av samplingen. Modifiering av systemet måste göras. Värdet på a ändrades till -0.8. Utsignalen då insignalen är ett steg visas i fig 3.2.3. Ripplet har avtagit men styrsignalerna till servot var fortfarande stora.

För att se hur dead-beat-regulatorn reglerar, exempelvis ett initialvärdesfel då insignalen är 0, simulerades även detta, se fig 3.2.4. Utsignalen blir fort noll i samplingspunkterna men ripplar mellan dessa. Ytterligare modifiering måste göras för att de förutbestämda specifikationerna skall uppfyllas.

Modellen väljes nu av andra ordiningen och dead-beat-regulatorn utbytes mot det nominella fasavancerande filtret som användes i kap 3.1.

Följande val och ansats göres:

$$R = \frac{1.235 - 0.633z^{-1}}{1 + 0.802z^{-2}}$$

$$M = \frac{z^{-3}\,(1 + a_1 + a_2)}{1 + a_1\,z^{-1} + a_2\,z^{-1}}$$

Karakteristiska ekvationen för modellen väljes till

$$z^2 - 1.6z + 0.6625 = 0$$

$$a_1 = -1.6 \text{ och } a_2 = 0.6625$$

Utsignalens stegsvar och reglering av initialvärdesfel, se fig 3.2.5 resp 3.2.6.

Översving erhålles i båda fallen, varför den slutliga modifieringen ger följande utseende på modell och regulator.

$$M = \frac{z^{-3}\;.\;0.0725}{1 - 1.5z^{-1} + 0.5725\;z^{-2}}$$

$$R = \frac{0.6175 - 0.3165\;z^{-1}}{1 + 0.802\quad z^{-1}}$$

Samma simulering som ovan, se fig 3.2.7 resp 3.2.8.
Stegsvaret är jämnt och uppfyller tidsspecifikationerna. Insignalen till servot är relativt liten. Felregleringen är också relativt fri från rippel.

Med valen ovan har variation gjorts på processens parametrar, resultat se fig 3.2.9 och 3.2.10.

Det är intressant att jämföra de olika modellernas karakteristiska ekvation, dvs jämföra nollställena till ekvationerna. Det visade sig att nollställenas placering inom enhetscirkeln i z-planet är av stor vikt. Vid placeringen av nollställen har man stor hjälp av fig 3.2.12.

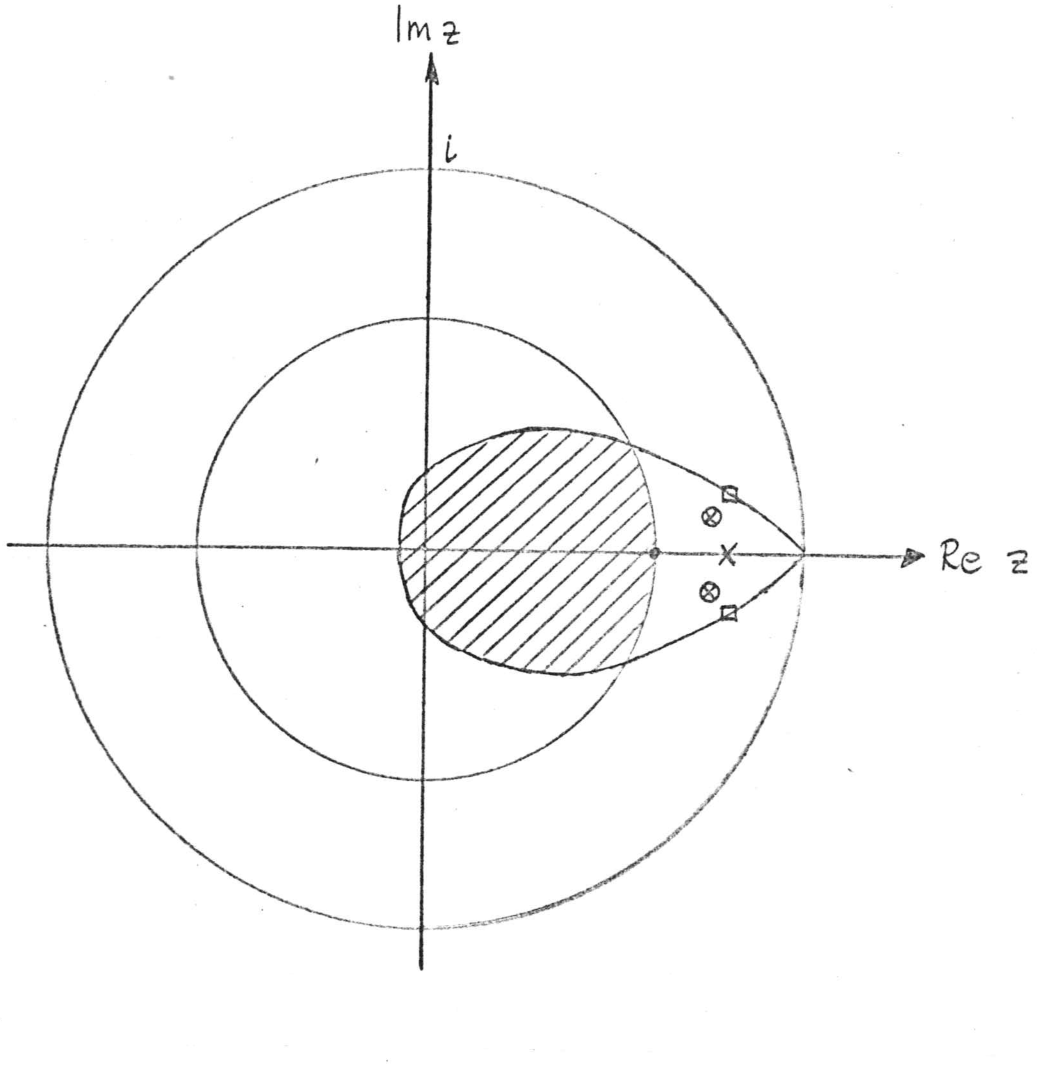


Fig 3.2.12
Polplaceringsdiagram

Om man placerar ett komplext par av nollställen inom det streckade området och alla övriga nollställen inom det heldragna området erhålles ett översvängningsfritt stegsvar. Systemets rippel beror på hur stora styrsignaler man ställer ut på servot, dvs desto större styrsignaler desto större rippel. Ripplet beror även på vilket avstånd från origo nollställena (polerna) ligger. Då gäller att ju mindre avståndet är ju mera ripplar utsignalen.

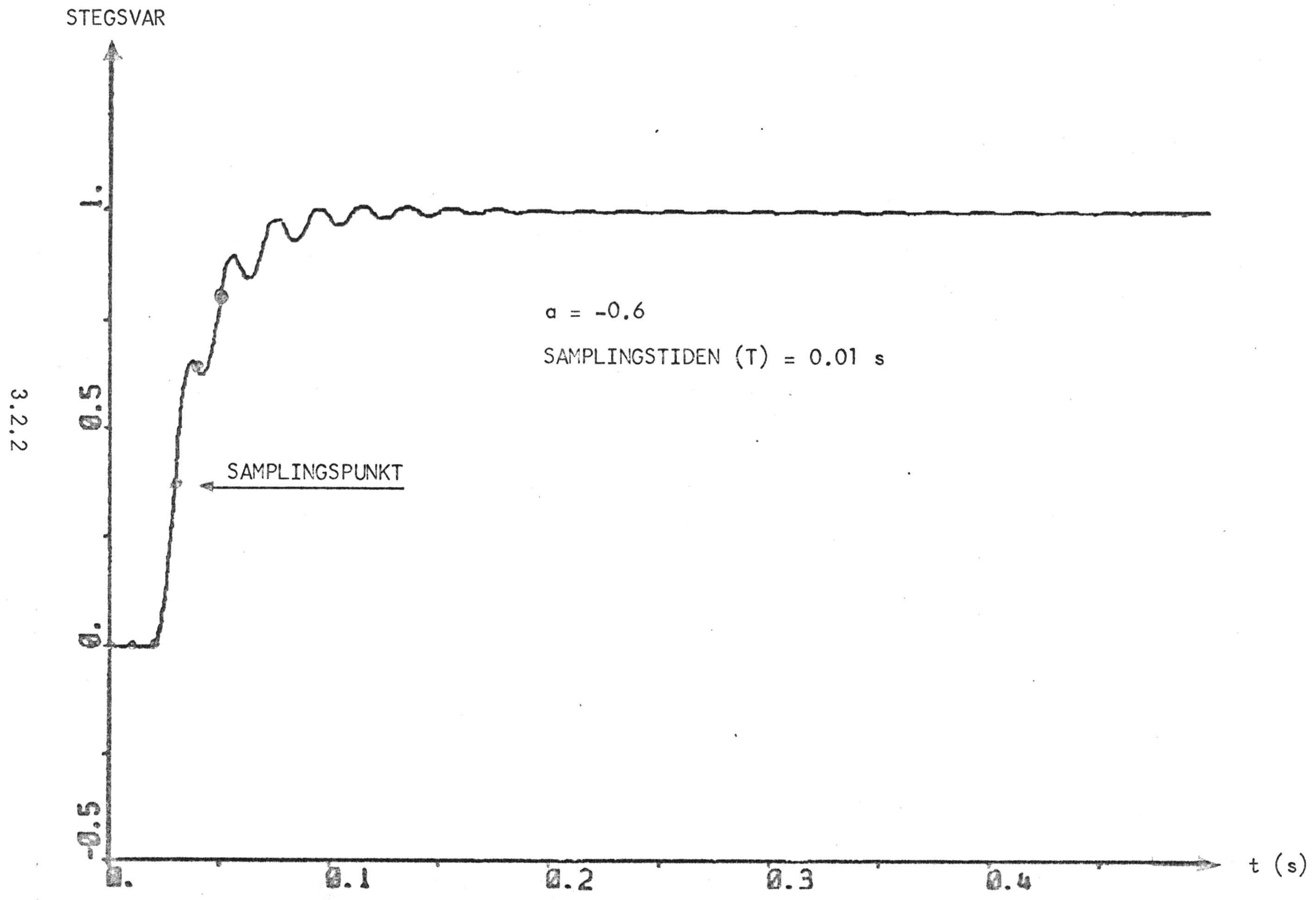
De olika modellernas nollställen till den karakteristika ekvationen är markerade i fig 3.2.12. Samtliga modeller har en dubbelrot i origo.

$z = 0.6$	Markeras med	●
$z = 0.8$	"-	x
$z^2 - 1.6z - 0.6625 = 0$		
$z_{1,2} = 0.8 \pm i\ 0.15$	"-	□
$z^2 - 1.5z + 0.5725 = 0$		
$z_{1,2} = 0.75 \pm 0.1\ i$	"-	⊗

Stegsvarets snabbhet påverkas också då nollställena flyttas ut i det komplexa z-planet.

Avslutningsvis kan sägas att denna metod kan användas generellt. I vårt fall behövs någon extra programmering göras (se bilaga 1)

PLOT Y1


STEGSVAR
1.
0.5
0.
-0.5
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
t (s)
SAMPLINGSPUNKT
a = -0.6
SAMPLINGSTIDEN (T) = 0.01 s

3.2.2

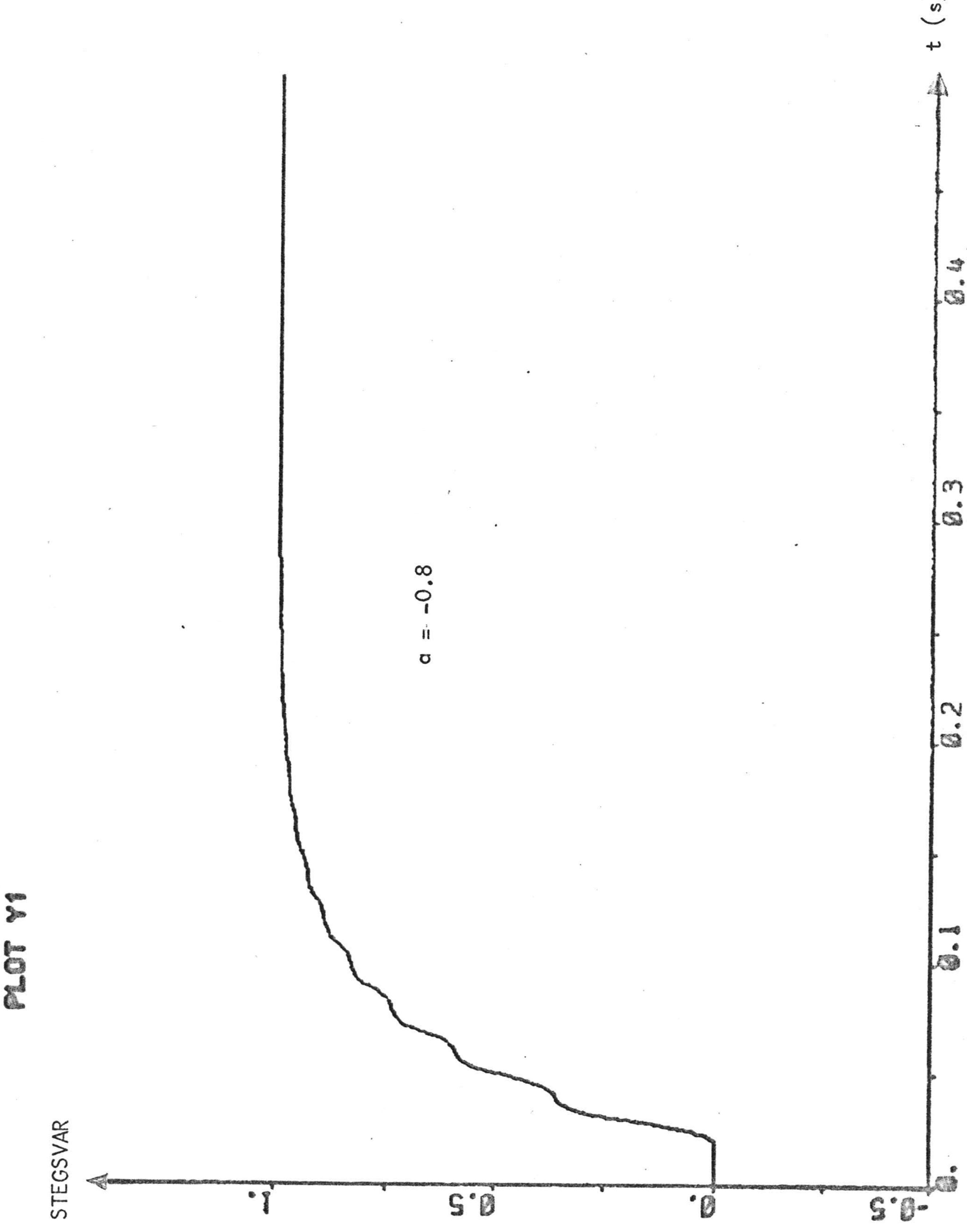
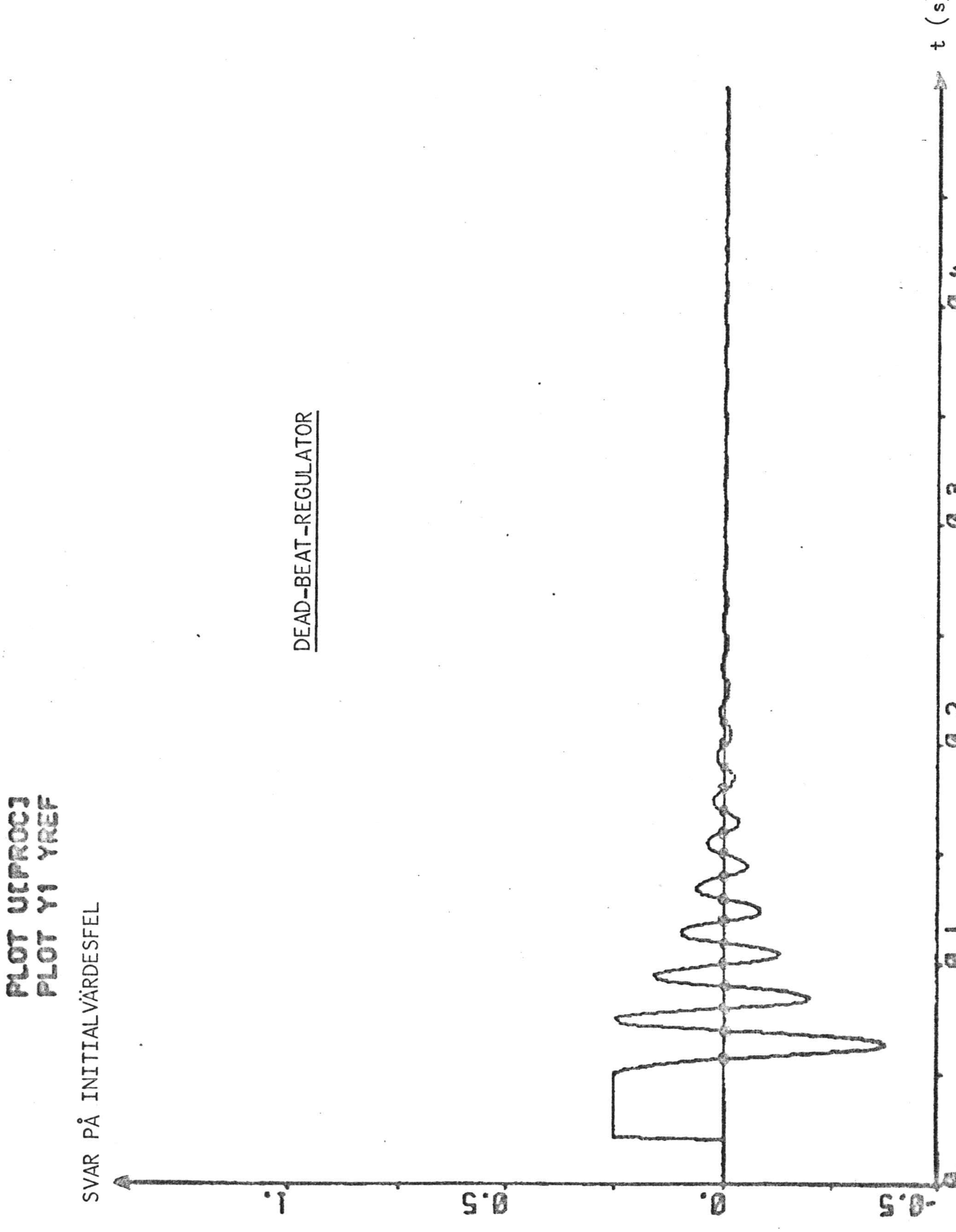


Fig 3.2.3



PLOT U[PROC]
PLOT Y1 YREF
SVAR PÅ INITIALVÄRDESFEL
DEAD-BEAT-REGULATOR
t (s)
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
-0.5
0.
0.5
1.

Fig 3.2.4

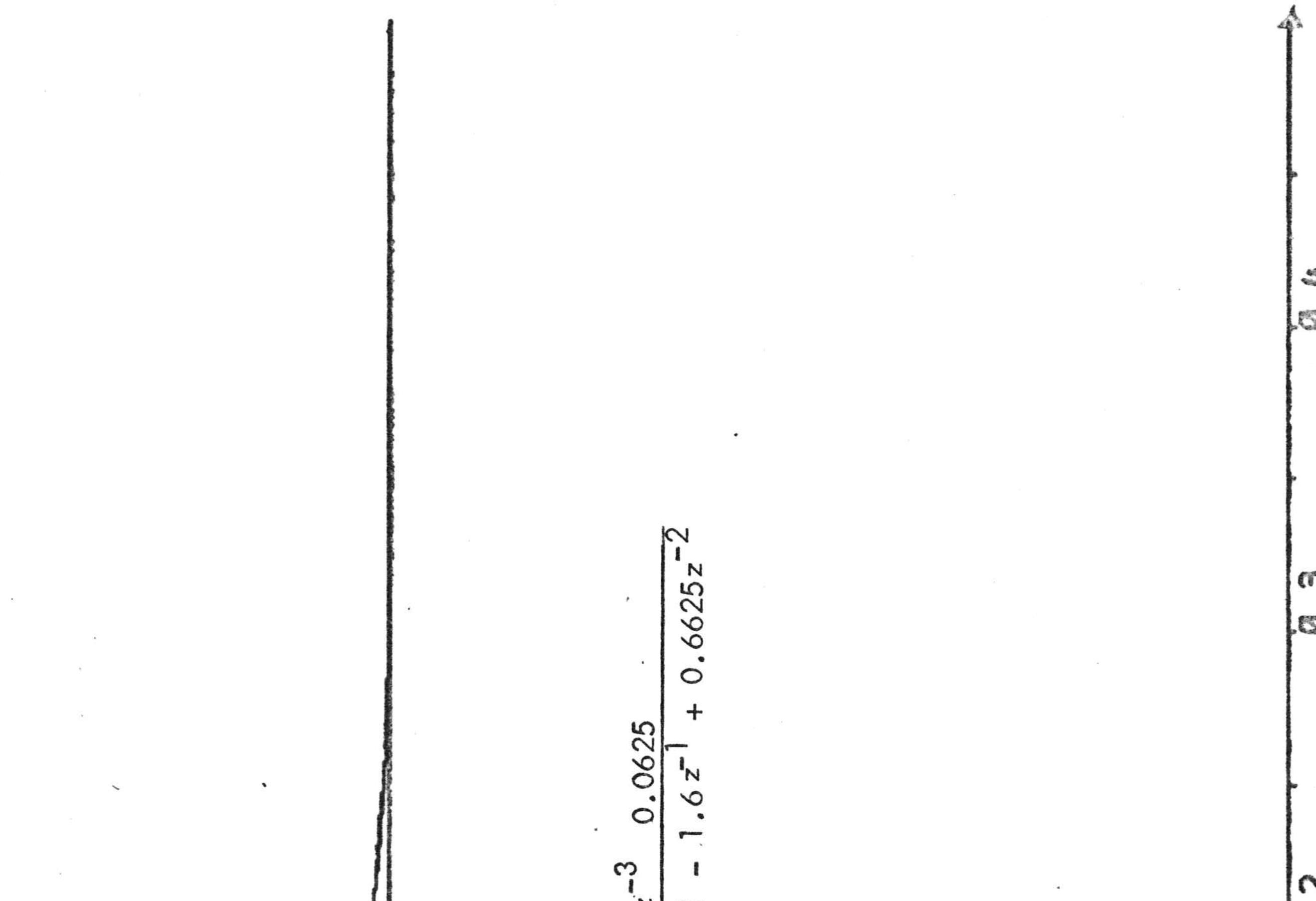

PLOT Y1
PLOT Y1 YREF
STEGSVAR
t (s)
1.
0.5
0.
-0.5
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
$M = \frac{z^{-3}\ 0.0625}{1 - 1.6z^{-1} + 0.6625z^{-2}}$

Fig 3.2.5

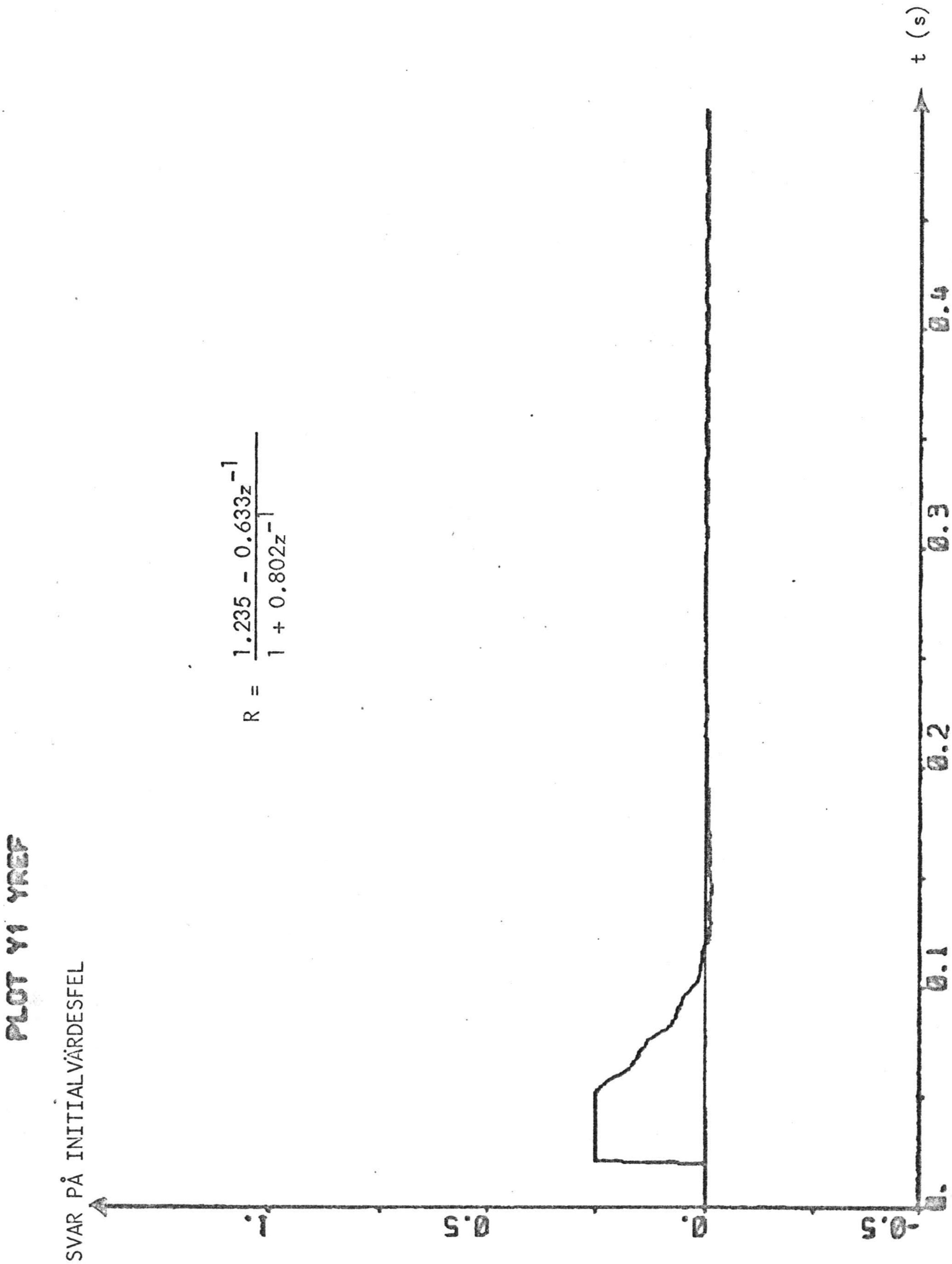

PLOT Y1 YREF
SVAR PÅ INITIALVÄRDESFEL
$R = \frac{1.235 - 0.633z^{-1}}{1 + 0.802z^{-1}}$
t (s)
1.
0.5
0.
-0.5
0.1
0.2
0.3
0.4

Fig 3.2.6

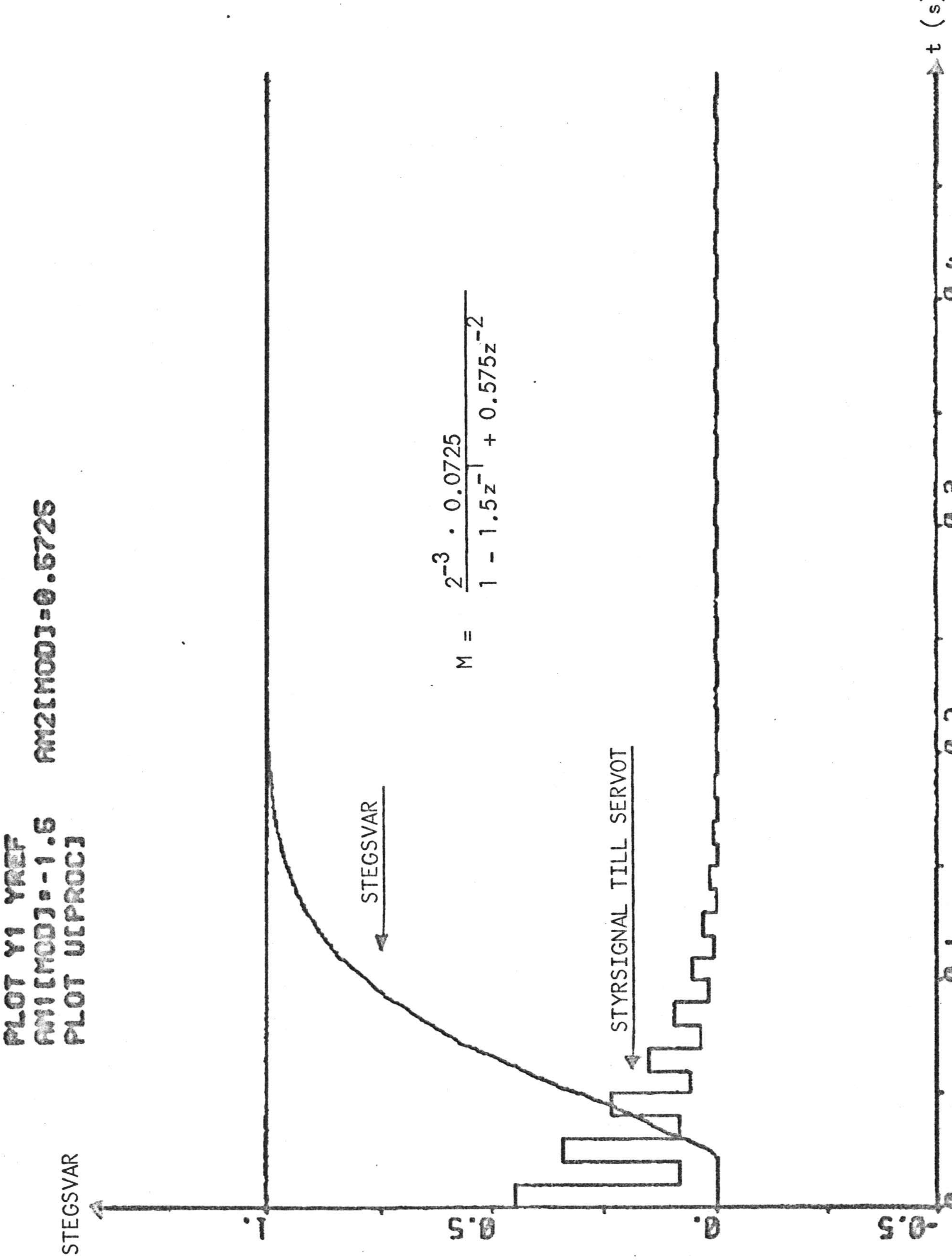

PLOT Y1 YREF
AM1[MOD]=-1.5
PLOT U[PROC]
AM2[MOD]=0.5725
STEGSVAR
STEGSVAR
STYRSIGNAL TILL SERVOT
$M = \frac{2^{-3} \cdot 0.0725}{1 - 1.5z^{-1} + 0.575z^{-2}}$
1.
0.5
0.
-0.5
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
t (s)

Fig 3.2.7

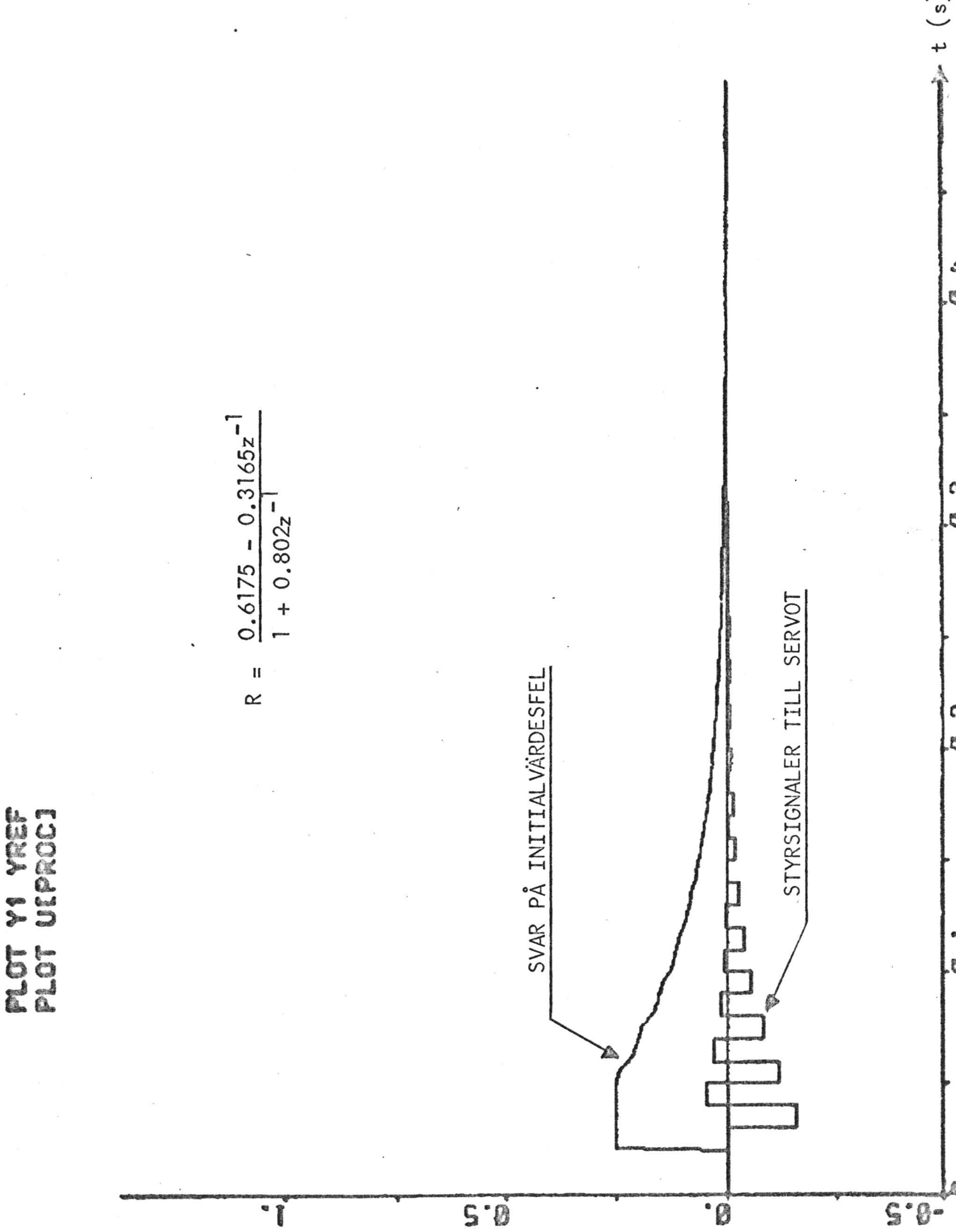

PLOT Y1 YREF
PLOT U[PROC]
$R = \frac{0.6175 - 0.3165z^{-1}}{1 + 0.802z^{-1}}$
SVAR PÅ INITIALVÄRDESFEL
STYRSIGNALER TILL SERVOT
t (s)
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
-0.5
0.
0.5
1.

Fig 3.2.8

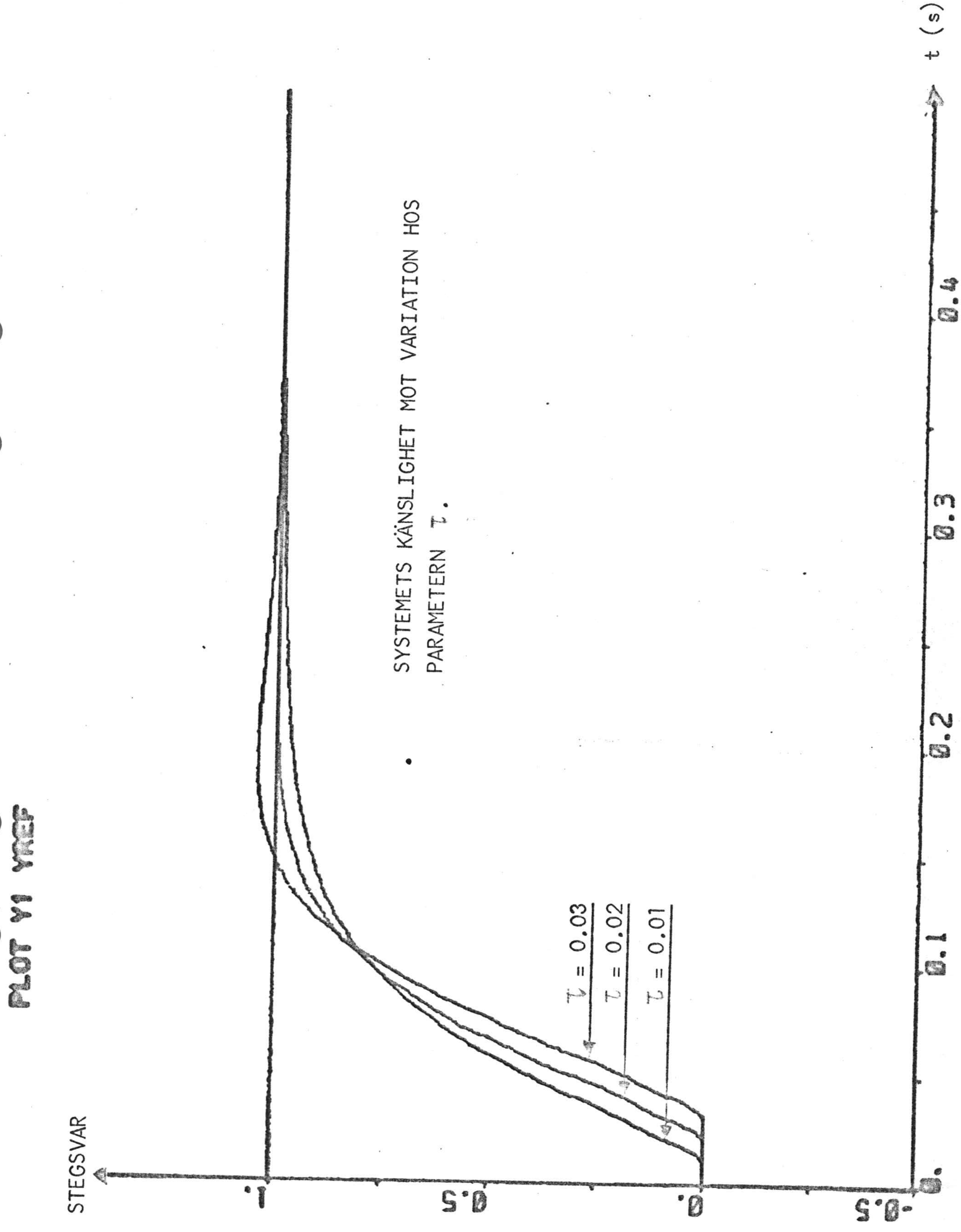

PLOT Y1 YREF
STEGSVAR
1.
0.5
0.
-0.5
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
t (s)
τ = 0.03
τ = 0.02
τ = 0.01
SYSTEMETS KÄNSLIGHET MOT VARIATION HOS
PARAMETERN τ.

Fig 3.2.9

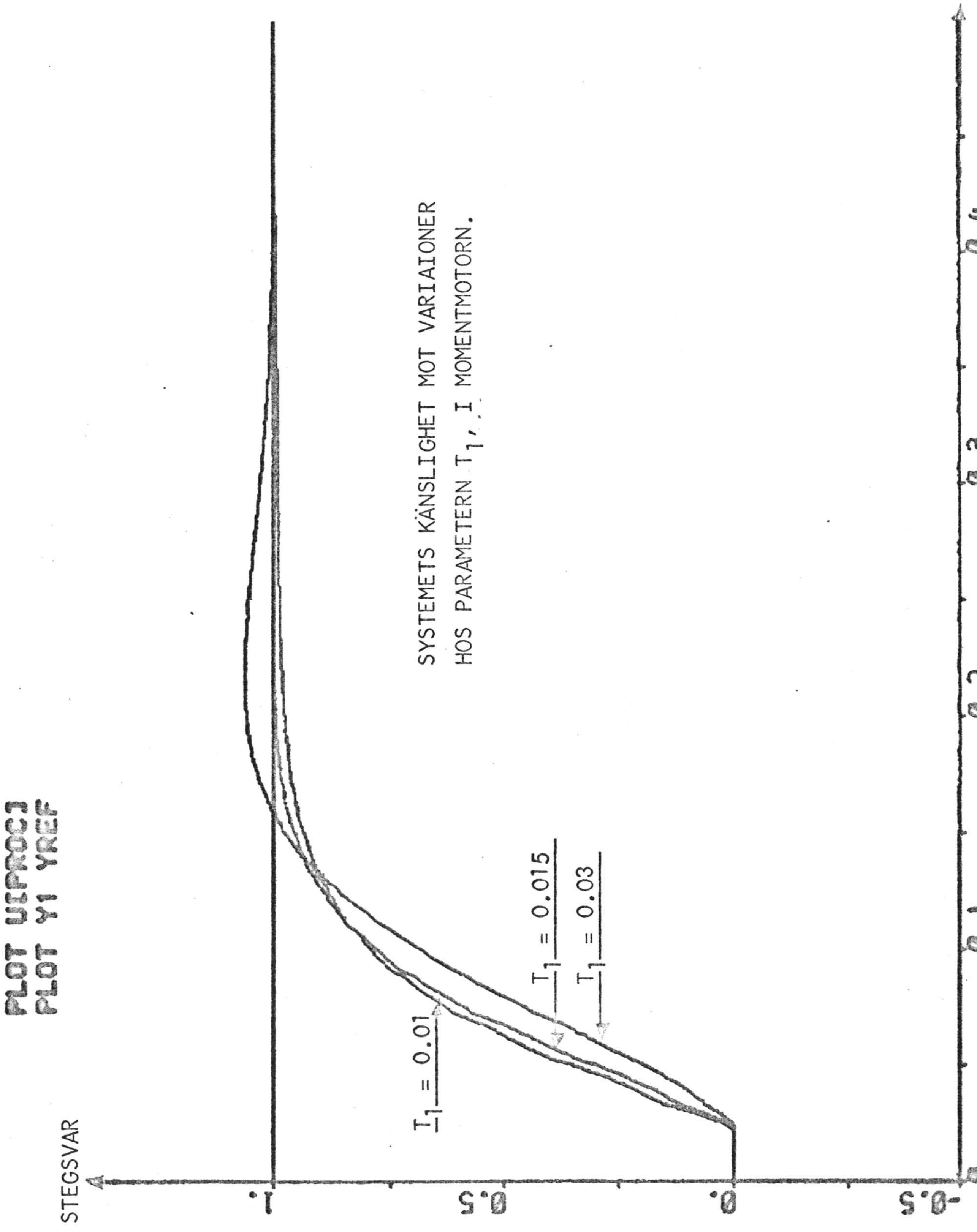
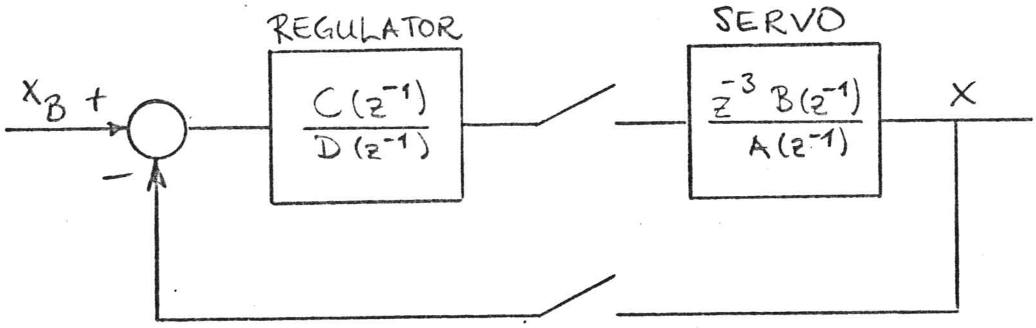

PLOT UIPROCJ
PLOT Y1 YREF
STEGSVAR
t (s)
1.
0.5
0.
-0.5
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
SYSTEMETS KÄNSLIGHET MOT VARIAIONER
HOS PARAMETERN T_1, I MOMENTMOTORN.
$T_1 = 0.01$
$T_1 = 0.015$
$T_1 = 0.03$

Fig 3.2.10

3.3 POLPLACERING GENOM DIREKT ÅTERKOPPLING.

Arbetsmetod

Systemet kan representeras enligt blockschema nedan.



$B(z^{-1}) = K\alpha\,(1 + \gamma z^{-1})$ $\quad K = 60$

$\alpha = 0.0027$

$\gamma = 0.801$

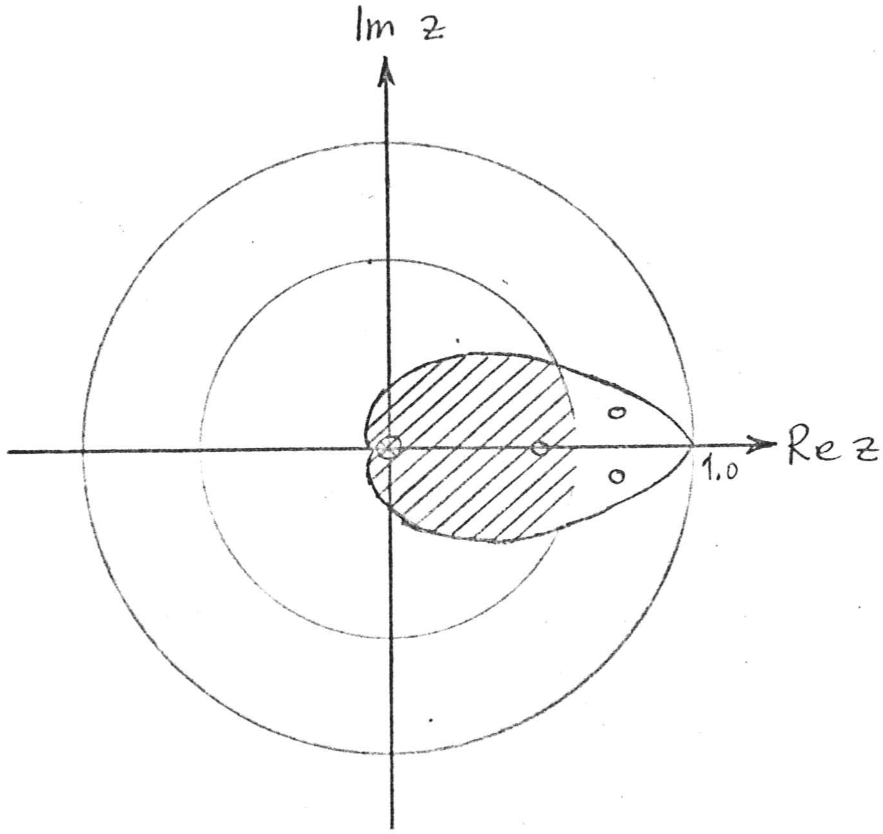
$A(z^{-1}) = (1 - z^{-1})\,(1 - \beta z^{-1})$ $\quad \beta = 0.513$

z^{-3} representerar fördröjningen och hållkretsen.
Det slutna systemets överföringsfunktion ges av

$$\frac{z^{-3} \cdot B\,(z^{-1}) \cdot C\,(z^{-1})}{A\,(z^{-1}) \cdot D\,(z^{-1}) + z^{-3} \cdot B\,(z^{-1}) \cdot C\,(z^{-1})}$$

Ansätt att systemets karakteristiska ekvation är $F\,(z^{-1})$, dvs $F\,(z^{-1}) = A\,(z^{-1})\,D\,(z^{-1}) + z^{-3}\,B\,(z^{-1})\,C\,(z^{-1})$. Nollställena till F-polynomet väljes sedan på ett sådant sätt att stegsvaret blir rippelfritt och översvängningsfritt samtidigt som önskad snabbhet erhålles.

Nollställena till F får ett gynnsamt läge ur stegsvarssynpunkt om ett komplext par av nollställen placeras inom det streckade området och om övriga nollställen ligger inom det heldragna området. Se fig 3.3.1.



Nollställena till kar ekv är markerade med cirklar.

I vårt fall är ordningen av A och B två respektive ett.
Om G och D är av ordningen ett resp tre då erhålles ett ekvationssystem så att vi kan bestämma de okända koefficienterna i C och D.

Antas följande ekvationer.

$$A\,(z^{-1}) = 1 + a_1\,z^{-1} + a_2\,z^{-2}$$

$$B\,(z^{-1}) = b_0 + b_1\,z^{-1}$$

$$C\,(z^{-1}) = c_0 + c_1\,z^{-1}$$

$$D\,(z^{-1}) = 1 + d_1\,z^{-1} + d_2\,z^{-2} + d_3\,z^{-3}$$

$$F\,(z^{-1}) = 1 + f_1\,z^{-1} + f_2\,z^{-1} + f_3\,z^{-3} + f_4\,z^{-4} + f_5\,z^{-5}$$

Genom identifiering av koeff. i sambandet $F\,(z^{-1}) = A\,(z^{-1})\,D\,(z^{-1}) + z^{-3}\,B\,(z^{-1})\,C\,(z^{-1})$ erhålles följande

$f_1 = d_1 + a_1$
$f_2 = a_2 + d_1\,a_1 + d_2$
$f_3 = d_3 + a_1\,d_2 + a_2\,d_1 + b_0\,c_0$
$f_4 = a_1\,d_3 + a_2\,d_2 + b_0\,c_1 + b_1\,C_0$
$f_5 = a_2\,d_3 + b_1\,c_1$

Valet av nollställen till F göres med hjälp av fig 3.1.
Systemet visar sig ha ett mycket bra uppförande om F väljes till

$$F\,(z^{-1}) = (1 - 1.5\,z^{-1} + 0.5725\,z^{-2})(1 - 0.5\,z^{-1}) =$$

$$= (1 - 2\,z^{-1} + 1.3225\,z^{-2} - 0.28625\,z^{-3})$$

Karakteristiska polynomet har en dubbelrot $z_{1,2} = 0.75 \pm i\,0.1$, en dubbelrot i origo samt en rot i $z = 0.5$ (se fig 3.3.1). Systemet får ett utmärkt uppförande med detta val av nollställen.

Testresultatet följer härefter och avslutas med en sammanfattning. Se fig 3.3.2 - 3.3.6.

Som synes i fig 3.3.2 har utsignalen ingen tendens till rippel. Styrsignalerna till servot är små, samt kraven på snabbhet och förstärkning är uppfyllda.

I fig 3.3.3 visas stegsvarets förändring då systemets förstärkning varieras. Utsignalerna är i alla fallen rippelfria.

Fig 3.3.4 och 3.3.5 samma som under punkt 3.1 och 3.2.

För denna regulator kan genomgående sägas att den ger en jämn (rippelfri) reglering av arean samt små styrsignaler till servot. Ur slitagesynpunkt är denna reglering utmärkt.

Övriga specifikationer är helt uppfyllda.

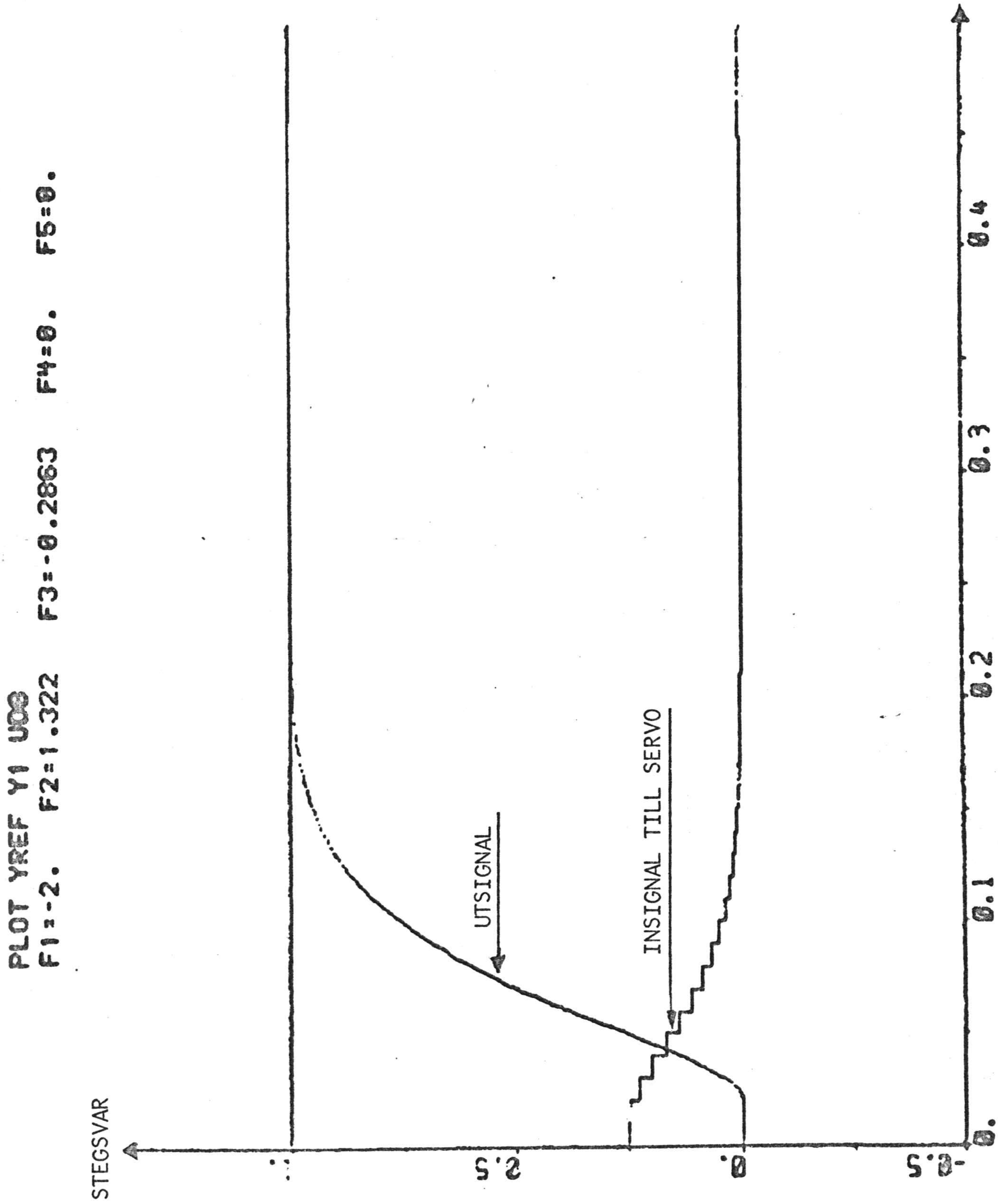

PLOT YREF Y1
F1=-2.   F2=1.322   F3=-0.2863   F4=0.   F5=0.
STEGSVAR
UTSIGNAL
INSIGNAL TILL SERVO
t (s)
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
-0.5

Fig 3.3.2

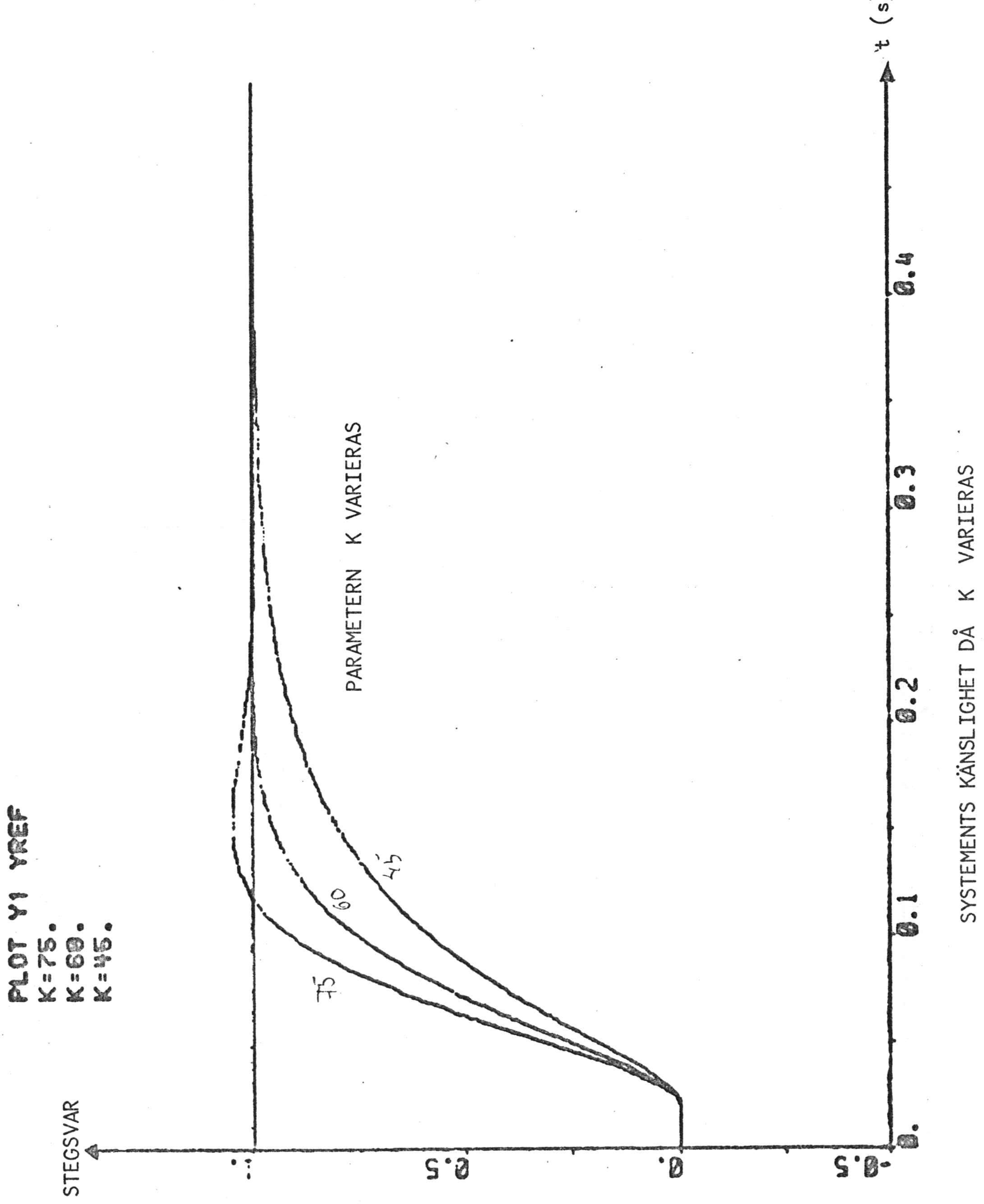
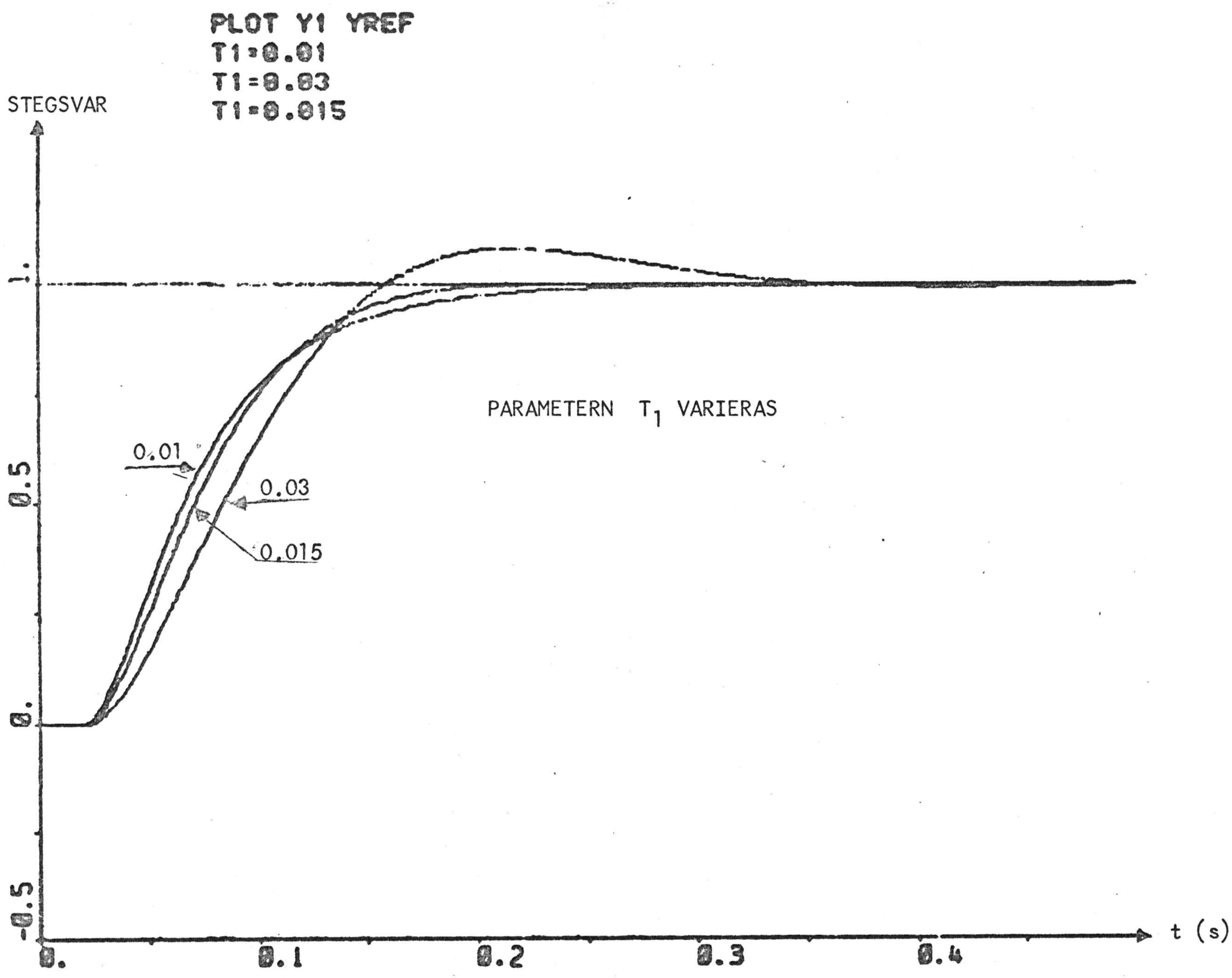
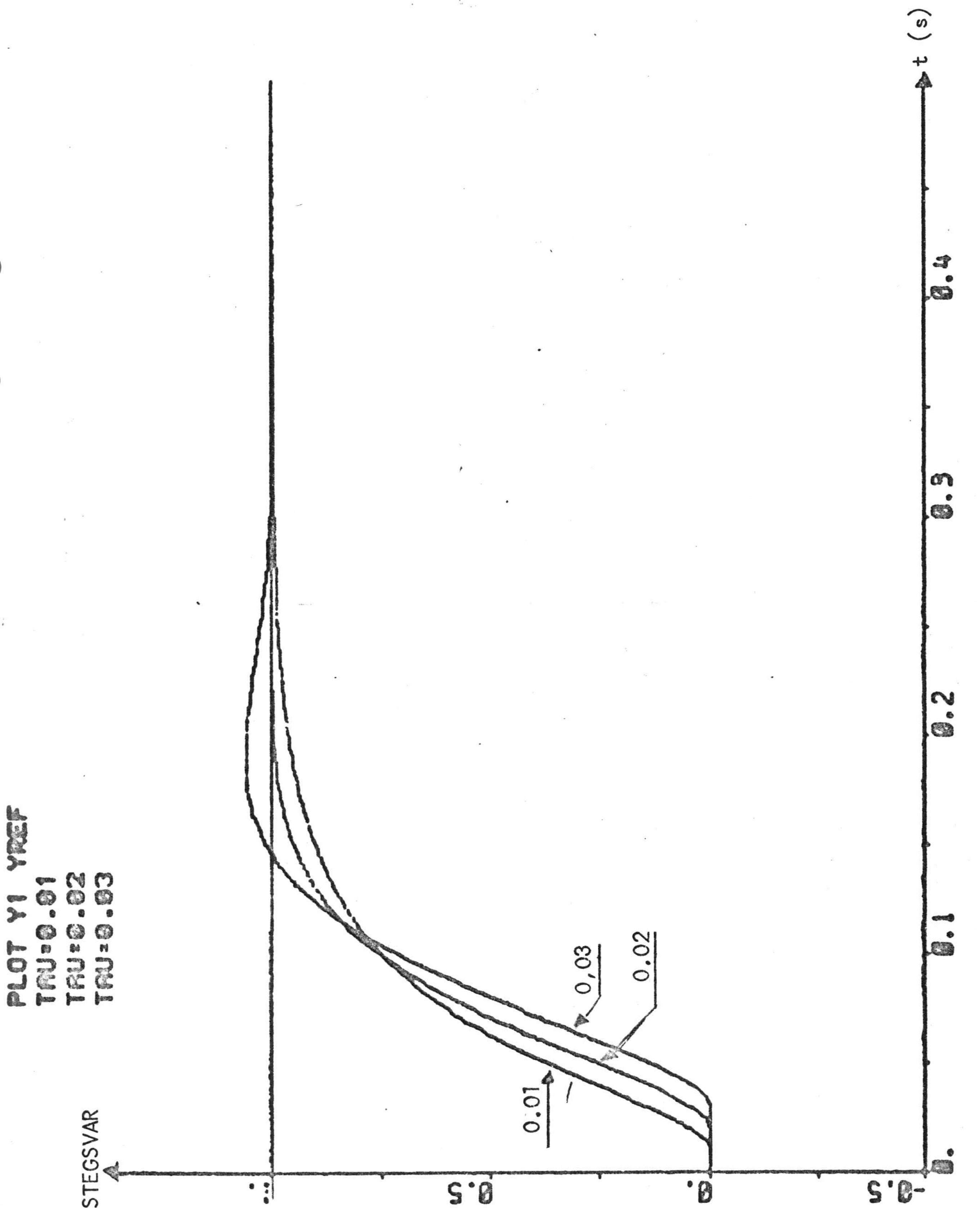

PLOT Y1 YREF
K=75.
K=60.
K=45.
STEGSVAR
1.
0.5
0.
-0.5
0.
0.1
0.2
0.3
0.4
t (s)
75
60
45
PARAMETERN K VARIERAS
SYSTEMENTS KÄNSLIGHET DÅ K VARIERAS

Fig 3.3.3



SYSTEMETS KÄNSLIGHET DÅ T_1 VARIERAS.

Fig 3.3.4



SYSTEMETS KÄNSLIGHET MOT VARIATION AV τ.

Fig 3.3.5

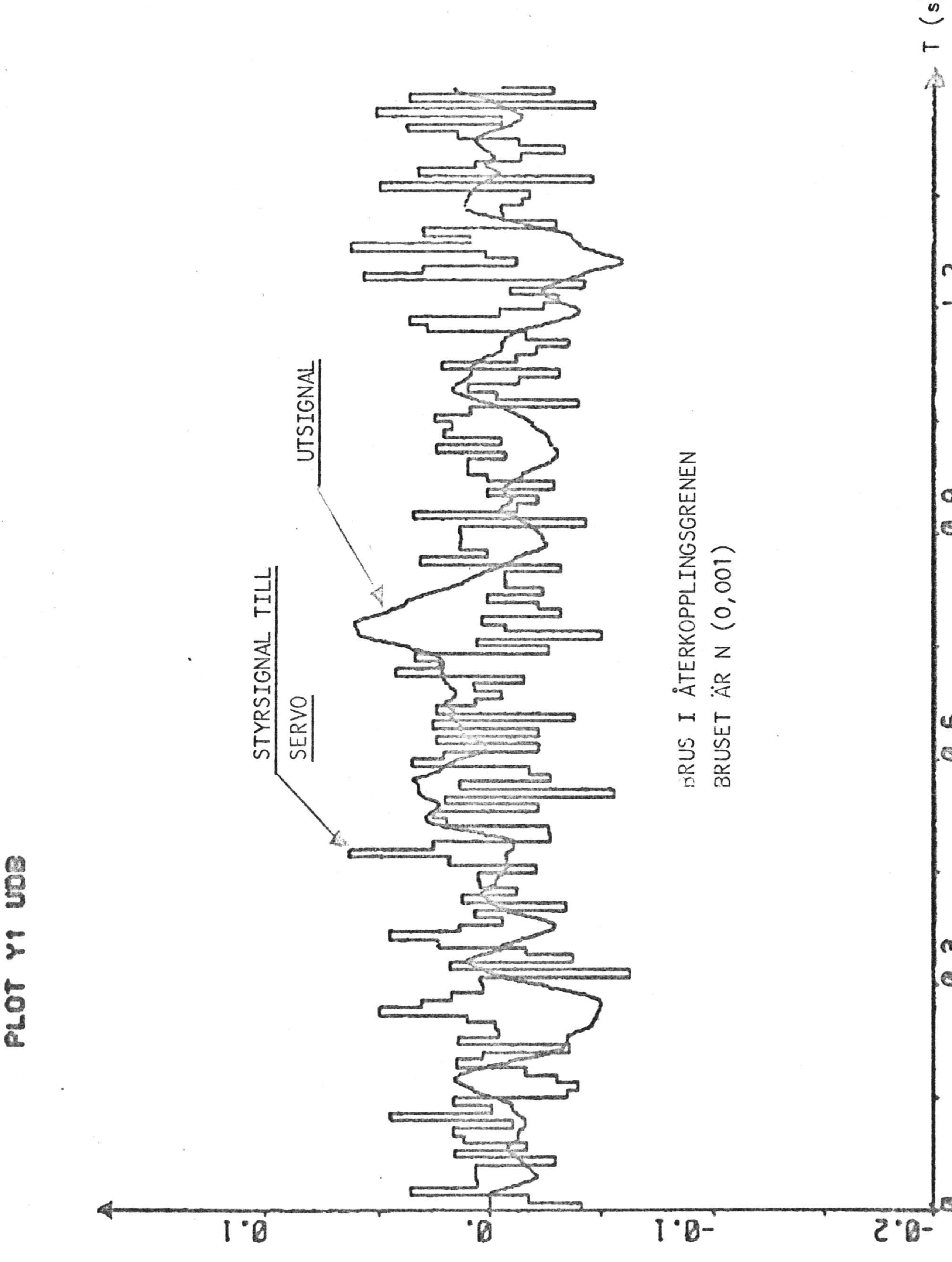

PLOT Y1 UDB
STYRSIGNAL TILL
SERVO
UTSIGNAL
BRUS I ÅTERKOPPLINGSGRENEN
BRUSET ÄR N (0,001)
T (s)
0.
0.3
0.6
0.9
1.2
0.1
0.
-0.1
-0.2

Fig 3.3.6

4. SAMMANFATTNING

Reglerprincipen, vilken presenteras i kap 3.1.1 ger överlag för stora styrsignaler till servot vilket medför att utsignalen ripplar.

Metoden i kap 3.2 uppfyller de specificerade kraven, men vissa programmeringsförändringar måste göras innan den kan användas.

Den sista metodens enkelhet och rika möjligheter att välja lämplig ordning på regulator måste särskilt framhållas. Med tanke på fortsatt utvecklingsarbete i samband med prov på motorn kommer metodens flexibilitet väl till pass. Ändringar som behöver göras är enkla att införa med hänsyn till programmet.

Som framgår i rapporten är regleringarna anpassade till en viss modell av servot, vilket kan komma att medföra att regleringen på det verkliga systemet ej uppfyller de specificerade kraven. Detta får till följd att om t ex metoden i kap 3.3 användes kommer både koefficienterna i polynomen C (z^{-1}) och D (z^{-1}) och ordningen på filtret att behöva ändras.

Avslutningsvis vill jag rikta ett varmt tack till mina handledare Gerry Örnberg och Björn Wittenmark, vilka båda på ett utmärkt sätt hjälp mig i mitt arbete.

5. REFERENSER

Huvudmaterialet till reglerschemat har erhållits från Volvo Flygmotor samt Moog Technical Bulletin 103.

Utförlig presentation av reglerprinciperna för samplade system ges i

K J Åström: Samplade system.

B Wittenmark: Design of a sampled data system.

Var polerna i enhetscirkeln skall placeras har hämtats ur

Ackermann: Abtast reglerung.

Simuleringen har gjorts vid LTH och simuleringsprogrammet som användes var

Simnon: Elmquist U: Simnon, User's Manual, Report 7502.

Programbeskrivning för areaservo

Areaservots struktur samt de i programmet använda beteckningarna för de olika signalerna presenteras i figuren B1-1.

Nedan följer en kort beskrivning av huvudprogrammet MAIN och subrutinerna, vilka finns utskrivna på sidorna 4-11.

Huvudprogrammet läser först in all indata, varefter subrutinen INITS anropas. INITS ger servoparametrarna korrekta startvärden. Därefter anropas subrutinen HEAIN, vilken redigerar och trycker ut indata. Sista delen av MAIN utför själva servoberäkningen.

BOX 1A2 representerar momentmotor, manövercylindrar och effekten av samplingen genom en nollte ordningens hållkrets (ZOH i figur B1-1).

BOX 3 utgör den i kapitel 3 beskrivna regulatorn, vilken kan vara av proportionell eller fasavancerande typ.

BOX 4 är den i kapitel 3 beskrivna Otto-Smith-regulatorn.

BOX 12 generar störsignaler som kan adderas till den "mätta" signalen ACT (manövercylindrarnas läge).

BOX 13 är en flödesbegränsare, vilken definerar manövercylindrarnas maximala hastighet.

BOX 14 simulerar de mekaniska stoppen för manövercylindrarna.

Subrutinen PRINT trycker ut resultatet från servoberäkningarna.

Vid varje anrop av en BOX lagras in- och utsignaler i speciella fält FO, FIO eller FRO beroende på vilket gradtal överföringsfunktionen har. Efter varje genomförd servoberäkning skiftas signalerna ett steg av subrutinen ROTATE, så att signalerna ligger rätt i tiden då nästa beräkningsvarv startar.

Varje BOX:s överföringsfunktion är given på följande form.

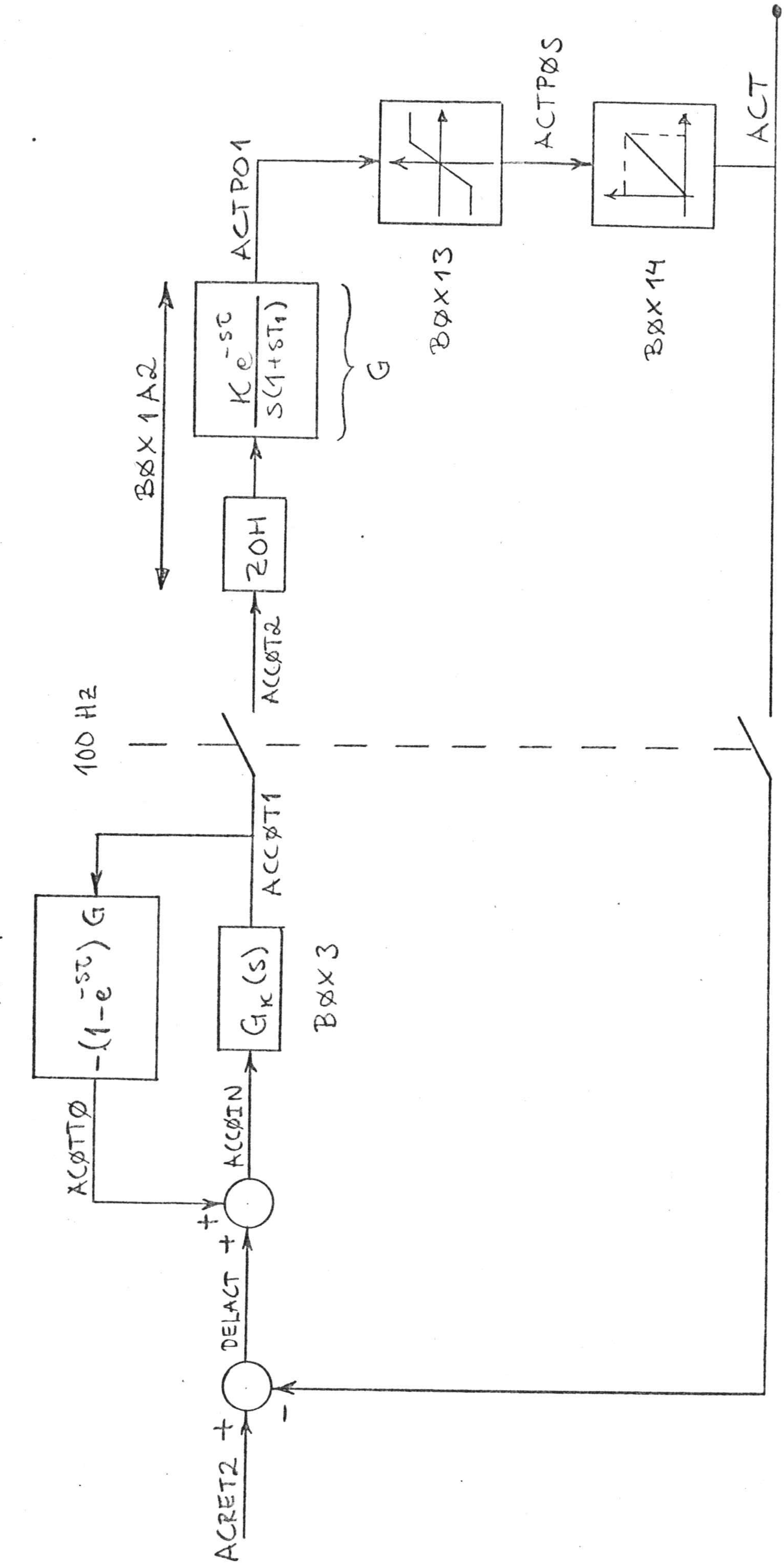
BOX 3 $\quad X(z) \longrightarrow \boxed{G_K(z)} \longrightarrow y(z)$

$$y(z) \doteq G_K(z) \cdot X(z) = \frac{b_o + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4}}$$

I tidplanet

$$\begin{aligned} y(t) = {} & b_o x(t) + b_1 x(t-T) + b_2 x(t-2T) + b_3 x(t-3T) + \\ & + b_4 x(t-4T) - a_1 y(t-T) - a_2 y(t-2T) - a_3 y(t-3T) - \\ & - a_4 y(t-4T) \end{aligned}$$

VOLVO
FLYGMOTOR



Figur B1-1

```
TTEXT.TA186A.COMMON/
DATE: 75.12.10    INPUT MEDIUM: CARD
          COMMON /FOC/ FO(200,6)
          COMMON /FRO/ FRO(50,10)
          COMMON /FIO/ FIO(50,12)
          COMMON /VARS/    DELACT,ACCOIN,ACOTTO,ACCOT1,ACCOT2,ACTPO1,ACTPOS,
         1ACT,ACTDIS,ACTRES,XBOR,TIME,AMPACT
          COMMON /PROCON/ DT,ISS,IBAL,ICCON,IRFSET,IUPDAT
          COMMON /ARRS/ A12(5),B12(5),A3(5),B3(5),A4(6),B4(6),SPROF(100),
         1TEXT(12)
          COMMON /IVARS/ NX
```

```
TTEXT.TA186A.DEL1/
DATE: 75.12.10    INPUT MEDIUM: CARD
C
C      MAIN
       PROGRAM MAIN(CRD=5,LPO=6)
C      DEL UR ERK-REGLERING TILL DYNAMISK SIMULATOR
C
C         THOC OUTPUT          FROC OUTPUT        FIOC OUTPUT
C                              +0 - ACTPO1        +0 - ACOTTO
C                              +1 - ACCOT1        +1
C                              +2 -               +2
C                              +3                 +3
C                              +4
C                              +5
C                              +6
C                              +7
C                              +8
C                              +9
C                              +10
C                              +11
C                              +12
C
C         FOC OUTPUT
C         +37-ACTPOS
C
       INTEGER IFEL
       REAL BOX3,BOX4,BOX1A2,BOX12,BOX13,BOX14
       DIMENSION DAT(10)
       DATA FLOWL/11.8/,PISTL/5.78/,ICFRO/1/,ICFIO/1/,ICFO/1/
*COPY  COMMON
       READ(5,520) (TEXT(I),I=1,12)
       WHILE (.NOT. EOF(5)) DO
          READ(5,510)  AMPACT
          READ(5,510)  (A12(I),I=1,5)
          READ(5,510)  (B12(I),I=1,5)
          READ(5,510)  (A3(I),I=1,5)
          READ(5,510)  (B3(I),I=1,5)
          READ(5,510)  (A4(I),I=1,6)
          READ(5,510)  (B4(I),I=1,6)
```

```
            READ(5,520)  SPROF(1)
            READ(5,510)  SPROF(2)
            READ(5,510)  SPROF(3)
            NX = IFIX(SPROF(3))
            SPROF(4) = 0.0
            NT = NX+NX
            DO 10 I=1,NT
               READ(5,510)  SPROF(I+4)
    10      CONTINUE
            CALL INITS
            CALL HEAIN
            ITERATE UNTIL(TIME.GT.SPROF(NX+4)+1.0E-6)
               CALL UNBAR(SPROF,1,TIME,0.0,XBOR,IFEL)
               ACTPO1 = BOX1A2(ICFRO   ,ACCOT2,A12,B12)
               ACTPOS = BOX13(ICFO+37,ACTPO1,FLOWL)
               ACT = BOX14(0,ACTPOS,PISTL)
               ACTDIS = BOX12(0,AMPACT)
               ACTRES = ACT+ACTDIS
               DELACT = XBOR-ACTRES
               ACOTTO = BOX4(ICFIO   ,ACCOT1,A4,B4)
               ACCOIN = DELACT+ACOTTO
               ACCOT1 = BOX3(ICFRO+1,ACCOIN,A3,B3)
               FIO(ICFIO,1) = ACCOT1
               FRO(ICFRO,1) = ACCOT1
               ACCOT2 = ACCOT1
               CALL PRINT
               CALL ROTATE(ICFRO+1,10,FRO,50)
               CALL ROTATE(ICFIO,12,FIO,50)
               CALL ROTATE(ICFRO,10,FRO,50)
               FO(ICFO+37,5) = ACTPOS
               TIME = TIME+DT
            ENDITER
            READ(5,520) (TEXT(I),I=1,12)
         ENDDO
         CALL TERMIN
    510  FORMAT(8F10.0)
    520  FORMAT(12A6)
         END
    C
    C
    C
```

```
      FUNCTION BOX1A2(IND,X,A,B)
      DIMENSION A(5),B(5)
*COPY COMMON
C
C     IF(ISS.EQ.0) THEN "TRANSIENT" ELSE "STEADY-STATE"
C
      IF(ISS.EQ.0) THEN
         Y = (B(1)*X+B(2)*FRO(IND,2)+B(3)*FRO(IND,3)+B(4)*FRO(IND,4)+
     1   B(5)*FRO(IND,5)-A(2)*FRO(IND,7)-A(3)*FRO(IND,8)-A(4)*FRO(IND,9)
     2   -A(5)*FRO(IND,10))/A(1)
         IF(ABS(Y).LT.1.0E-10) Y= 0.0
         FRO(IND,1) = X
         FRO(IND,6) = Y
      ELSE
         Y = X
         IF (ABS(Y).LT.1.0E-10) Y = 0.0
         DO 10 I=1,10
            FRO(IND,I) = Y
10       CONTINUE
      ENDIF
      BOX1A2 = Y
      RETURN
      END
C
C
C
      FUNCTION BOX3(IND,X,A,B)
      DIMENSION A(5),B(5)
*COPY COMMON
      IF(ISS.EQ.0) THEN
         Y = (B(1)*X+B(2)*FRO(IND,2)+B(3)*FRO(IND,3)+B(4)*FRO(IND,4)+
     1   B(5)*FRO(IND,5)-A(2)*FRO(IND,7)-A(3)*FRO(IND,8)-A(4)*FRO(IND,9)
     2   -A(5)*FRO(IND,10))/A(1)
         IF(ABS(Y).LT.1.0E-10) Y = 0.0
         FRO(IND,1) = X
         FRO(IND,6) = Y
      ELSE
         Y = X
         IF(ABS(Y).LT.1.0E-10) Y = 0.0
         DO 10 I=1,10
            FRO(IND,I) = Y
```

```
 10         CONTINUE
         ENDIF
         BOX3 = Y
         RETURN
         END
 C
 C
 C
         FUNCTION BOX4(IND,X,A,B)
         DIMENSION A(6),B(6)
 *COPY   COMMON
         IF(ISS.EQ.0) THEN
            Y = (-A(2)*FIO(IND,8)-A(3)*FIO(IND,9)-A(4)*FIO(IND,10)-
      1     A(5)*FIO(IND,11)-A(6)*FIO(IND,12)+B(1)*X+
      2     B(2)*FIO(IND,2)+B(3)*FIO(IND,3)+B(4)*FIO(IND,4)+B(5)*FIO(IND,5)
      3     +B(6)*FIO(IND,6))/A(1)
            IF(ABS(Y).LT.1.0E-10) Y = 0.0
            FIO(IND,1) = X
            FIO(IND,7) = Y
         ELSE
            Y = X
            IF(ABS(Y).LT.1.0E-10) Y = 0.0
            DO 10 I=1,12
               FIO(IND,I) = Y
 10         CONTINUE
         ENDIF
         BOX4= Y
         RETURN
         END
 C
 C
 C
         FUNCTION BOX12(IND,AMP)
 *COPY   COMMON
         REAL RANDOM
         SLUMP = RANDOM(0.0,3.14159265/DT)
         BOX12 = AMP*SIN(SLUMP*DT)
         RETURN
         END
 C
 C
```

```
C
      FUNCTION BOX13(IND,Y,XLIM)
*COPY COMMON
      YF = FO(IND,5)
      YN = Y
      IF(ABS((Y-YF)/DT).GT.XLIM) THEN
         YN = YF+SIGN(1.0,Y-YF)*XLIM*DT
      ENDIF
      IF(ABS(YN).LT.1.0E-10) YN = 0.0
      BOX13 = YN
      FO(IND,4) = YN
      RETURN
      END
C
C
C
      FUNCTION BOX14(IND,X,XLIM)
      IF(X.GT.XLIM) THEN
         BOX14 = XLIM
      ELSE
         BOX14 = X
      ENDIF
      RETURN
      END
C
C
C
      SUBROUTINE HEAIN
*COPY COMMON
      DIMENSION XNAME(20),YV(50)
      DATA XNAME/6HAMPACT,6HA12   ,6HA3    ,6HA4    ,6HB12   ,6HB3    ,
     1           6HB4    ,6HSPROF ,6HTIME  ,6HXBOR  ,6HACTRES,6HDELACT,
     2          6HACCOIN,6HACOTTO,6HACCOT1,6HACCOT2,6HACTPO1,6HACTPOS,
     3          6HACT   ,6HACTDIS/
      CALL RUBRIK(6HTA186A,777)
      WRITE(6,6010) (TEXT(I),I=1,12)
      WRITE(6,6020)
      WRITE(6,6030) XNAME(1),AMPACT
      WRITE(6,6030) XNAME(2),A12
      WRITE(6,6030) XNAME(5),B12
      WRITE(6,6030) XNAME(3),A3
```

```
       WRITE(6,6030) XNAME(6),B3
       WRITE(6,6030) XNAME(4),A4
       WRITE(6,6030) XNAME(7),B4
       WRITE(6,6040) XNAME(8),(SPROF(I),I=1,3)
       WRITE(6,6050) (SPROF(I+4),I=1,NX)
       DO 10 I=1,NX
          I1 = I+4+NX
          YV(I) = SPROF(I1)
10     CONTINUE
       WRITE(6,6050) (YV(I),I=1,NX)
       WRITE(6,6060)
       WRITE(6,6070) (XNAME(I),I=9,20)
6010   FORMAT(1H0,12A6)
6020   FORMAT(1H0,6HINDATA)
6030   FORMAT(1H0,5X,A6,1H=,8(3X,F10.6))
6040   FORMAT(1H0,5X,A6,1H=,3X,A6,2(3X,I2))
6050   FORMAT(1H0,12X,8(3X,F10.6))
6060   FORMAT(1H0,8HRESULTAT)
6070   FORMAT(1H0,12(2X,A6,2X))
       RETURN
       END
C
C
C
       SUBROUTINE INITS
*COPY  COMMON
       DT = 0.01
       TIME = 0.0
       ACCOT2 = 0.0
       ACCOT1 = 0.0
       ISS = 0
       DO 10 I=1,2
          DO 15 J=1,10
             FRO(I,J) = 0.0
             FIO(I,J) = 0.0
15        CONTINUE
          FIO(I,11) = 0.0
          FIO(I,12) = 0.0
10     CONTINUE
       DO 20 J=1,6
          FO(38,J) = 0.0
```

```
 20     CONTINUE
        RETURN
        END
C
C
C
        SUBROUTINE PRINT
*COPY COMMON
        WRITE(6,6010) TIME,XBOR,ACTRES,DELACT,ACCOIN,ACOTTO,ACCOT1,ACCOT2,
       1ACTPO1,ACTPOS,ACT,ACTDIS
 6010   FORMAT(1H ,12F10.6)
        RETURN
        END
C
C
C
        SUBROUTINE ROTATE(IND,NS,A,N)
        DIMENSION A(N,1)
        IL = NS/2-1
        DO 10 I=1,IL
           IS = IL+2-I
           A(IND,IS) = A(IND,IS-1)
 10     CONTINUE
        DO 20 I=1,IL
           IS = NS+1-I
           A(IND,IS) = A(IND,IS-1)
 20     CONTINUE
        RETURN
        END
C
C
C
        SUBROUTINE TERMIN
        I = 0
        RETURN
        END
```

Indata till programmet

Indata till areaservoprogrammet består av fyra delar.

1. Rubrik
2. Störsignalens amplitud
3. a- och b-koefficienterna för BOX1A2, BOX3 och BOX4 (se bilaga 1)
4. Insignalen till servot

Nedan följer en beskrivning av punkterna 3 och 4 och till sist presenteras ett exempel på hur indata specificeras på hålkort för programmet.

De a- och b-koefficienterna som definieras i bilaga 1 har ett något annorlunda beteckningssätt i programmet. Så benämnes exempelvis a_i-koefficienterna för BOX1A2 A12 (i) och b_i-koefficienterna för BOX3 B3 (i).

BOX1A2

Laplacetransform $\quad \dfrac{1 - e^{-sT}}{s} \cdot \dfrac{K}{s\,(1+sT_1)} \cdot e^{-s}$

z-transformen $\quad z^{-2}\,\dfrac{K\alpha\,(z+\gamma)}{(z-1)\,(z-\beta)} = \dfrac{K\alpha\, z^{-3} + K\alpha\gamma\, z^{-4}}{1-(1+\beta)\, z^{-1} + \beta\, z^{-2}}$

B12 (1) = B12 (2) = B12 (3) = 0.0

B12 (4) = $K\alpha$ = 0.162

B12 (5) = $K\alpha\gamma$ = 0.130

A12 (1) = 1.0

A12 (2) = -1.513

A12 (3) = 0.513

A12 (4) = A12 (5) = 0

BOX3

Proportionell kompensering

$$G_K(z) = 0.25$$

B3 (1) = 0.25

B3 (2) = B3 (3) = B3 (4) = B3 (5) = 0.0

A3 (1) = 1.0

A3 (2) = A3 (3) = A3 (4) = A3 (5) = 0.0

Fasavancerande kompensering

$$G_K(z) = \frac{1.235 - 0.633\ z^{-1}}{1 + 0.802\ z^{-1}} \quad \text{(nominellt filter)}$$

B3 (1) = 1.235

B3 (2) = -0.633

B3 (3) = B3 (4) = B3 (5) = 0.0

A3 (1) = 1.0

A3 (2) = 0.802

A3 (3) = A3 (4) = A3 (5) = 0.0

Uppsnabbat system

$$G_K(z) = \frac{2.037 - 1.045\ z^{-1}}{1 + 0.802\ z^{-1}}$$

Regulator till "feedback control" enligt kap 3.3

BOX4 blockeras dvs B4 (i) = 0, A4 (1) = 1, A4 (i) = 0 ($i \neq 1$)

$$G_K(z) = \frac{0.2501 - 0.1275\ z^{-1}}{1 - 0.487\ z^{-1} + 0.0722\ z^{-2} + 0.0323\ z^{-3}}$$

B3 (1) = 0.2501

B3 (2)=-0.1275

B3 (3)=B3 (4) = B3 (5) = 0.0

A3 (1) = 1.0

A3 (2) = -0.487

A3 (3) = 0.0722

A3 (4) = 0.0323

A3 (5) = 0.0

Dead-beat regulator anpassat för steg

BOX4 blockeras.

$$G_K(z) = \frac{6.173 - 3.167\ z^{-1}}{1 + 1.801\ z^{-1} + 1.801\ z^{-2} + 0.801\ z^{-3}}$$

B3 (1) = 6.173

B3 (2) = -3.167

B3 (3)=B3 (4) = B3 (5) = 0.0

A3 (1) = 1.0

A3 (2) = 1.801

A3 (3) = 1.801

A3 (4) = 0.801

A3 (5) = 0.0

Dead-beat regulator anpassad för ramp

BOX4 blockeras.

$$G_K(z) = \frac{12.346 - 12.506z^{-1} + 3.167\ z^{-2}}{1 + 1.801\ z^{-1} + 1.801\ z^{-2} - 0.199\ z^{-3} - 0.801\ z^{-4}}$$

B3 (1) = 12.346

B3 (2) = -12.506

B3 (3) = 1.167

B3 (4) = B3 (5) = 0.0

A3 (1) = 1.0

A3 (2) = 1.801

A3 (3) = 1.801

A3 (4) = -0.199

A3 (5) = -0.801

BOX4

Laplacetransform $\quad - (1 - e^{-s}) \, G(s)$

z-transform $\quad - (1 - z^{-2}) \cdot \dfrac{K\alpha\,(z+\gamma)}{(z-1)\,(z-\beta)} =$

$$\frac{-K\alpha z^{-1} - K\alpha(1+\gamma)\, z^{-2} - K\alpha\gamma\, z^{-3}}{1 - \beta z^{-1}}$$

B4 (1) = 0

B4 (2) = $-K\alpha$ = -0.162

B4 (3) = $-K\alpha\,(1+\gamma)$ = -0.292

B4 (4) = $-K\alpha\gamma$ = -0.130

B4 (5) = B4 (6) = 0

A4 (1) = 1.0

A4 (2) = $-\beta$ = -0.513

A4 (3) = A4 (4) = A4 (5) = A4 (6) = 0

Specificering av insignal

Insignalens utseende kan defineras fritt genom att välja brytpunkter i tiden med tillhörande värden på insignalen. Interpolationsgrad samt antalet brytpunkter skall också anges.

Nedan följer ett exempel på hur indata specificeras på hålkort vid en körning av areaservoprogrammet.

SFORTRANBLANKETT

311-5066 75x50 TROLLHÄTTANS GRAFISKA AB

VOLVO FLYGMOTOR

FORTRAN CODE
bokstaven O = Ø
siffran noll = O
bokstaven I = I
siffran ett = 1
bokstaven Z = Ƶ

Program	Datum	Bladnr ( )
Programmerare (Avd, namn, tfn, sign)	Konto	Identifikation 73–80

C FOR COMMENT — STATEMENT NUMBER 1–5 — Cont. 6 — SFØRTRAN STATEMENT 7–72 — 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 = BLOCK DEPTH

```
FASAVANCERANDE KØMPENSERING+ØTTØ-SMITH REGULATØR.RAMPSVAR

0.0

1.0       -1.513    0.513     0.0       0.0

0.0       0.0       0.0       0.162     0.130

1.0       0.797     0.0       0.0       0.0

3.086     -1.29     0.0       0.0       0.0

1.0       -0.513    0.0       0.0       0.0       0.0

0.0       -0.162    -0.292    -0.130    0.0       0.0

RAMP

1.0
```

SFORTRANBLANKETT

311-5066 75x50 TROLLHÄTTANS GRAFISKA AB

FORTRAN CODE
bokstaven O = Ø
siffran noll = O
bokstaven I = I
siffran ett = 1
bokstaven Z = Ƶ

VOLVO FLYGMOTOR

Program

Programmerare (Avd, namn, tfn, sign)

Datum

Konto

Bladnr ( )

Identifikation

73 80

C FOR COMMENT

STATEMENT NUMBER | Cont. | 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 = BLOCK DEPTH

SFØRTRAN STATEMENT

1 5 6 7 10 13 16 19 22 25 28 31 34 37 40 43 46 49 52 55 58 61 64 67 70 72

2.0

0.0

0.35

0.0

0.35

Bil 3
1 (2)

VOLVO FLYGMOTOR TROLLHÄTTAN
TA186A KÖRD I D23 ONSDAG 1976-01-28 KLOCKAN 16,16,41

FASAVANCERANDE KOMPENSERING+OTTO-SMITH REGULATOR,RAMPSVAR

INDATA

AMPACT=	0,000000					
A12 =	1,000000	-1,513000	0,513000	0,000000	0,000000	
B12 =	0,000000	0,000000	0,000000	0,162000	0,130000	
A3 =	1,000000	0,797000	0,000000	0,000000	0,000000	
B3 =	3,086000	-1,290000	0,000000	0,000000	0,000000	
A4 =	1,000000	-0,513000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
B4 =	0,000000	-0,162000	-0,292000	-0,130000	0,000000	0,000000
SPROF =	RAMP 1	2				
	0,000000	0,350000				
	0,000000	0,350000				

RESULTAT

TIME	XBOR	ACTRES	DELACT	ACCOIN	ACOTTO	ACCOT1	ACCOT2	ACTPO1	ACTPOS	ACT	ACT
0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000-	0,0
0,010000	0,010000	0,000000	0,010000	0,010000	0,000000	0,030860	0,030860	0,000000	0,000000	0,000000-	0,0
0,020000	0,020000	0,000000	0,020000	0,015001	-0,004999	0,008797	0,008797	0,000000	0,000000	0,000000-	0,0
0,030000	0,030000	0,000000	0,030000	0,016999	-0,013001	0,026098	0,026098	0,000000	0,000000	0,000000-	0,0
0,040000	0,040000	0,004999	0,035001	0,017523	-0,017478	0,011347	0,011347	0,004999	0,004999	0,004999	0,0
0,050000	0,050000	0,013001	0,036999	0,017431	-0,019568	0,022143	0,022143	0,013001	0,013001	0,013001	0,0
0,060000	0,060000	0,022477	0,037523	0,017191	-0,020332	0,012918	0,012918	0,022477	0,022477	0,022477	0,0
0,070000	0,070000	0,032569	0,037431	0,016967	-0,020464	0,019887	0,019887	0,032569	0,032569	0,032569	0,0
0,080000	0,080000	0,042809	0,037191	0,016621	-0,020370	0,014171	0,014171	0,042809	0,042809	0,042809	0,0
0,090000	0,090000	0,053033	0,036967	0,016735	-0,020232	0,018650	0,018650	0,053033	0,053033	0,053033	0,0
0,100000	0,100000	0,063179	0,036821	0,016697	-0,020124	0,015075	0,015075	0,063179	0,063179	0,063179	0,0
0,110000	0,110000	0,073265	0,036735	0,016681	-0,020054	0,017923	0,017923	0,073265	0,073265	0,073265	0,0
0,120000	0,120000	0,083303	0,036697	0,016679	-0,020018	0,015669	0,015669	0,083303	0,083303	0,083303	0,0

0,130000	0,130000	0,093319	0,036681	0,016680	-0,020001	0,017470	0,017470	0,093319	0,093319	0,093319	0,0
0,140000	0,140000	0,103321	0,036679	0,016683	-0,019996	0,016044	0,016044	0,103321	0,103321	0,103321	0,0
0,150000	0,150000	0,113320	0,036680	0,016685	-0,019995	0,017181	0,017181	0,113320	0,113320	0,113320	0,0
0,160000	0,160000	0,123317	0,036683	0,016687	-0,019997	0,016278	0,016278	0,123317	0,123317	0,123317	0,0
0,170000	0,170000	0,133315	0,036685	0,016687	-0,019998	0,016996	0,016996	0,133315	0,133315	0,133315	0,0
0,180000	0,180000	0,143313	0,036687	0,016687	-0,019999	0,016425	0,016425	0,143313	0,143313	0,143313	0,0
0,190000	0,190000	0,153313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016879	0,016879	0,153313	0,153313	0,153313	0,0
0,200000	0,200000	0,163313	0,036687	0,016688	-0,020000	0,016518	0,016518	0,163313	0,163313	0,163313	0,0
0,210000	0,210000	0,173313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016805	0,016805	0,173313	0,173313	0,173313	0,0
0,220000	0,220000	0,183312	0,036688	0,016687	-0,020000	0,016577	0,016577	0,183312	0,183312	0,183312	0,0
0,230000	0,230000	0,193313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016758	0,016758	0,193313	0,193313	0,193313	0,0
0,240000	0,240000	0,203313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016614	0,016614	0,203313	0,203313	0,203313	0,0
0,250000	0,250000	0,213313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016729	0,016729	0,213313	0,213313	0,213313	0,0
0,260000	0,260000	0,223313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016638	0,016638	0,223313	0,223313	0,223313	0,0
0,270000	0,270000	0,233313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016710	0,016710	0,233313	0,233313	0,233313	0,0
0,280000	0,280000	0,243313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016653	0,016653	0,243313	0,243313	0,243313	0,0
0,290000	0,290000	0,253313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016698	0,016698	0,253313	0,253313	0,253313	0,0
0,300000	0,300000	0,263313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016662	0,016662	0,263313	0,263313	0,263313	0,0
0,310000	0,310000	0,273313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016691	0,016691	0,273313	0,273313	0,273313	0,0
0,320000	0,320000	0,283313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016668	0,016668	0,283313	0,283313	0,283313	0,0
0,330000	0,330000	0,293313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016686	0,016686	0,293313	0,293313	0,293313	0,0
0,340000	0,340000	0,303313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016672	0,016672	0,303313	0,303313	0,303313	0,0
0,350000	0,350000	0,313313	0,036687	0,016687	-0,020000	0,016683	0,016683	0,313313	0,313313	0,313313	0,0