

DATORREGLERING
AV EN TVÅ-LOOPS-PROCESS MED PID-ALGORITMER

JAN THULIN

RE-131 Augusti 1973
Inst.för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola

DATORREGLERING

AV EN TVÅ-LOOPS-PROCESS MED PID-ALGORITMER.

Examensarbete utfört vid institutionen för reglerteknik,
Lunds Tekniska Högskola.

Jan Thulin

Handledare: Johan Wieslander

augusti 1973

I N N E H Å L L .

	<u>sid.</u>
<u>Reglerobjektet.</u>	2
<u>Regulatorerna.</u>	3
Variationer:	
Tidpunkt för inställning av nytt styrvärde.	4
I-delen.	5
D-delen.	5
Diskret approximering av kontinuerlig PID-regulator.	6
Jämförelse av alternativa D-approximationer.	8
<u>Programpaket.</u>	9
Task SET	11
Task REG	12
Task VP	13
Task LP	14
Task ALIO	14
Alternativt programpaket till loggprogrammet LOGGER.	15
<u>Resultat.</u>	16
Blockschema över bästa diskreta regulator.	20
Kurvor.	21
<u>Flödesscheman.</u>	
Task DIRBOM	31
Task REG	33
Subrutin PID	34
Task LP	35
<u>Referenser.</u>	37

Avsikten med det här presenterade arbetet har varit att undersöka olika varianter av diskreta PID-regulatorer på ett visst reglerobjekt — en kula som rullar på en vridbar bom.

REGLEROBJEKTET.

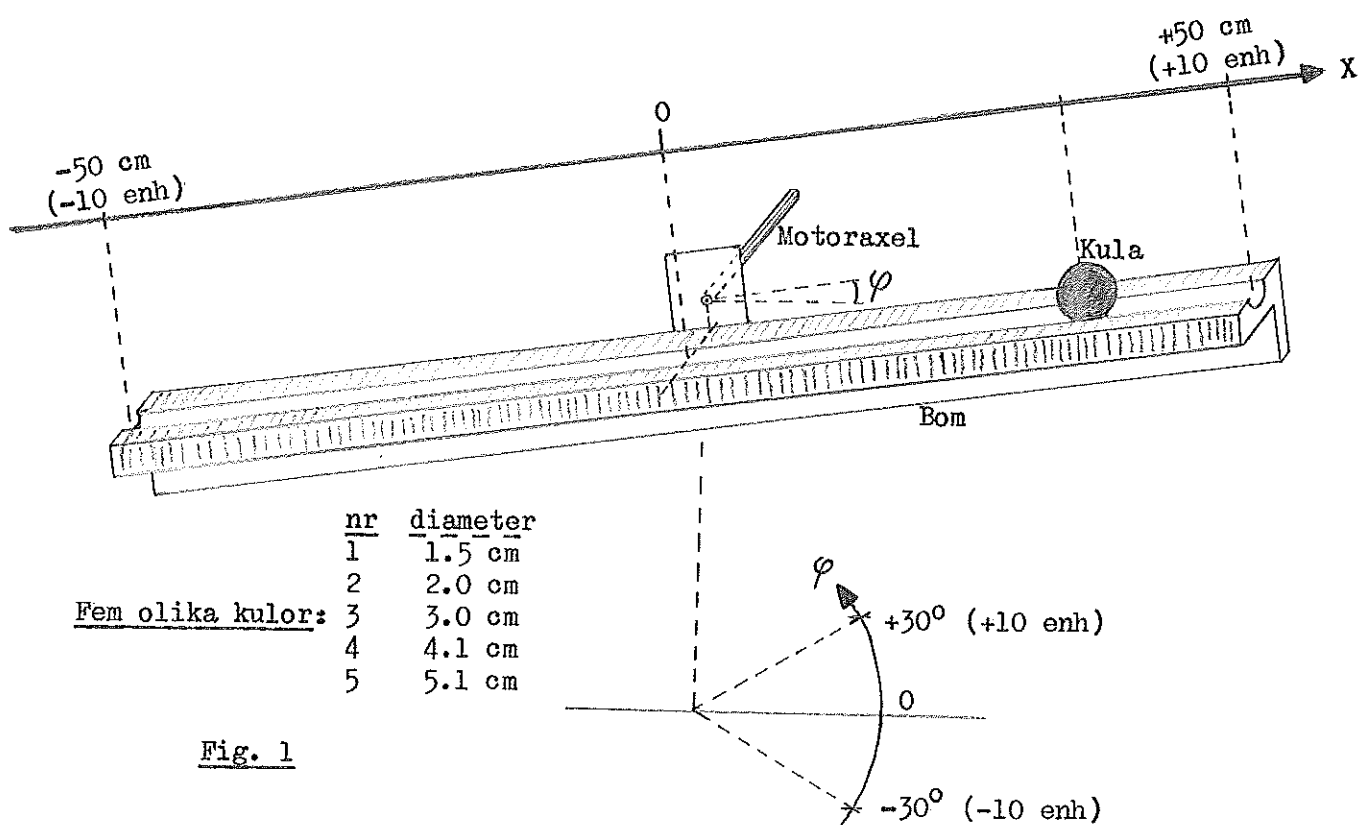


Fig. 1

En bom vrids av en direktkopplad likströmsmotor med permanentmagneter. Bommen innehåller en ränna i vilken en metallkula kan rulla. Regulatorns uppgift är att styra kulans läge (X), vilket sker med vridning av bommen.

Kulans läge (X) kan mätas med hjälp av den elektriska kontakt som kulan ger mellan en motståndstråd av Kanthal och en koppartråd vilka är infällda på var sin sida av rännan.

Bommens lutningsvinkel (φ) mätes av en potentiometer fäst på motoraxeln.

Överföringsfunktionen från motorns insignal (spänningen) till bommens lutningsvinkel (utan kula) har bestämts på experimentell väg.¹⁾

1) J. Wieslander, Opublicerat material över experimentuppställningen "Bommen".

Regleringen sker med två looper enligt figur 2.

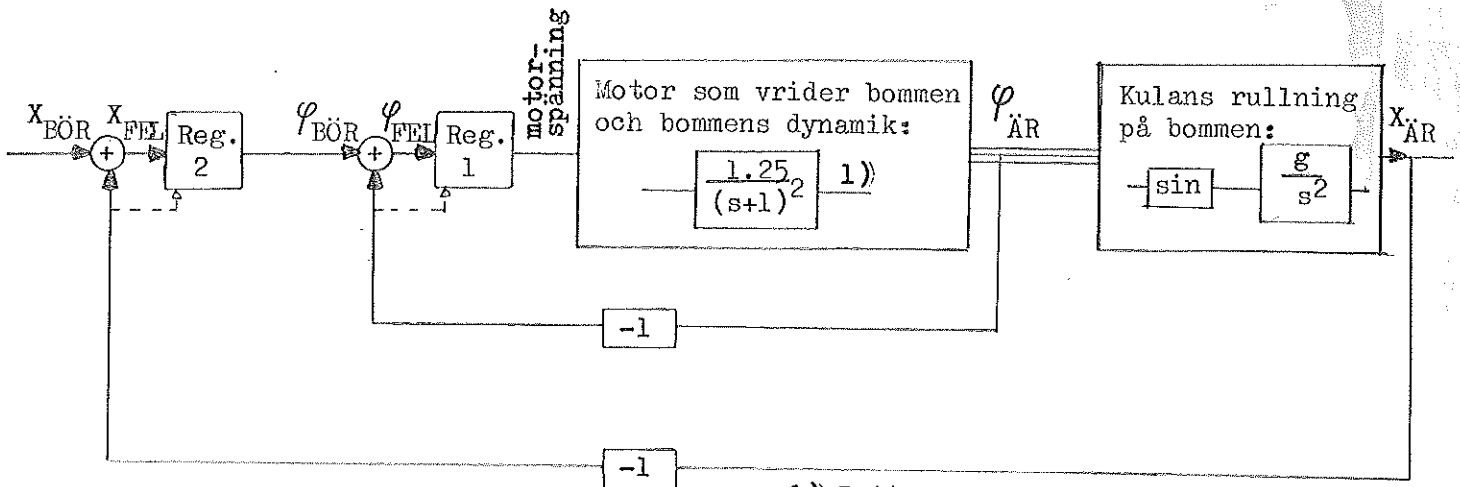
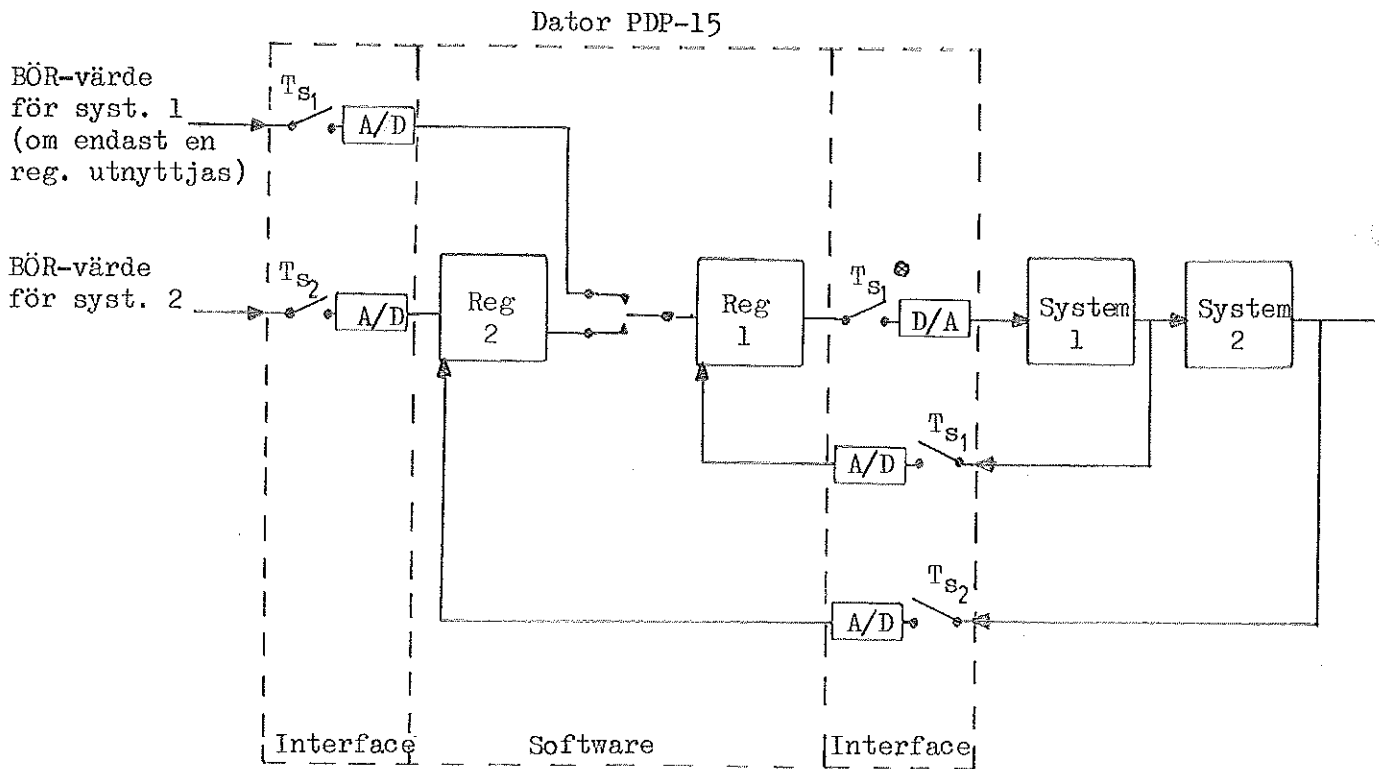


Fig. 2

1) Detta gäller endast om vi kan bortse från kulans tyngdmoment.

REGULATORERNA.

Datorregleringen är uppbyggd enligt figur 3.



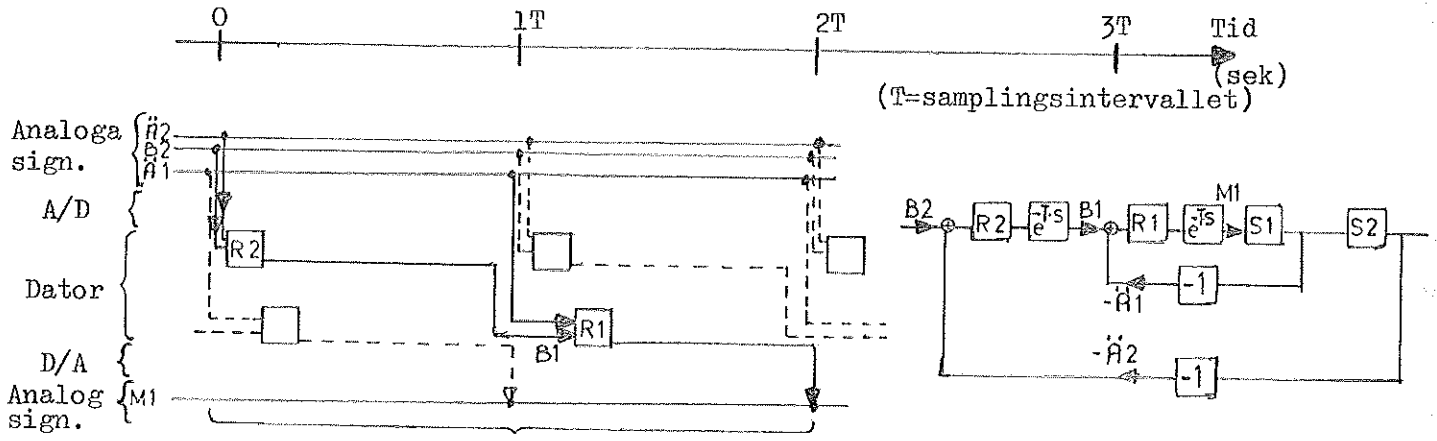
⊙ { Alternativt kan detta T_s vara "noll".
D.v.s. beräknat styrvärde förs genast till systemet. (Alternativ "HIGH".)

Fig. 3

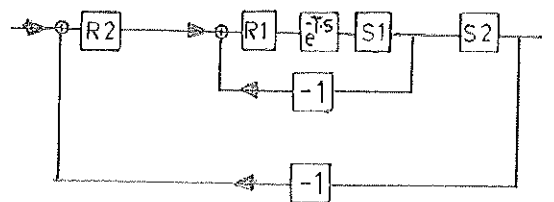
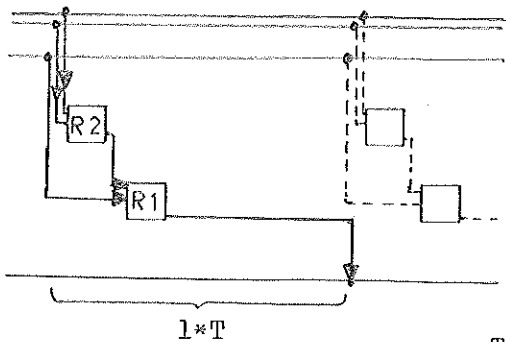
De variationer av regulatoralgoritmen som har undersökts är:

1/ Tidpunkt för inställning av nytt styrvärde. (Se fig.4)

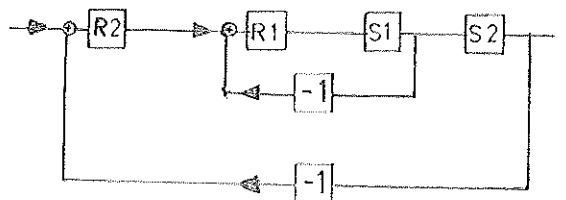
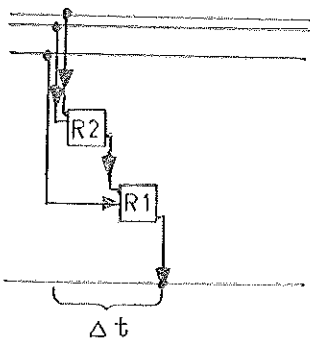
- a/ "LOW" Det nya styrvärdet ställs in vid nästa samplings-tillfälle.
- b/ "HIGH" Det nya styrvärdet ställs in så fort det är beräknat. Detta kräver D/A-omvandling vid en annan tidpunkt än det ordinarie samplingsstillfället.



Tidsfördröjning i båda regulatorerna.
Alternativet har ej undersökts.



Tidsfördröjning i en regulator.
Alternativ "LOW".



Ingen större tidsfördröjning.
Alternativ "HIGH".

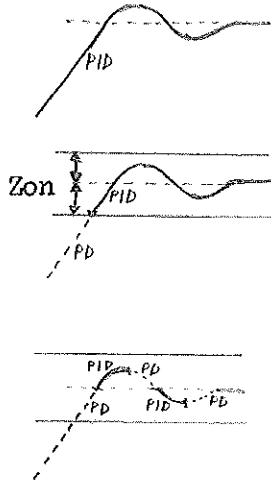
Δt har uppmätts till maximalt 15 ms.

Fig. 4 Jämförelse mellan "LOW" och "HIGH".
Båda regulatorerna har samma samplingsintervall.

2/ Integreringsdelen.

a/ En diskret approximering (rektangulär integrering) av en kontinuerlig integrering. (Se sid. 6)

b/ Tre olika sätt att ha integreringsdelen villkorligt inkopplad:



i/ Inget villkor. I-delen är hela tiden inkopplad.

ii/ I-delen är endast inkopplad när FEL-värdet ligger inom en zon kring BÖR-värdet. Zongränsen fastställes före experimentet.

Anledning: I-delen skall ta bort ett litet bestående FEL-värde. Därför torde I-reglering endast behövas när insvängningen har kommit nära BÖR-värdet.

iii/ Utöver föregående zon-villkor gäller att I-delen alltid är bortkopplad²⁾ när absoluta FEL-värdet minskar.

3/ Deriveringsdelen.

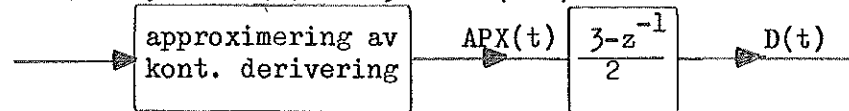
a/ Tre olika diskreta approximeringar av en kontinuerlig derivering. (Se sid. 6)

b/ Ett extra filter $(3-z^{-1})/2$ i D-delen.³⁾

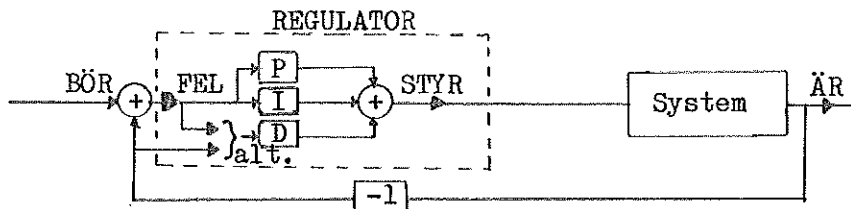
Anledning: Filtret minskar den fasförlust som samplingen medför.

D-delens uppgift är att vid stora ändringar i insignalen hinna före en överstyrning av processen med ett motverkande bidrag till styrsignalen. Det är alltså lämpligt att öka trenden av derivatans beteende. Filtret medför just detta:

$$D(t) = 1.5 * APX(t) - 0.5 * APX(t-T)$$



c/ Derivering av FEL-värdet eller derivering enbart av ÄR-värdet.⁴⁾



Anledning: Störningar i BÖR-signalen påverkar ej D-delen om ÄR-värdet utnyttjas till D-input. Systemets eget beteende (ÄR-signalen) bör ge tillräckliga upplysningar för att D-delen skall kunna stabilisera och hindra överstyrning.

2) Detta har föreslagits av O. Petterson, Prosessdatateknikk, s. 91

3) - " - Fertik och Ross, DDC Algorithm With Anti-Windup Feature, s.4

4) - " - O. Petterson, a.a. sid. 89

Diskret PID-algoritm. 5)

Vi utgår från följande kontinuerliga PID-regulator:

$$G(s) = K \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] \left[1 + T_d s \right] = \frac{M(s)}{e(s)} \quad (K1)$$

där: M(s) = Styrvariabel
 e(s) = Styrfel
 K = Förstärkning
 T_i = Tidskonstant för integrering
 T_d = Tidskonstant för derivering

Uppdelning ger:

$$M(s) = P(s) + I(s) + D(s) \quad (K2)$$

$$P(s) = K \left(1 + \frac{T_d}{T_i} \right) e(s) \quad (K3)$$

$$I(s) = \frac{K}{T_i s} e(s) \quad (K4)$$

$$D(s) = K T_d s e(s) \quad (K5)$$

För att minska högfrekventa störningars inverkan på deriveringsdelen D(s) införes ett extra filter med tidskonstanten T_d/G:

$$D(s) = \frac{K T_d s}{G s + 1} e(s) \quad (K6)$$

G = Deriverande filterkonstant

Diskret approximering blir:

Proportionell del.

$$P(t) = K \left(1 + \frac{T_d}{T_i} \right) e(t) \quad (D1)$$

Integrerande del.

$$I(t) = I(t-T) + \frac{KT}{T_i} e(t) \quad (D2)$$

Deriverande del.

$$D(t) = K \alpha (1-\beta) (e(t) - e(t-T)) + \beta D(t-T) \quad (D3)$$

Tre alternativ på α och β har undersökts:

Substituering av s = f(z). (Alternativ 1 och 2)

Analogin mellan kontinuerliga och samplade system för en tidsfördröjning är: $z^{-1} = e^{-sT}$

vilket ger $s = \ln z / T$

Nu gäller det att finna ett lämpligt uttryck för z där serieutveckling av ln z ger en god approximering efter snabb avkortning.

Alternativ 1/ Bakåtdifferens.

Sätt $z^{-1} = 1-w$

$$\Rightarrow s = -\ln(1-w)/T = (1/T)(w + w^2/2 + w^3/3 + \dots)$$

5) Härledningen är i huvudsak hämtad från Fertik och Ross, a.a.

Första avkortningen ger: $s = w/T = \frac{1-z^{-1}}{T}$

Andra avkortningen ger: $s = w + w^2/2 = \left(\frac{1-z^{-1}}{T}\right) \left(\frac{z-z^{-1}}{2}\right)$

Resultatet $s = (1-z^{-1})/T$ motsvarar derivatan med utgångspunkt från första ordningens bakåtdifferens under tidsintervallet T :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{y(t) - y(t-T)}{T}$$

För $s = (1-z^{-1})/T$ insatt i (K6) får vi (D3) med

$$\alpha = \frac{T_d}{T}$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{T_d}{T} G}$$

("BD")

Alternativ 2/ Tustin-approximation.

Sätt $z = (1+v)/(1-v)$

$$\Rightarrow s = (\ln(1+v) - \ln(1-v))/T = (v + v^3/3 + v^5/5 + \dots)/T$$

Första avkortningen ger: $s = 2v/T = (2/T)(1-z^{-1})/(1+z^{-1})$

Om detta insättes i (K6) får vi (D3) med

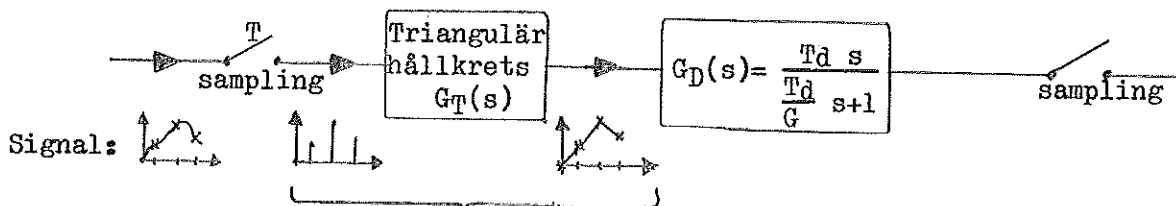
$$\alpha = \frac{T_d}{T}$$

$$\beta = \frac{1 - \frac{T_d}{2T} \frac{G}{T}}{1 + \frac{T_d}{2T} \frac{G}{T}}$$

("TUS")

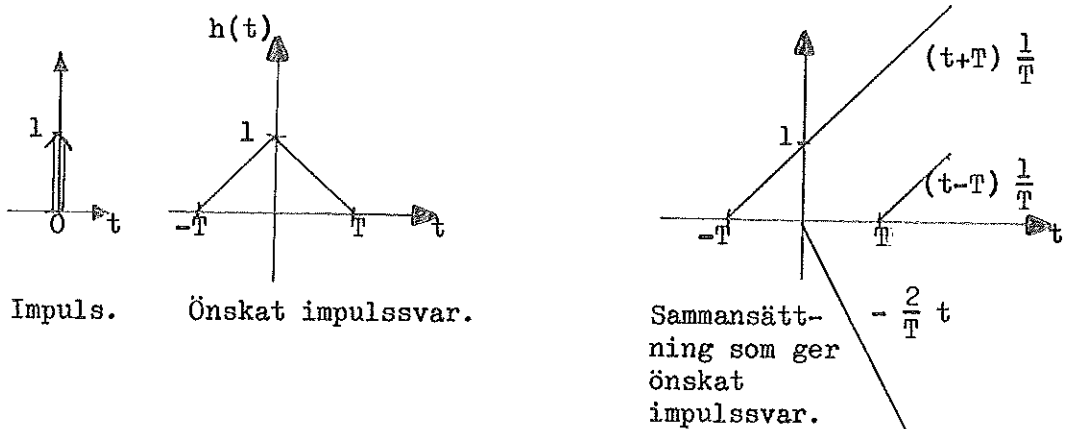
Alternativ 3/

Rekonstruktion av kontinuerlig signal med hjälp av triangulär hållkrets och Z-transform.



Fysikaliskt orealiserbart eftersom det förutsätter kunskap om framtiden. Men som matematisk approximation kommer det att fungera i det totala systemet.

Triangulär hållkrets:



Figurens tre impulssvar ger tillsammans triangulära hållkretsens överföringsfunktion:
 $G_T(s) = \frac{1}{Ts^2} (e^{sT} - 2 + e^{-sT}) = \frac{e^{sT} (1 - e^{-sT})^2}{Ts^2}$

$$\begin{aligned} \text{Z-transform på systemet } G_T(s) \cdot G_D(s) : \\ H_D(z) = \frac{z^{-2} + z^{-1}}{T} \cdot Z \left\{ \frac{1}{s^2} \cdot \frac{T_d s}{\frac{T_d}{G} s + 1} \right\} &= \frac{z^2 - 2z + 1}{z} \cdot \frac{T_d}{T} \cdot Z \left\{ \frac{\frac{G}{T_d}}{s(s + \frac{G}{T_d})} \right\} = \\ &= \frac{(z-1)^2}{z} \cdot \frac{T_d}{T} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{G}{T_d} T}}{(z-1)(z - e^{-\frac{G}{T_d} T})} = \\ &= \frac{T_d}{T} (1 - e^{-\frac{G}{T_d} T})(1 - z^{-1}) / (1 - e^{-\frac{G}{T_d} T} z^{-1}) \end{aligned}$$

Detta motsvarar ekvation (D3) med

$$\alpha = \frac{T_d}{T}$$

$$\beta = e^{-\frac{G}{T_d} T}$$

("REC")

Jämförelse av de tre D-alternativen.

Endast β -värdet skiljer alternativen åt.

Sätt $\frac{T}{T_d} G = x$

Bakåtdifferens:

$$\beta = \frac{1}{1+x}$$

Tustin:

$$\beta = \frac{(1 - \frac{x}{2})(1 - \frac{x}{2})}{(1 + \frac{x}{2})(1 + \frac{x}{2})} = \frac{1}{1+x+(\frac{x}{2})^2} = \frac{(\frac{x}{2})^2}{1+x+(\frac{x}{2})^2}$$

Rekonstruktion:

Serieutveckling ger:

$$\beta = \frac{1}{e^x} = \frac{1}{1+x+\frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \dots}$$

Vi ser att om $x < 1$ så är alla β -värden nästan lika ($= \frac{1}{1+x}$).

Skillnaden mellan approximationerna framträder alltså bara

när $\frac{T}{T_d} G > 1$.

Men vad händer när G är mycket stort - och alltså filtret

$1/(T_d s + 1)$ inte utnyttjas?

Bakåtd.: $\lim_{G \rightarrow \infty} \beta = 0 \Rightarrow D(t) = K T_d \frac{e(t) - e(t-T)}{T}$

Tustin: $\lim_{G \rightarrow \infty} \beta = -1 \Rightarrow \frac{1}{2}D(t) + \frac{1}{2}D(t-T) = K T_d \frac{e(t) - e(t-T)}{T}$

Rek.: $\lim_{G \rightarrow \infty} \beta = 0 \Rightarrow D(t) = K T_d \frac{e(t) - e(t-T)}{T}$

"Bakåtd." och "Rek." motsvarar här den vanliga approximationen av derivering med första ordningens bakåtdifferens.

PROGRAMPAKET för fastställande av regulatorutseende, reglering och presentation av resultat.

Reelltidssystemet RSX-15 utnyttjas.

På grund av det begränsade utrymmet i kärnminnet får inte alla program plats där samtidigt. Därför har en uppdelning skett så att fem självständiga programpaket - "tasks" - utför önskade arbetsrutiner och en sjätte dirigerar de övriga. Fyra tasks utnyttjar samma plats i kärnminnet men vid olika tidpunkter. Se figur 5.

När en task skall aktiveras hämtas den från skivminnet till kärnminnet. Men under själva regleringen hinns inte det med om samlingsintervallet är litet. Därför är de program som då behövs (task REG och task ALIO) residenta i kärnminnet under regleringen. Detta sköter DIRBOM om med monotorkommandot "FIX IN CORE".

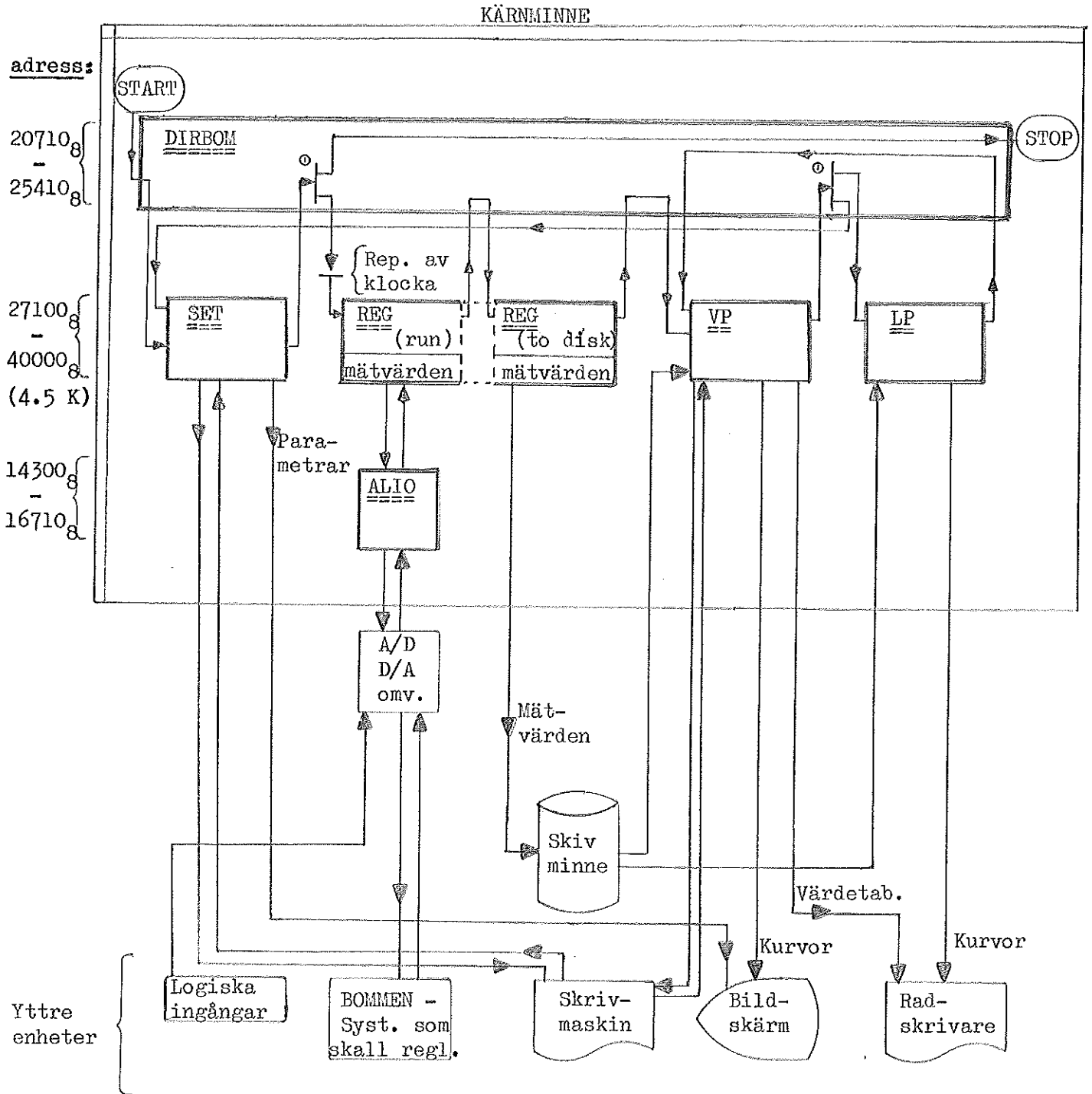
Task ALIO har jag i sin helhet hämtat från institutionens programbibliotek. Därifrån har jag också fått subrutiner för plottning på bildskärmen. Övriga program har jag skrivit.

På sid. 31 - 36 finns flödesscheman för DIRBOM, REG, subrutin PID och LP.

Teckenförklaring.

[] =Tecken inom dessa parenteser är överflödiga.

_ =Blanktecken.



⊙ { Väljaren styrs av kommando som givits på skrivmaskinen i föregående task. }

Fig. 5 Kommunikationsvägar.

Task SET: Fastställer regulatorns utseende.

Först sker utskrift på skrivmaskinen:

```
PID CONTROL PARAMETERS
>
```

Regulatorns nuvarande utseende (parametrar o. dyl.) skrivs ut på bildskärmen. Ändringar utföres med följande kommandon:

Form: >[NZZ_X]

Variabler: N = Regulatorns nummer (1 eller 2).

ZZ= Parameterbeteckning:

TS Samplingsintervall

K Förstärkning

TI Tidskonstant för integrering

TD Tidskonstant för derivering

G Filterfaktor för derivering

ZON] Absolutvärde av de zongränser som används vid villkorlig I-del samt kodsiffra (se anm. nedan)

Beteckning på reg. konstruktion:

BD D-del enl. bakåtdifferens

TUS] D-del enl. Tustin approximering

RE] D-del enl. rekonstruktion av analog signal med triangulär hållkrets

Anvisning för exp. utförande:

SAVE] Den reg. värden som skall sparas för senare studium.

X = Reellt parametervärde (om ZZ är param.)
/FORMAT(F6.2)/

Form: >[KOM]

Variabel: KOM = Kommando:

HIGH] Beräknat styrvärde ställs genast in. (Regulator med hög prioritet.)

LOW] Beräknat styrvärde ställs in vid nästa samplingstillfälle.

- Ger utskrift på skrivmaskinen av inställda parametervärden.

RUN Regleringen kan starta. (Beroende på de logiska ingångarna.)

EXIT] Ingen mer reglering. Uthopp från programpaketet.

Efter varje kommando visas på bildskärmen de då gällande inställningarna.

Anmärkning till ZON-värdet:

1/För att jag under arbetets gång lätt skulle kunna införa nya alternativ i regulatoralgoritmen har jag utnyttjat vissa ZON-värden (siffrorna 1,2,3,4 och 5 i första decimalen) till kodsiffror. På så sätt har endast programmet REG (egentligen subrutinen PID) behövt ändras. T.ex. gäller följande:

Om 1:a dec. är 2 \Rightarrow Filtret $(3-z^{-1})/2$ är bortkopplat.

2/För att enkelt på bildskärmen få en kontroll på vilket D-approximeringsalternativ som används utnyttjas ZON-värdets fjärde_decimal. Programmet SET tilldelar ZON-värdet en fjärde decimal som är:

- 1 om "REC" har begärts på skrivmaskinen.
- 3 om "TUS" har begärts på skrivmaskinen.
- 5 om "BD" har begärts på skrivmaskinen.

Användaren kan inte påverka detta värde när han begär ett visst ZON-värde eftersom programmets FORMAT-sats vid inläsning av ZON-värdet från skrivmaskinen endast tar hänsyn till två decimaler.

Speciella säkerheter i SET-programmet:

1/Felaktigt kommando ger utskriften:

```
ILLEGAL COMMAND >fel  
>
```

där "fel" är det registrerade felaktiga kommandot.

2/Datorn medger endast samplingsintervall som är en multipel av 0.02 sek. Begärt värde på 1TS avkortas därför till godtagbart värde.

3/Den yttre regulatorns samplingsintervall måste vara en multipel av den inre regulatorns samplingsintervall. Begärt värde på 2TS avkortas därför till godtagbart värde.

+ + +

Task REG: Beräknar styrvärden.

Sparar data från 300 samlingar i kärnminnet.

Efter avslutad reglering överföres sparade data till skivminnet.

De logiska ingångarna 14, 15 och 17 styr förloppet. 17 startar och 14 resp. 15 medför olika stoppalternativ. Se sid. 33.

Anmärkning: Den stora mängd av data som skall sparas får inte plats i kärnminnet samtidigt som de stora programmen för plottning o.dyl. Därför måste mätvärdena placeras i skivminnet. Men datorn hinner inte placera dem där med det samma eftersom tiden mellan två samlingar kan vara mycket kort. Följaktligen måste värdena först sparas i kärnminnet. Detta är möjligt dels därför att själva regleringsrutinerna tar liten plats och dels därför att jag har låtit datorn lagra de reella mätvärdena som heltal (efter multiplicering med tusen så att tre decimaler sparas). Ett heltal lagras nämligen i en cell medan ett reellt tal behöver två celler. På detta sätt

kan data från 300 samplings (2 400 värden) sparas. Med det minsta samplingsintervallet 0.02 sek kan alltså data från ett händelseförlopp på sex sekunder bevaras. Detta är fullt tillräckligt eftersom ett insvängningsförlopp tar 3 - 4 sek.

+ + +

Task VP: På bildskärmen ritas kurvor av de data som sparats i skivminnet.

Först visas kurvor från samtliga samplingsstillfällen. Med hjälp av kommandon (svar på frågor) givna på skrivmaskinen kan sedan intressanta kurvdelar studeras och uppförstoras.

Följande frågor och svar förekommer:

Fråga: "PLOT TIME?"

Svar: Den totala tid i sekunder som kurvan skall omfatta.
/FORMAT(F5.2)/

Anmärkning:

1/Hela skärmens bredd utnyttjas. Detta svar bestämmer alltså "förstoringsgraden".

2/Svaret noll medför förberedelser för ett nytt regleringsexperiment. Programmet SET startar.

Fråga: "SPART TIME (<)?" Värdet inom parentes är tiden för sista sparade samplingen. Tiden för den först sparade samplingen har satts till noll.

Svar: Den tidpunkt som kurvan skall börja med.
/FORMAT(F5.2)/

Fråga: "NUMBER OF CURVES?"

Svar: Det antal kurvor som samtidigt skall visas på skärmen.
/FORMAT(I2)/

Kurvorna tas med i följande ordning:

	<u>Tecken på skärmen:</u>
1. BÖR-värdet	endast kurvan
2. ÄR-värdet	0 (varje samplings- tillfälle)
3. ÄR-värdet för inre reg. (om övriga kurvor visar yttre reg.) alternativt FEL-värdet för yttre reg.	* (var 10:e ")
4. STYR-värdet	x (var 11:e ")
5. I-delen av styrvärdet	Δ (var 12:e ")
6. D-delen "	□ (var 13:e ")
7. P-delen "	+ (var 14:e ")

Fråga: "PLOT ON LP?"

Svar: YES medför att kurvorna blir plottade på radskrivaren.
(Se task LP.)

Fråga: "VALUE ON LP?"

Svar: YES medför att vi, utöver kurvorna på bildskärmen, får värdetabeller på radskrivaren.

Speciell säkerhet i VP-programmet:

Om svaret av någon anledning har lett till att kurvans starttidpunkt kommer efter sluttidpunkten fås felutskrift och omfrågning. Detta kan t.ex. inträffa om man, inför ett nytt experiment, glömmer att svara noll på frågan "PLOT TIME?" och i stället genast ger ett kommando som tillhör program SET.

+ + +

Task LP: På radskrivaren plottas kurvor av de data som sparats i skivminnet.

Detta sker om svaret var YES på frågan "PLOT ON LP?" i programmet VP.

Anmärkning:

1/En speciell kontrollsiffra finns sparad från varje samplings- tillfälle som bl.a. visar om beräkningarna verkligen har genomförts för båda regulatorerna. Radskrivaren skriver ut kontrollsiffrorna längst till höger på raden.

2/Om något värde (P, I eller D) är större än +10 (eller mindre än -10) får det inte plats i diagrammet men det verkliga värdet skrivs ut inom parentes.

+ + +

Task ALIO: (Analog & Logical Input-Output) Med hjälp av A/D- och D/A-omvandlare utföres all kommunikation mellan dator, system och de logiska ingångarna.

+ + +

Alternativt programpaket där DIRBOM ej utnyttjas.

Om mer dokumentation önskas än de 300 samplingsarna kan institutionens speciella loggningsprogram LOGGER användas.

Utöver LOGGER används då följande tasks:

- SET: Identiskt med SET enl. tidigare beskrivning.
Säkerhet i SET för att hindra att samplingsintervallet blir fel då SET användes tillsammans med LOGGER:
Kommandot LTS betraktas som ILLEGAL COMMAND när task DIRBOM inte användes. (Test på variabeln IEXT8 som DIRBOM tilldelar värdet -1. Normalt är IEXT8 ett positivt upplagenummer.)
Detta är nödvändigt eftersom det minsta samplingsintervallet (LTS) bara får ändras med hjälp av LOGGER.
- PID: Regulatorn. Ungefär som subrutin PID.
- LOGLP: Plottar kurvor på radskrivaren på samma sätt som task LP, men data hämtas från den dectape som LOGGER använder.

Vid de minsta samplingsintervallen hinner man dock bara spara ett mindre antal variabler eftersom LOGGER placerar data direkt i skivminnet.

Dessutom är arbetet tidskrävande då man måste göra manuella anrop av alla tasks och före plottning låta LOGGER överföra data från skivminne till dectape. (De data som finns på skivminnet är A/D-omvandlarens "utgångsbitar". Dessa konverterar LOGGER till datorns normala talrepresentation, men de placeras samtidigt på en dectape.)

RESULTAT.

Den bästa reglering som jag har uppnått då nytt styrvärde ställs in vid nästa sampling ("LOW") visas i fig. 6 och 7.

Samplingsintervallets storlek.

Den känsligaste punkten i regleringen är den inre regulatorns inställning av bommens vinkel.

T_s

Om nytt styrvärde ställs in vid nästa sampling måste $1T_s$ vara mindre än 0.08 sek för att ÅR- och BÖR-vinkelvärdena skall följas åt så bra att styrning av kulan blir möjlig. $2T_s$ kan däremot vara så stort som 0.24 sek. Se fig. 8 ($2T_s$ är där 0.12 sek.).

"LOW"

Om styrvärdet genast (efter ca. 0.015 sek) får påverka motorn kan $1T_s$ vara upp till 0.12 sek. Se fig. 9.

"HIGH"

P.g.a. loopernas beroende av varandra är det svårt att fastställa någon generell regel för beräkning av samplingsintervallets längd.

I fortsättningen är alla redovisade resultat från experiment där styrvärdet ställs in vid nästa samplingstillfälle - alternativ LOW.

Integrerande delen.

Den yttre regulatorn (lägesreg.) behöver inte ha någon I-del (1/s).

PID
eller
PD

Orsak: I systemets (kulans rullning) överföringsfunktion ingår redan $1/s^2$.

Den inre regulatorn (vinkelregulatorn) är däremot tvungen att ha I-del för att det inte skall bli något bestående fel. Se fig. 10.

Orsak: Kulan orsakar ett störmoment som måste uppvägas av en styrspänning på motorn trots att kulan ligger rätt. Eftersom regulatorns input-signal nu är noll (och konstant) är det endast I-delen som kan ge en styrspänning.

Villkorlig I-del.

ii/ När integrering endast sker inom en zon kring BÖR-värdet (fig. 6) kan resultatet bli bättre jämfört med hel integrering utan inskränkningar (fig. 11). Detta gäller speciellt för de två tyngsta kulorna.

ZON

Orsak: För stor I-del i början på stegsvaret försämrar stabiliteten. Om zoninskränkning utnyttjas behöver inte I-delen begränsas för stabilitetens skull. Kulans störmoment medför: ju tyngre kula, desto större I-del (mindre T_i -värde).

iii/ Om integrering endast utföres inom zonen och för växande fel blir resultatet i stort sett samma som om ingen I-del alls användes.

Orsak: Tidsintervallen där integrering utföres är för korta.

Korrigerig av felaktig vinkelmätning.

Vad händer om experimentuppställningen är dåligt justerad så att vinkeln mätes lite fel?

Se fig. 12. Om även den yttre regulatorn får en I-del kommer det annars bestående felet i kulans läge att försvinna.

Men I-delen orsakar alltid en liten svängning kring BÖR-värdet.

Därför bör I-delen inte användas i den yttre regulatorn om man vet att vinkelmätningen är korrekt. Se fig. 13.

Deriverande delen.

a/ Variant på approximeringen.

Alla varianterna kan ge nästan lika bra resultat. REC tycks dock vara den bästa.

BD
TUS
REC

Orsak: I regulatoralgoritmen finns G-parametern endast i β -värdet, vilket är det enda som skiljer approximationerna åt. Genom att variera på G måste det alltså gå att få de olika approximationerna numeriskt lika. Men om man vill att det insatta G-värdet skall vara samma som G-värdet i en motsvarande kontinuerlig regulator är troligen REC-varianten den riktigaste.⁶⁾

b/ Filtret $(3-z^{-1})/2$.

Detta filter medför bättre resultat. Men det är endast fråga om små skillnader.

$$\frac{3-z^{-1}}{2}$$

6) Fertik och Ross har, beträffande stora värden på G-parametern, visat att Tustinapproximationen kan bli oscillativ (om $TG/T_d > 2$) och att frekvenssvaret för REC i högre grad än för BD liknar den kontinuerliga deriveringens frekvenssvar.

c/ Val av D-input.

För båda regulatorerna visade det sig att endast $\dot{A}R$ -värdet (Y) får deriveras.

Y
eller
E

Orsak: Om vi bortser från störningar i $\dot{B}ÖR$ -värdet så är enda skillnaden att $\dot{A}R$ -input alternativet saknar den initialspik, vilken påskyndar styrningen, som FEL -input får när $\dot{B}ÖR$ -värdet ändras.

Den inre regulatorns $\dot{B}ÖR$ -värde ändras hela tiden. Alla de initialspikar som då uppstår om FEL utgör input omöjliggör en godtagbar reglering.

I den yttre regulatorn ändras $\dot{B}ÖR$ -värdet bara en gång. Den enda spik som FEL -input ger upphov till bör inte hinna ge någon större inverkan. Men som framgår av de flesta figurer, t.ex. fig. 14, har försöksuppställningen störningar i $\dot{B}ÖR$ -värdet, speciellt efter en ändring. Detta orsakar smärre hopp i $STYR$ -värdet som är $\dot{B}ÖR$ -värde för inre regulatorn och följaktligen hopp i motorspänningen. Men bommens tröghet medför att de snabba spänningshopp inte påverkar bommens vridning. Resultatet blir att styrningen av kulan visserligen blir bra men motorn "rycker" så mycket att FEL -input alternativet måste förkastas. Se fig. 14.

Extra fördel med Y-alternativet.

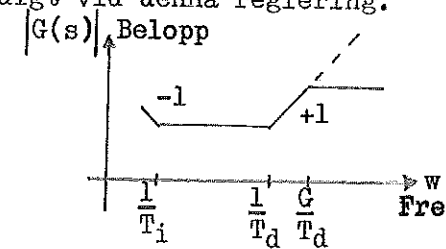
Vid start av en industriell process där många system skall samverka kan det vara lämpligt att först sätta börvärde = ärvärde och kräva att regulatorerna skall stoppa eventuell drift i systemen. Sedan inställes rätt börvärden för de olika systemen successivt.

Om kulan i vårt system skall fås att stanna där den är genom att $X_{\dot{B}ÖR}$ sättes lika med $X_{\dot{A}R}$ måste yttre regulatorns D-input vara $X_{\dot{A}R}$. När kulan kommer i rullning får vi en motverkande D-del som svänger bommen så att kulan stannar. Se fig. 15. Med X_{FEL} -input är bommen alltid horisontell och kulan kommer att rulla av.

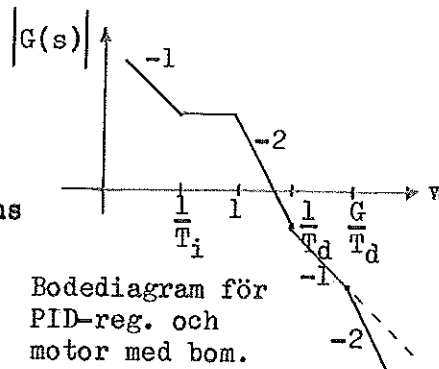
Parametern G. (Reg. 1)

G-värdet kan väljas stort. Filtret $1/(\frac{T_d}{G}s + 1)$ visade sig inte vara nödvändigt vid denna reglering.

Orsak:



Bodediagram för enbart PID-regulator.



Bodediagram för PID-reg. och motor med bom.

P.g.a. att motorns överföringsfunktion bryter ner asymptotkurvan med -2 från $w=1$ får vi inte någon större påverkan av högfrekventa signaler även om G-värdet väljes stort.

Parametrarna K, T_i och T_d .

Först fastställes den inre regulatorns parametrar genom att använda en regulator och enbart styra bommens vinkel (utan kula). En bra grovinställning ger Ziegler-Nichols tumregel⁷⁾. Se fig. 16.

Slutlig finjustering av dessa parametrar kan dock inte göras med denna reglering bl.a. eftersom momentet från kulan nu inte finns. Ju tyngre kulan är desto större måste $1K$ -värdet vara. Men som tidigare nämnts måste också $1T_i$ minska (I-delen öka). Dessutom är det tveksamt vilka krav man bör ställa på insvängningsförloppet angående t.ex. förhållandet mellan stigtid och översläng. Insvängningarna i figur 17 (en-loops-reglering utan kula) verkar ju inte vara särskilt bra. Men där har de parametrar använts som har visat sig ge de bästa två-loops-regleringarna med medeltung kula (kula nr 3). Alltså samma parametrar som använts i fig. 6 resp. 11.

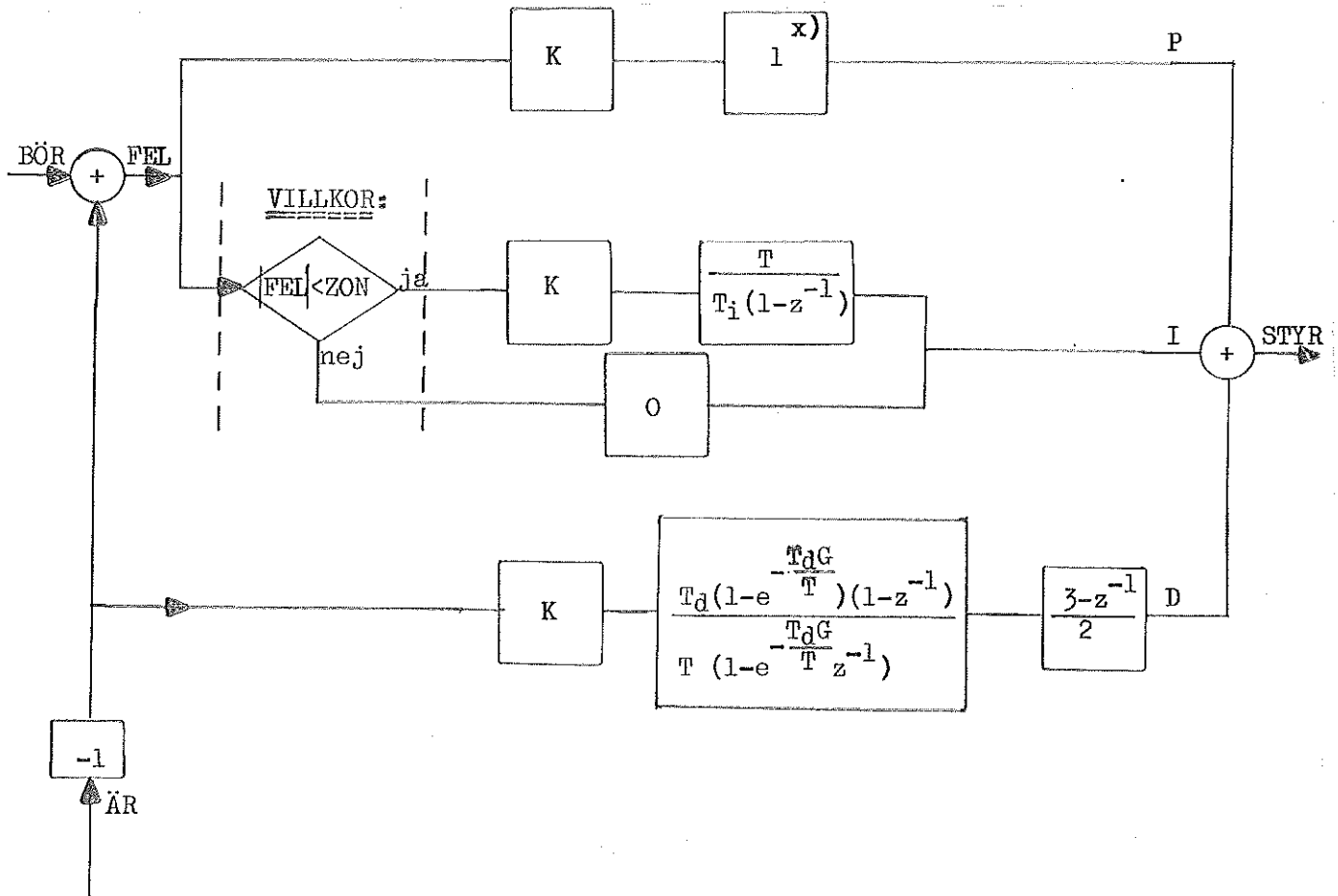
När man har lyckats få en reglering av det totala systemet med god följlning mellan BÖR-vinkel och ÄR-vinkel kan samma parametrar användas för alla T_s som inledningsvis ansågs möjliga.

7) P. Harriott, Process Control, sid. 178 f

G

K
 T_i
 T_d

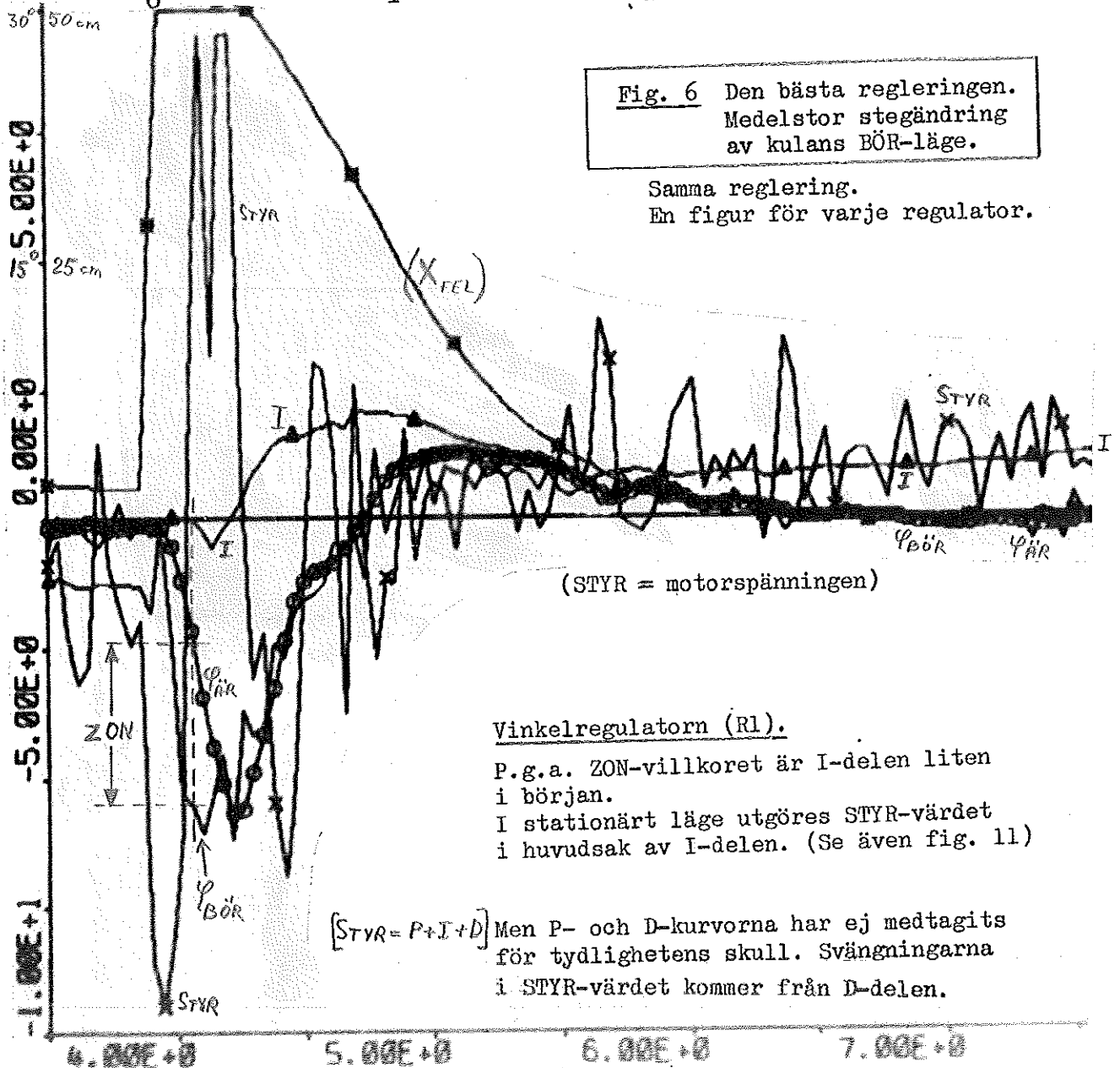
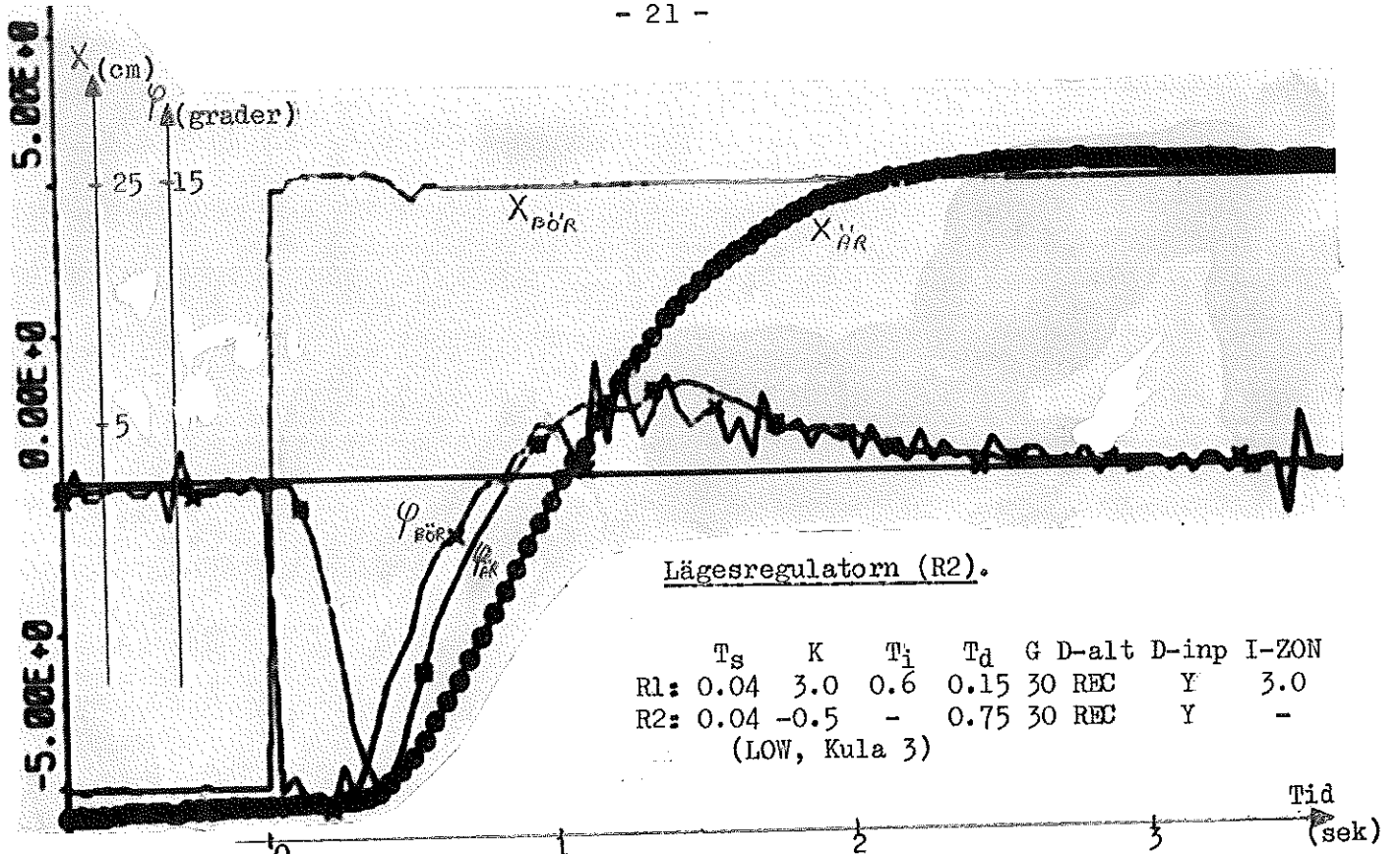
BÄSTA DISKRETA PID-REGULATOR.



x) Om FEL-värdet i stället för ÄR-värdet användes till D-input (och $T_i \neq 0$) skall detta block innehålla: $1 + \frac{T_d}{T_i}$

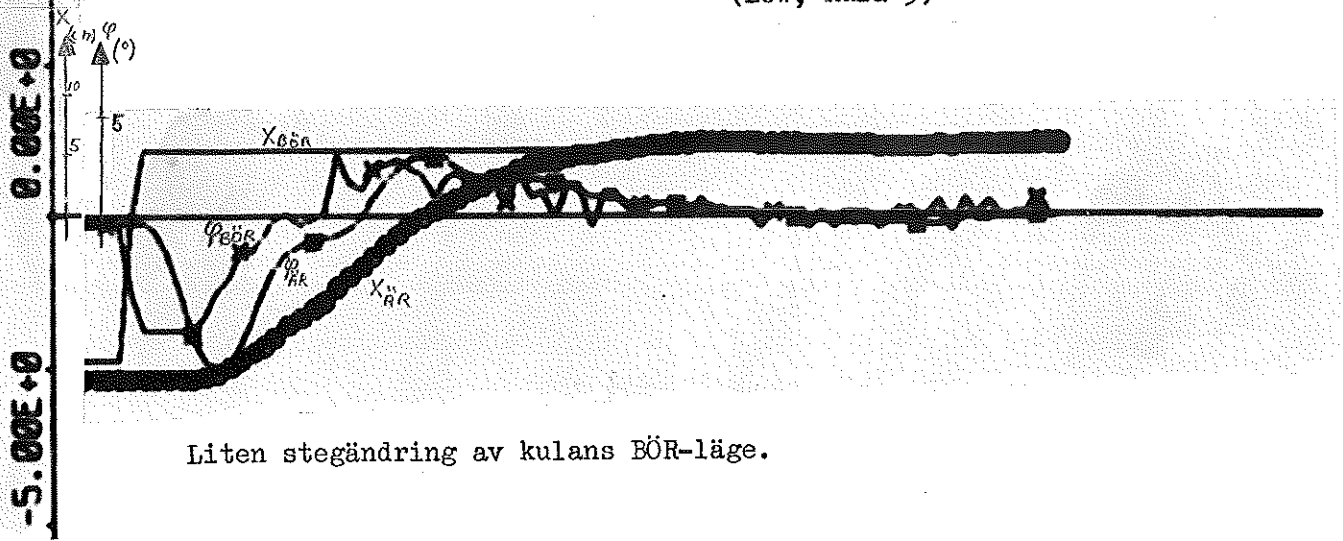
ALLMÄNNA KOMMENTARER TILL KURVORNA (fig. 6 - 17).

- 1/ Samplingsintervallets längd framgår tydligt av kurvan för ÄR-värdet. Varje samplingsstillfälle har markerats med en ring på denna kurva. Övriga kurvors markeringar är endast till för identifiering. Se sid.13.
- 2/ Tre olika tidsskalor förekommer: Fig. 10 = 1 sek/16 mm
 Fig. 12 och 13 = 1 sek/20 mm
 Övriga figurer = 1 sek/40 mm
Beloppsskalan är samma i alla figurer.
- 3/ Kulan. För fig. 14 har kula nr 2 använts. Alla andra figurer visar experiment med kula nr 3.

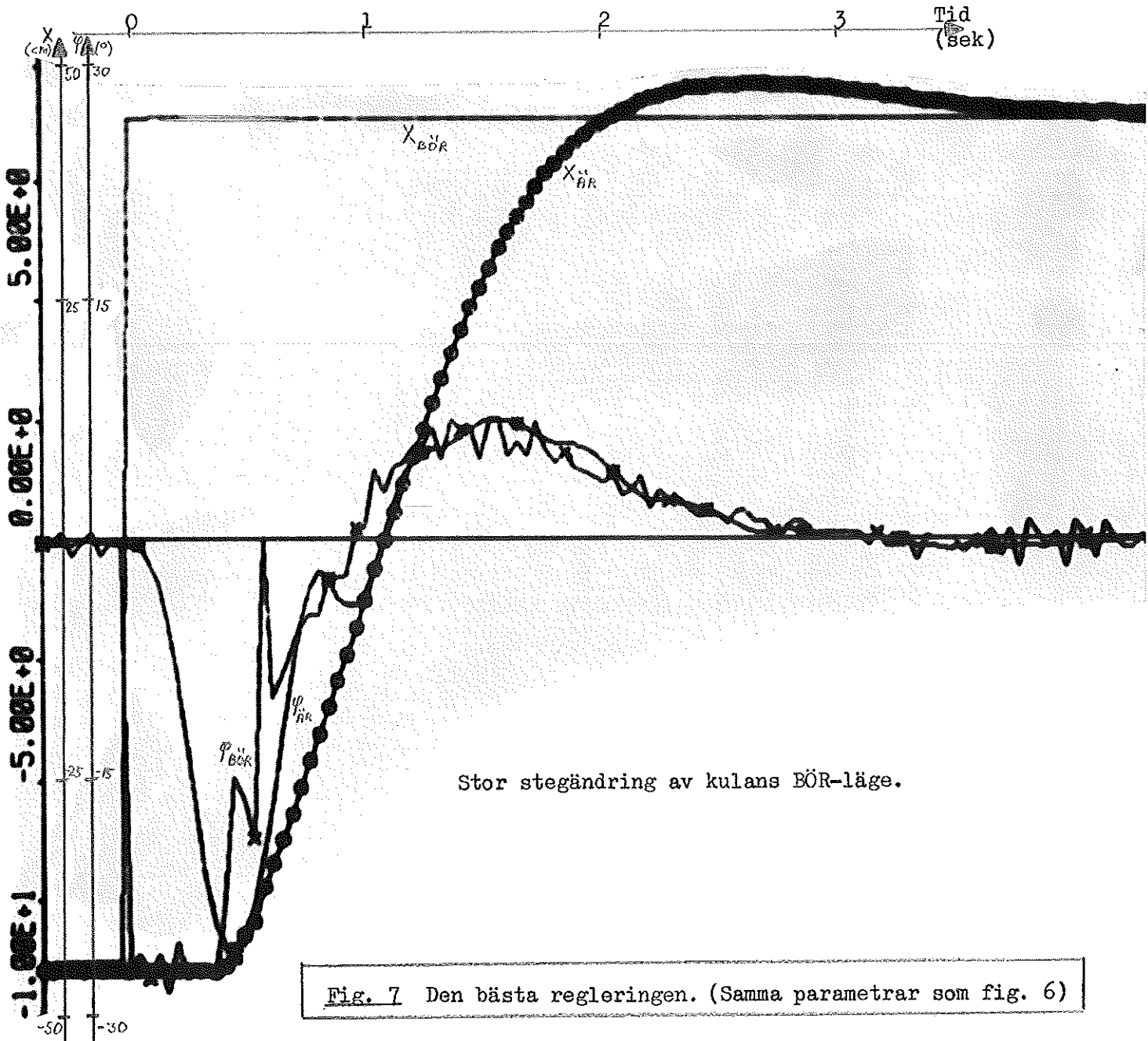


	T_s	K	T_i	T_d	G	D-alt	D-inp	I-ZON
R1:	0.04	3.0	0.6	0.15	30	REC	Y	3.0
R2:	0.04	-0.5	-	0.75	30	REC	Y	-

(LOW, Kula 3)



Liten stegändring av kulans BÖR-läge.



Stor stegändring av kulans BÖR-läge.

Fig. 7 Den bästa regleringen. (Samma parametrar som fig. 6)

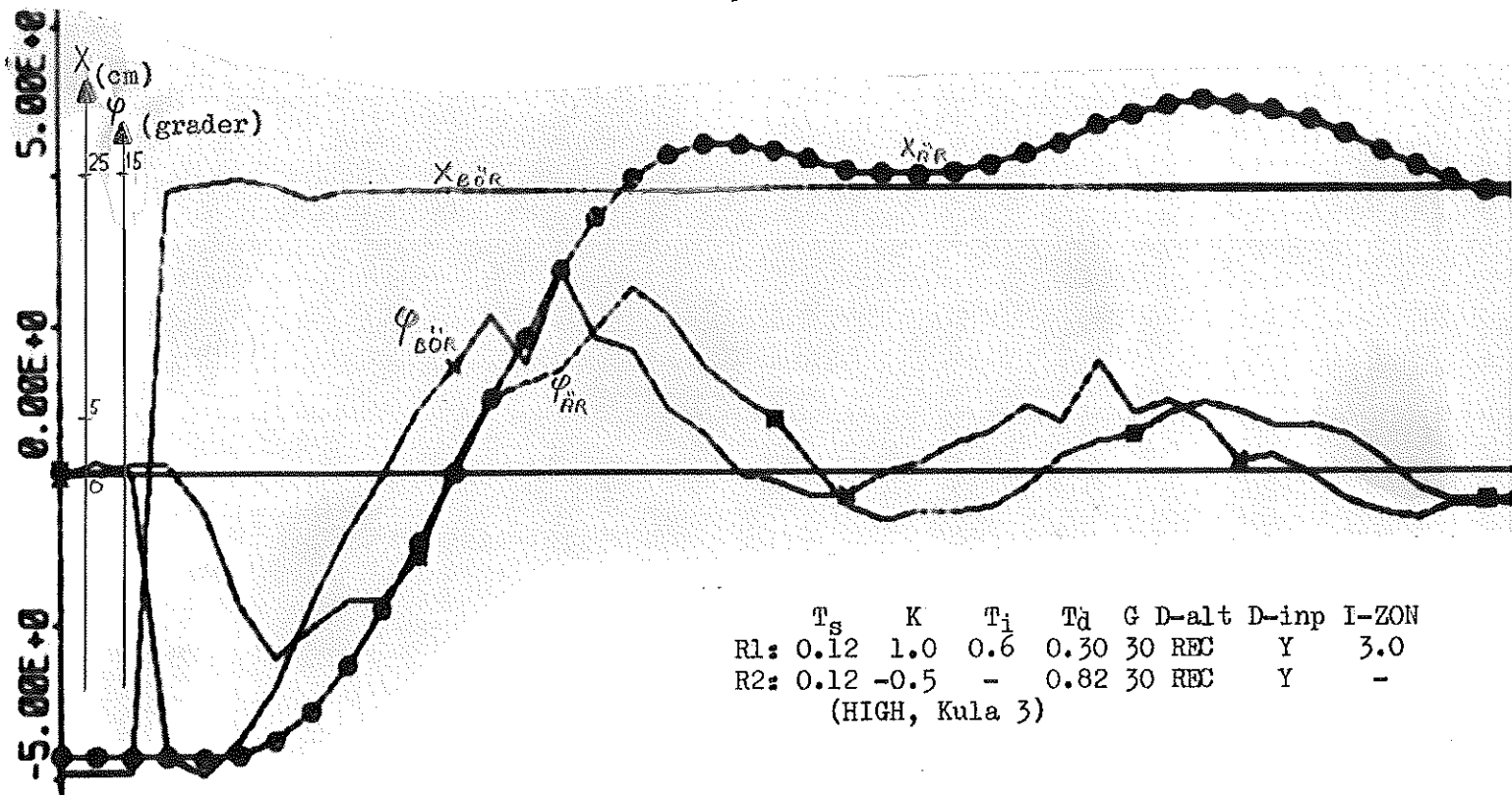


Fig. 9 Nytt styrvärde är inställt så fort det har beräknats (HIGH).

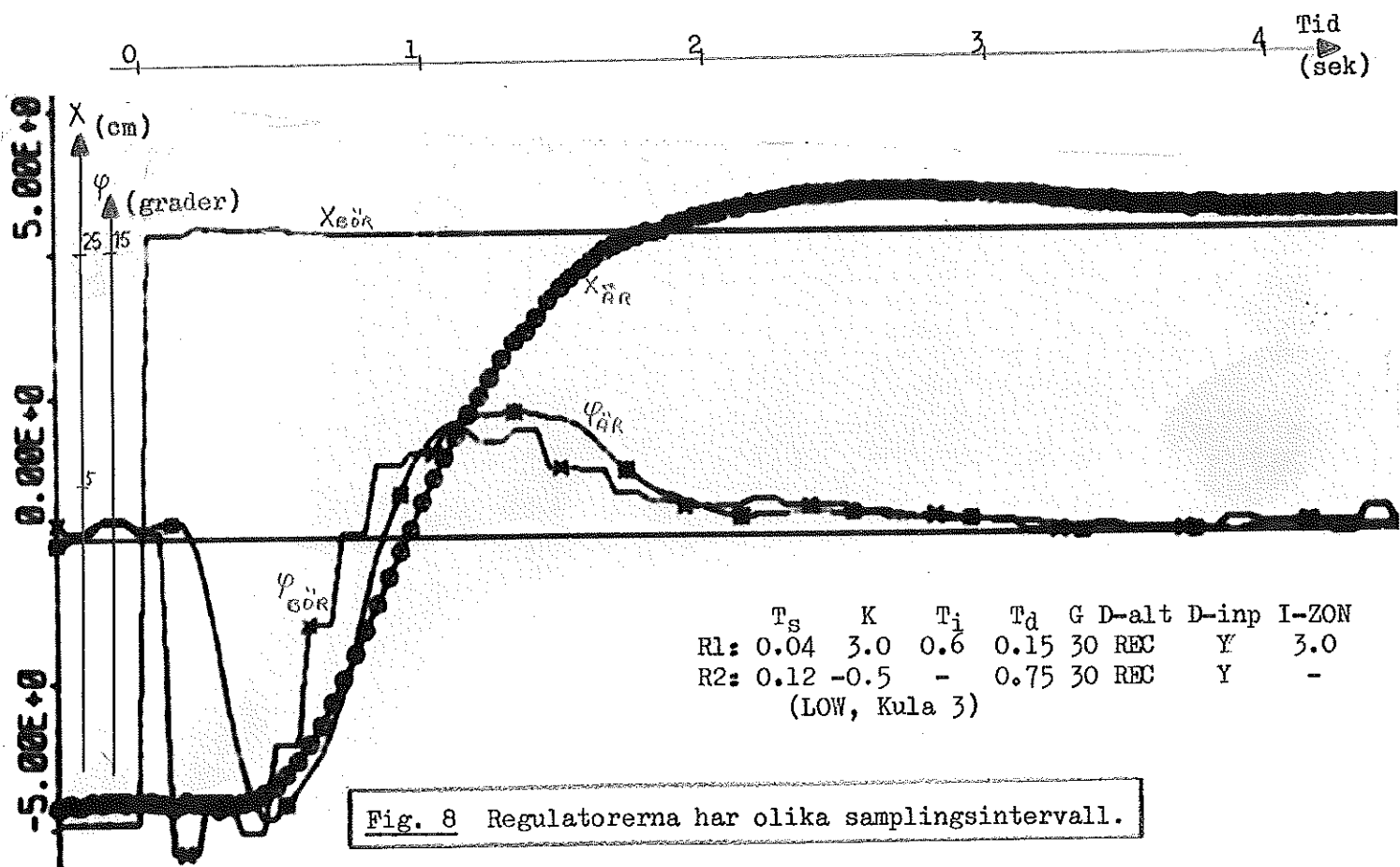


Fig. 8 Regulatorerna har olika samplingsintervall.

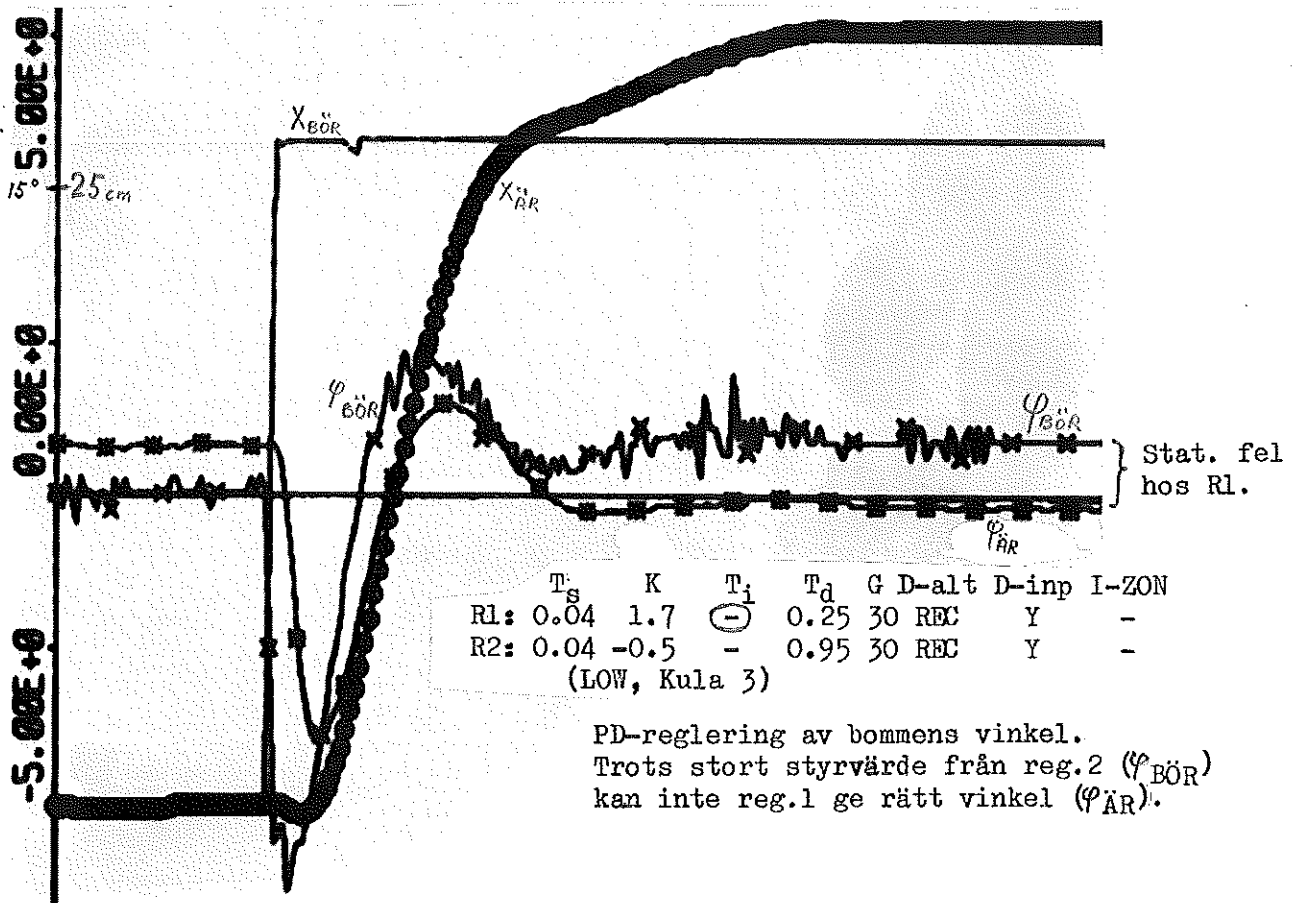
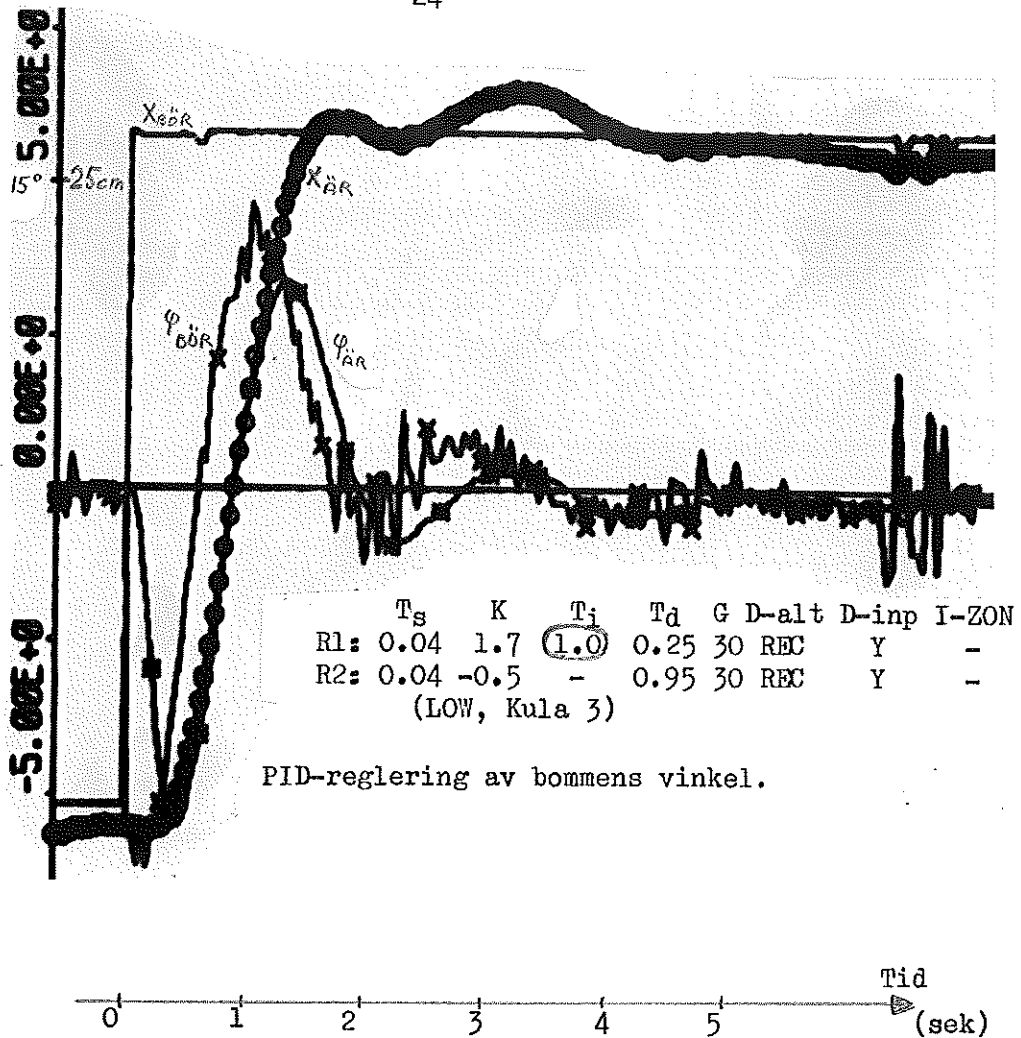
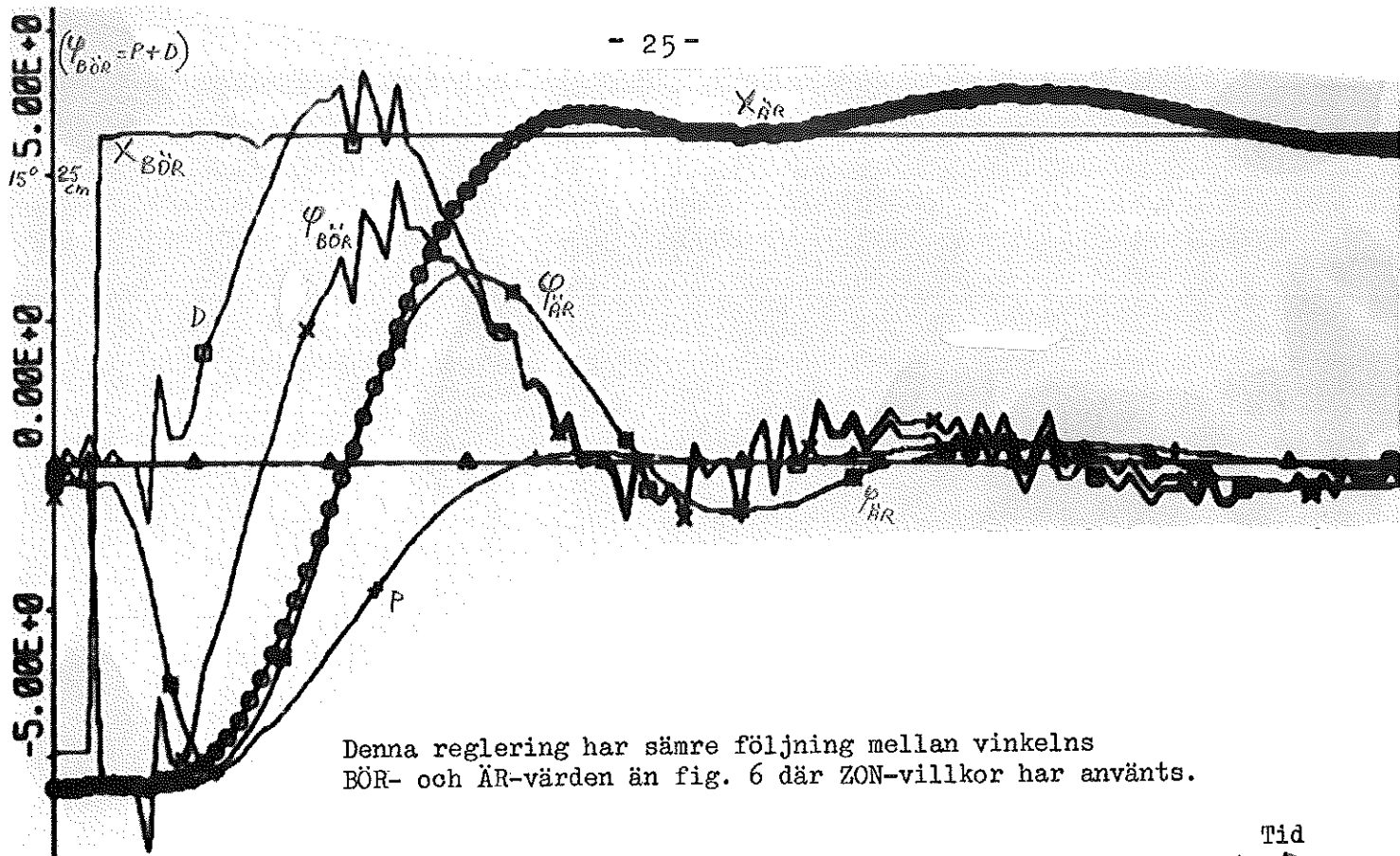


Fig. 10 Reglering med resp. utan I-del i vinkelreg. (R1).
 (Se sid. 16)



Denna reglering har sämre följning mellan vinkelns BÖR- och ÅR-värden än fig. 6 där ZON-villkor har använts.

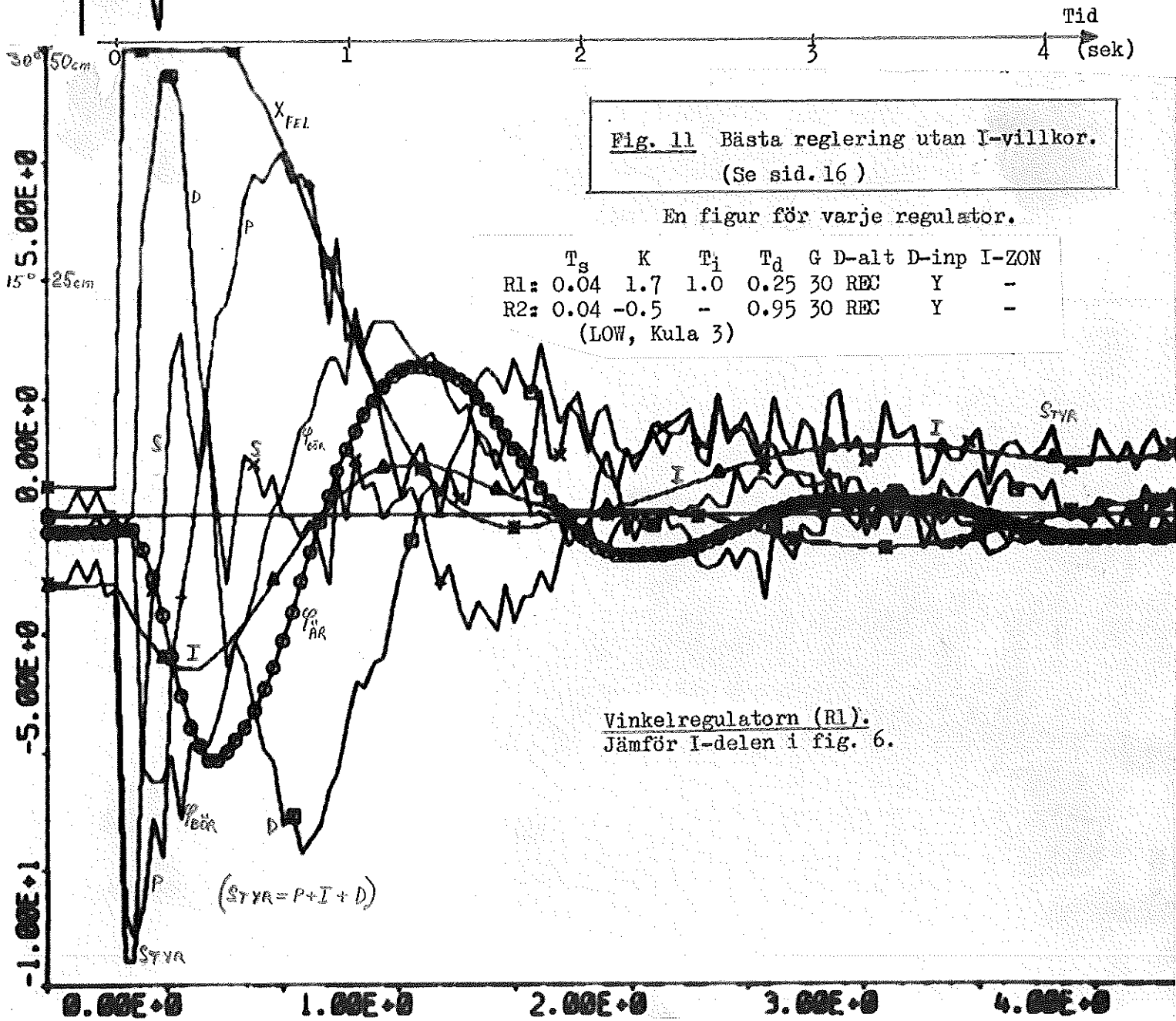


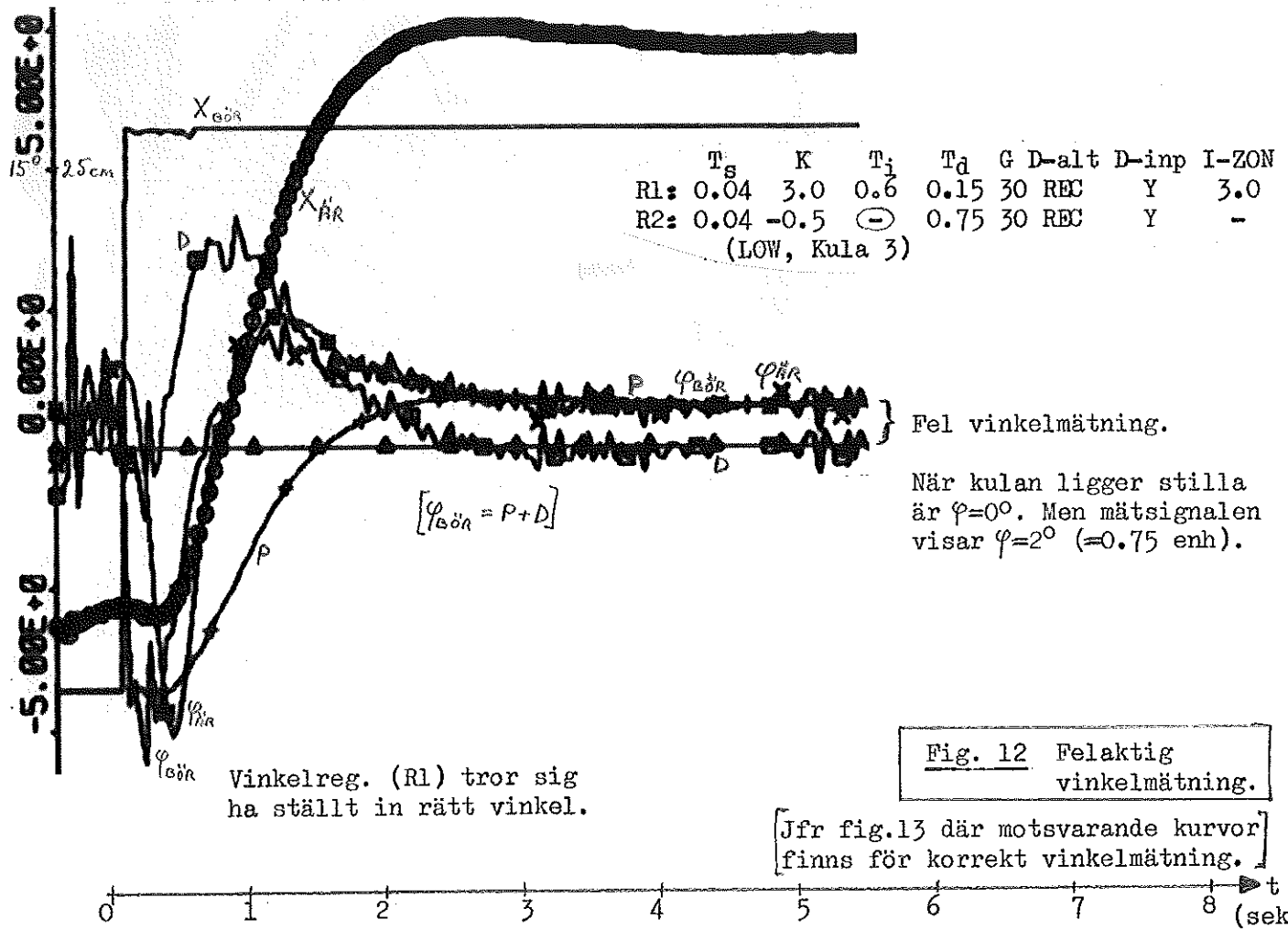
Fig. 11 Bästa reglering utan I-villkor.
(Se sid.16)

En figur för varje regulator.

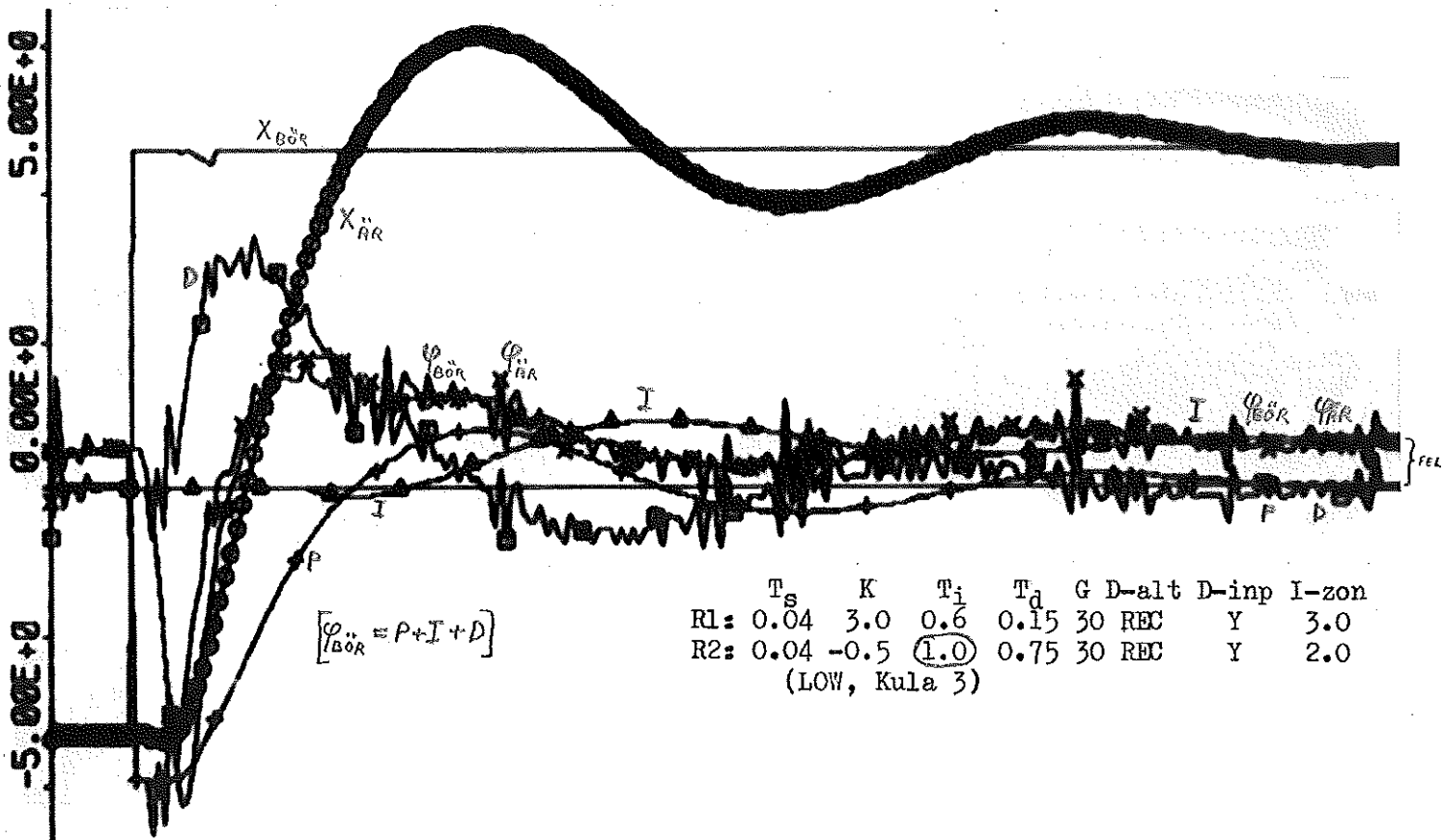
	T_s	K	T_i	T_d	G	D-alt	D-inp	I-ZON
R1:	0.04	1.7	1.0	0.25	30	REC	Y	-
R2:	0.04	-0.5	-	0.95	30	REC	Y	-

(LOW, Kula 3)

Vinkelregulatorn (R1).
Jämför I-delen i fig. 6.



Med I-del i lägesreg. (R2) kan det bestående lägesfelet summeras så att begärt vinkelvärde ökas.



	T_s	K	T_i	T_d	G	D-alt	D-inp	I-ZON
R1:	0.04	3.0	0.6	0.15	30	REC	Y	3.0
R2:	0.04	-0.5	0	0.75	30	REC	Y	-

(LOW, Kula 3)

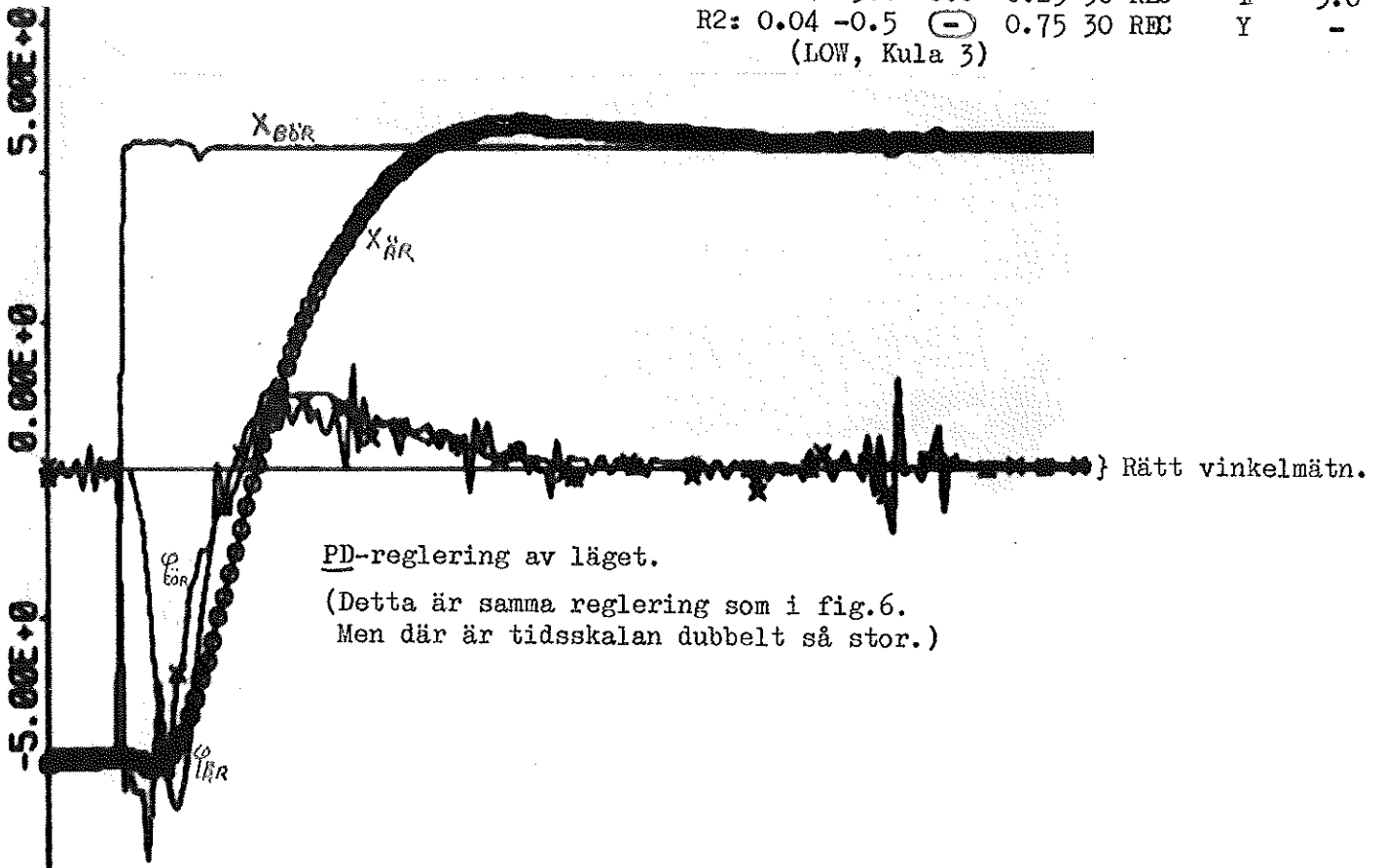
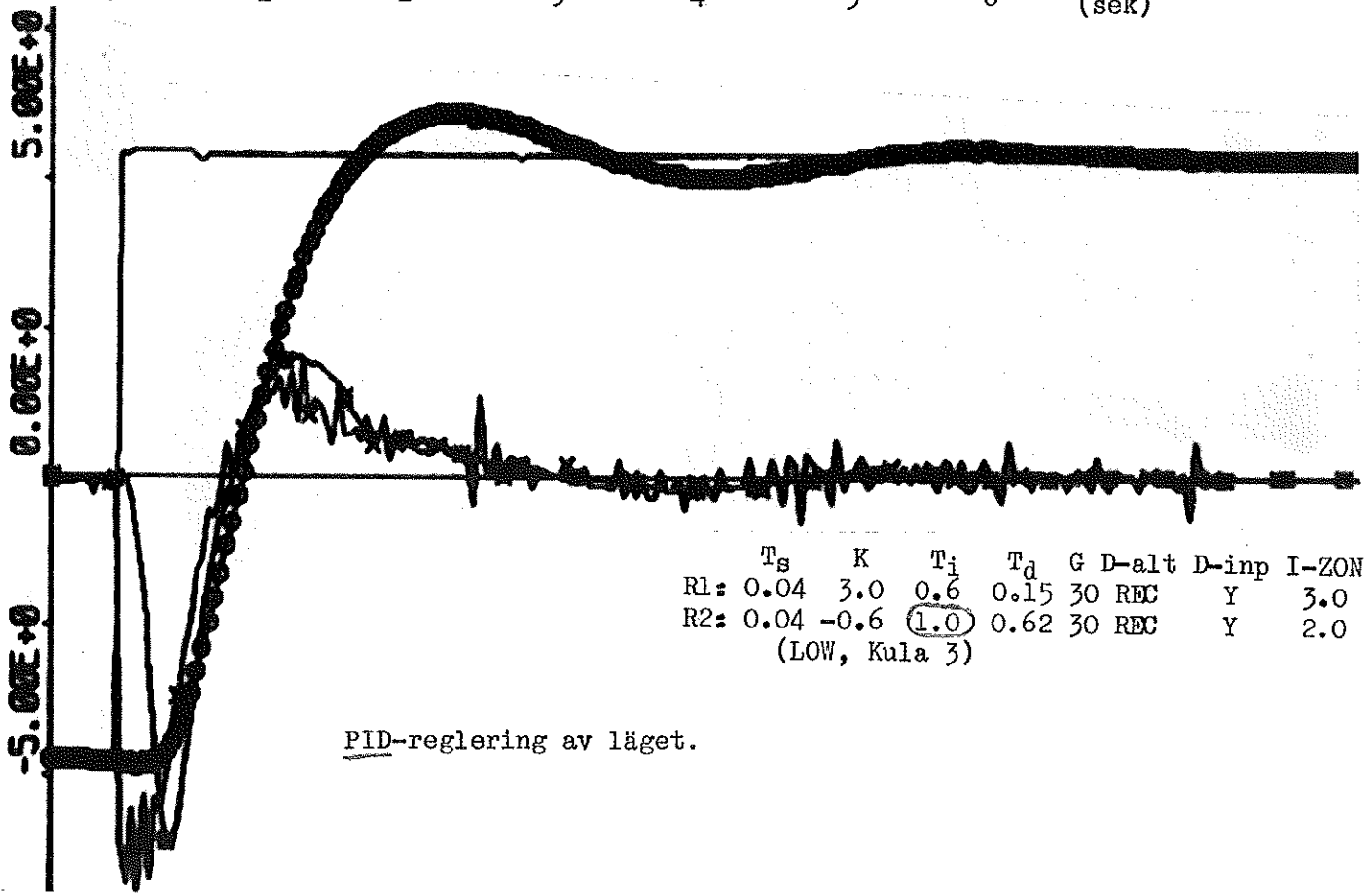
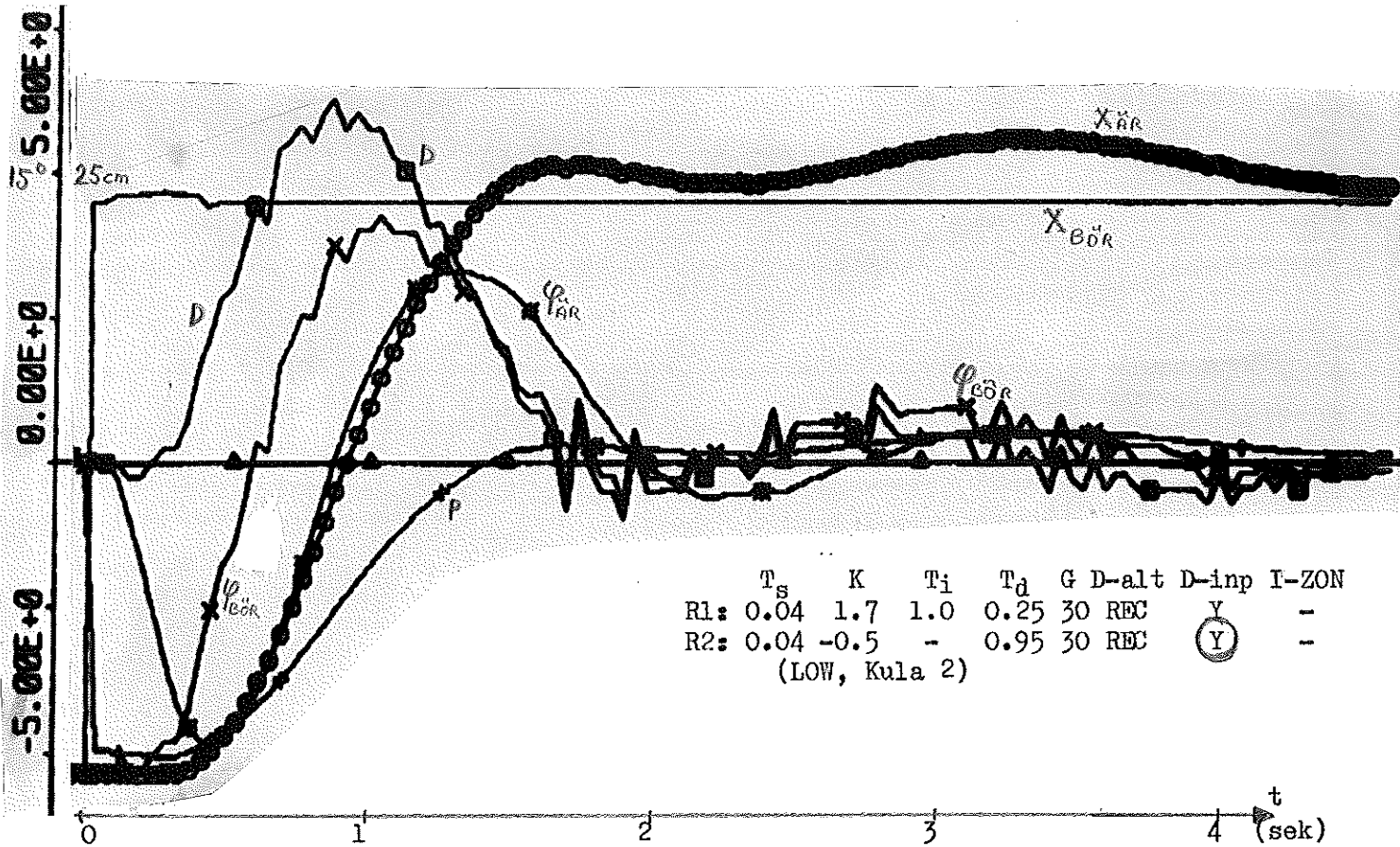


Fig. 13 Lägesregulator utan resp. med I-del.

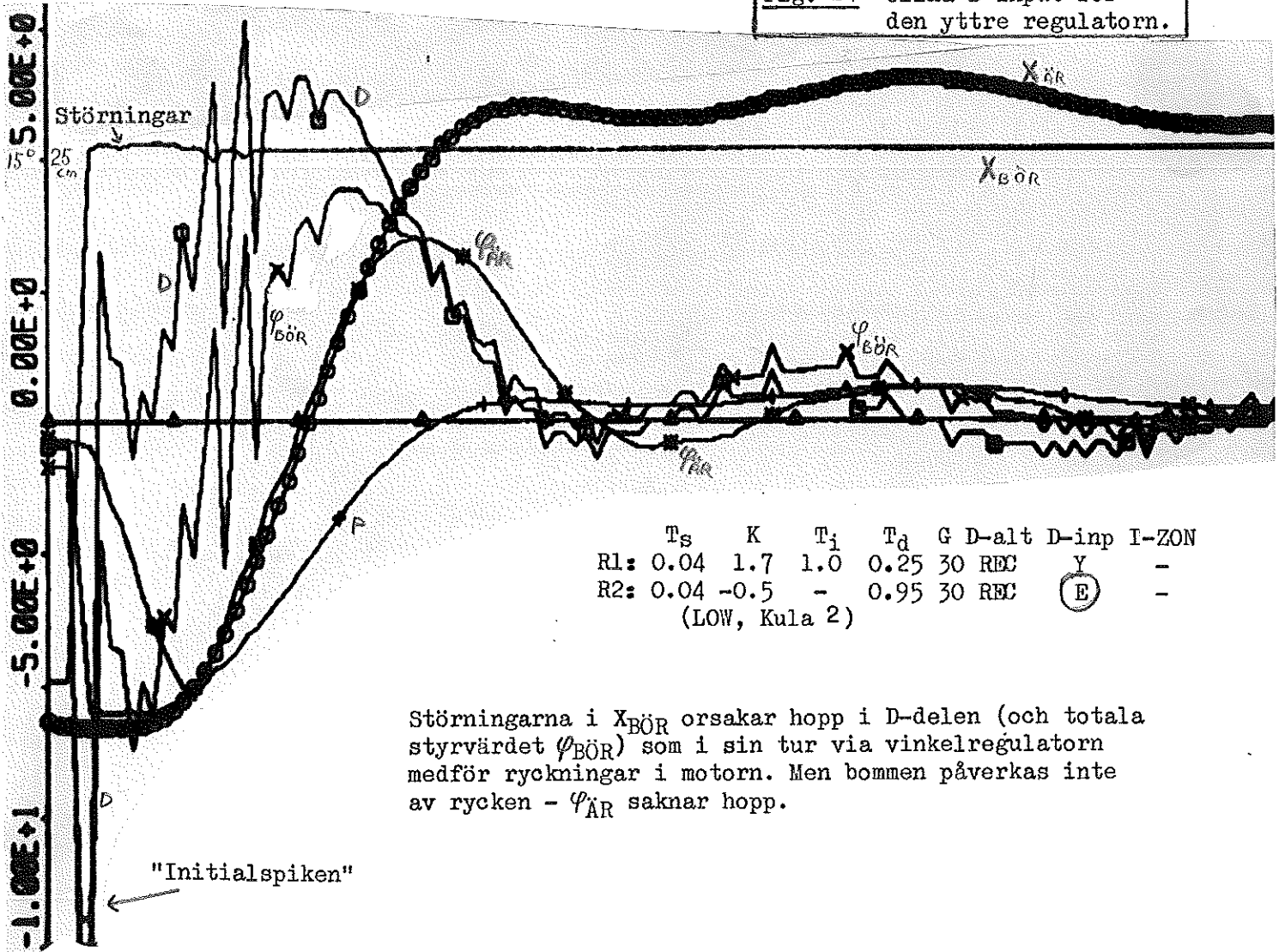
0 1 2 3 4 5 6 t (sek)





$(\varphi_{BOR} = P+D)$

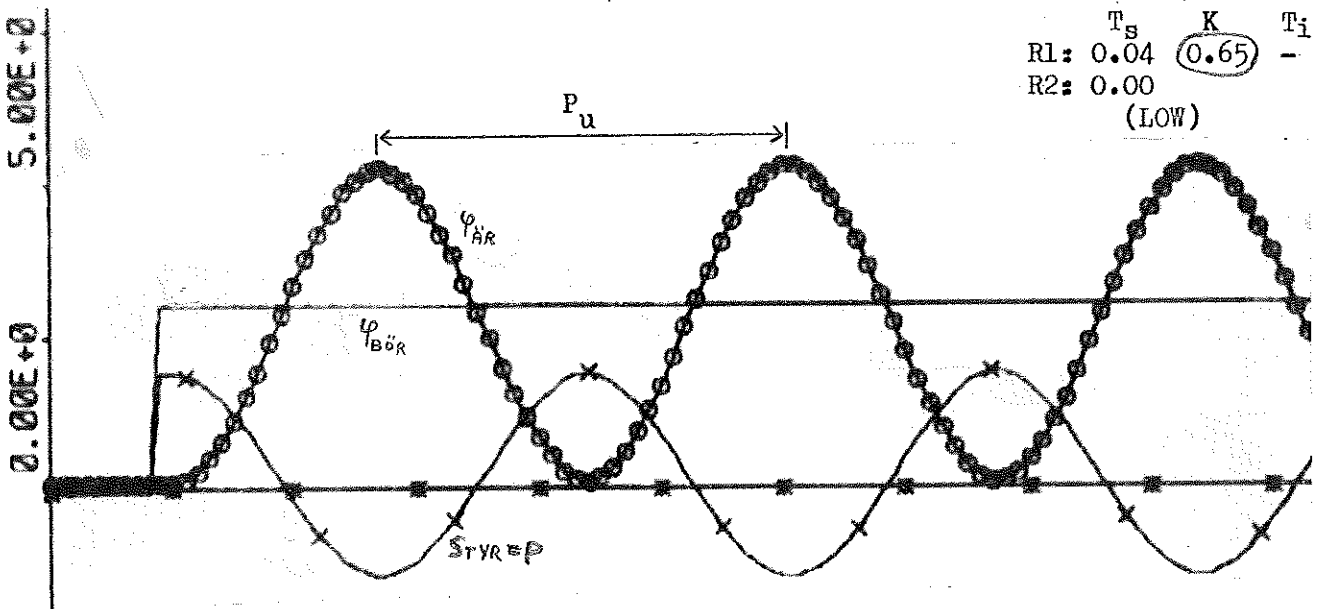
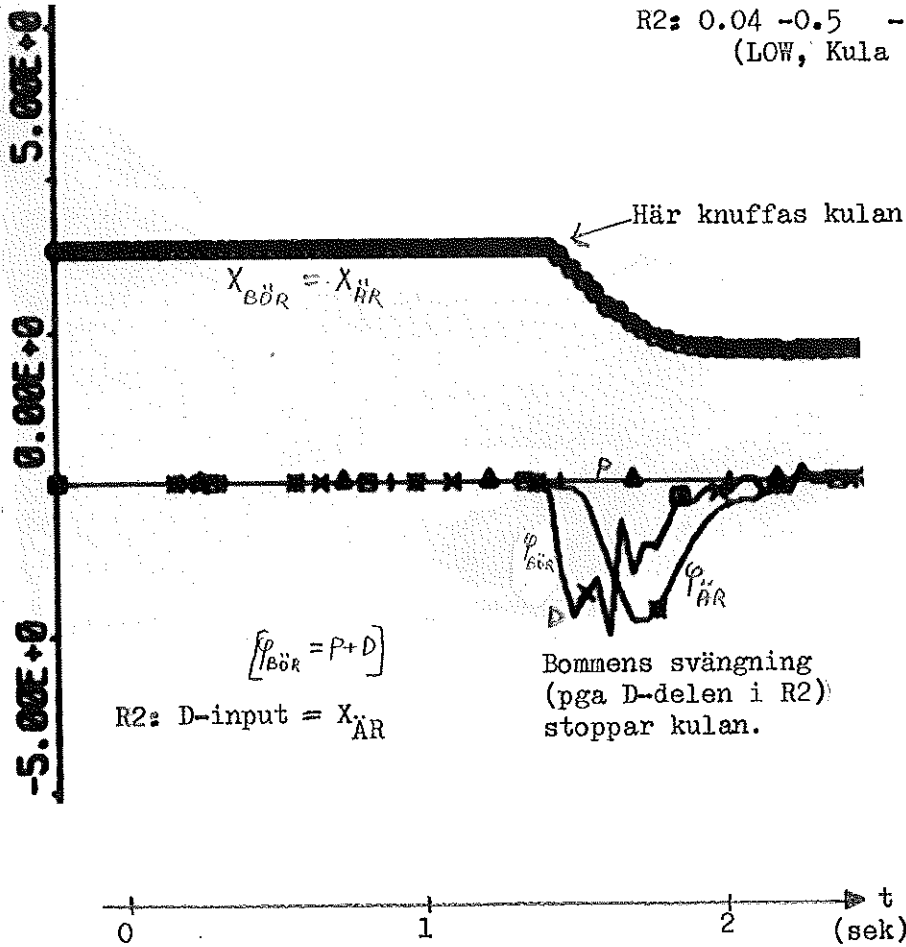
Fig. 14 Olika D-input för den yttre regulatorn.



Störningarna i X_{BOR} orsakar hopp i D-delen (och totala styrvärdet φ_{BOR}) som i sin tur via vinkelregulatorn medför ryckningar i motorn. Men bommen påverkas inte av rycken - φ_{AR} saknar hopp.

	T_s	K	T_i	T_d	G	D-alt	D-inp	I-ZON
R1:	0.04	3.0	0.6	0.15	30	REC	Y	3.0
R2:	0.04	-0.5	-	0.75	30	REC	(Y)	-

(LOW, Kula 3)



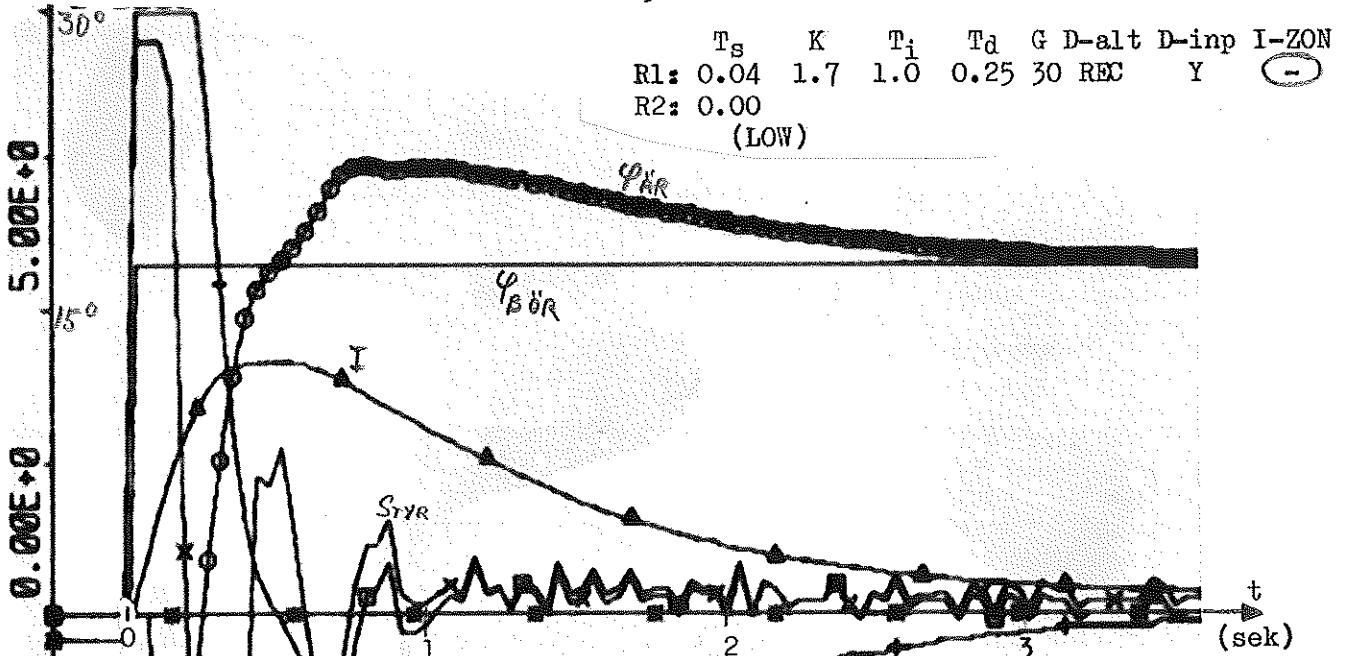
Med endast P-reglering inställes det K-värde som ger ett stegsvar med upprepade svängningar med konstant amplitud. Svängningsperioden P_u avläses.

Då föreslår Ziegler och Nichols följande PID-parametrar (kontinuerligt system och inget villkor på I-delen):

$$\begin{aligned}
 K &= 0.6 \cdot K_{max} \approx 0.4 & \left\{ \begin{array}{l} K_{max} = 0.65 \\ P_u = 1.4 \end{array} \right. \\
 T_i &= P_u / 2 = 0.7 \\
 T_d &= P_u / 8 = 0.2
 \end{aligned}$$

Fig. 16 Beräkning av lämpliga parametrar enl. Ziegler och Nichols.

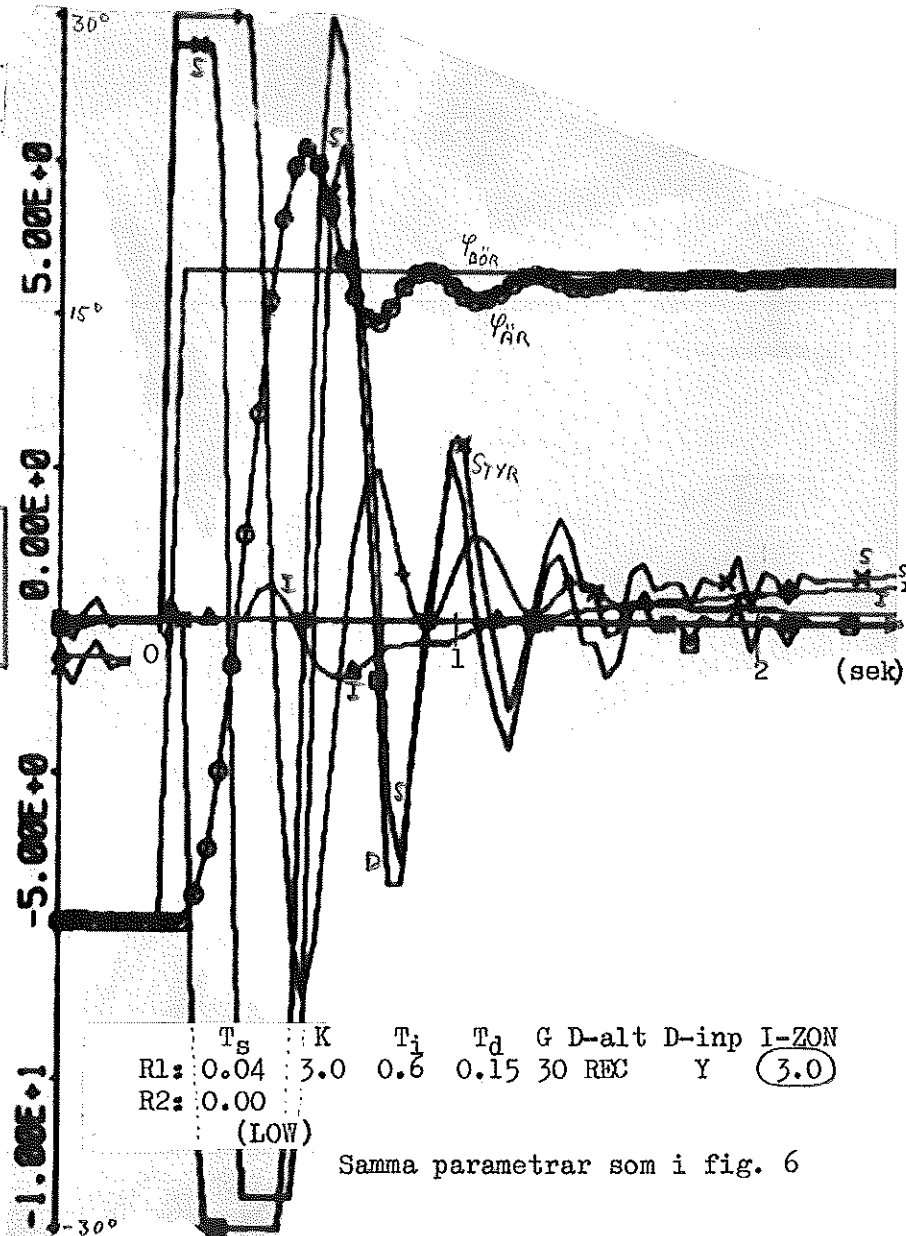
(Reglering av vinkel utan kula.)



Samma parametrar som i fig. 11

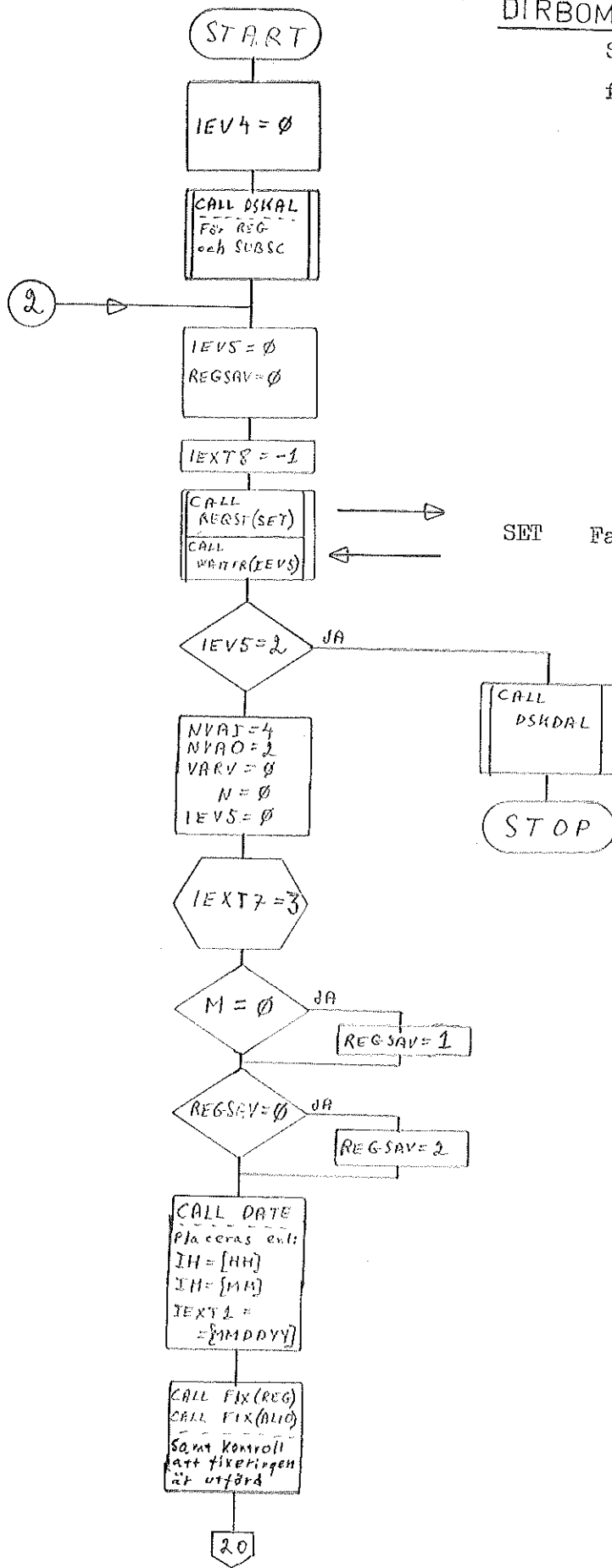
$(STYR = P + I + D)$

Fig. 17 Endast reglering av bommens vinkel utan kula. (Se sid. 19)

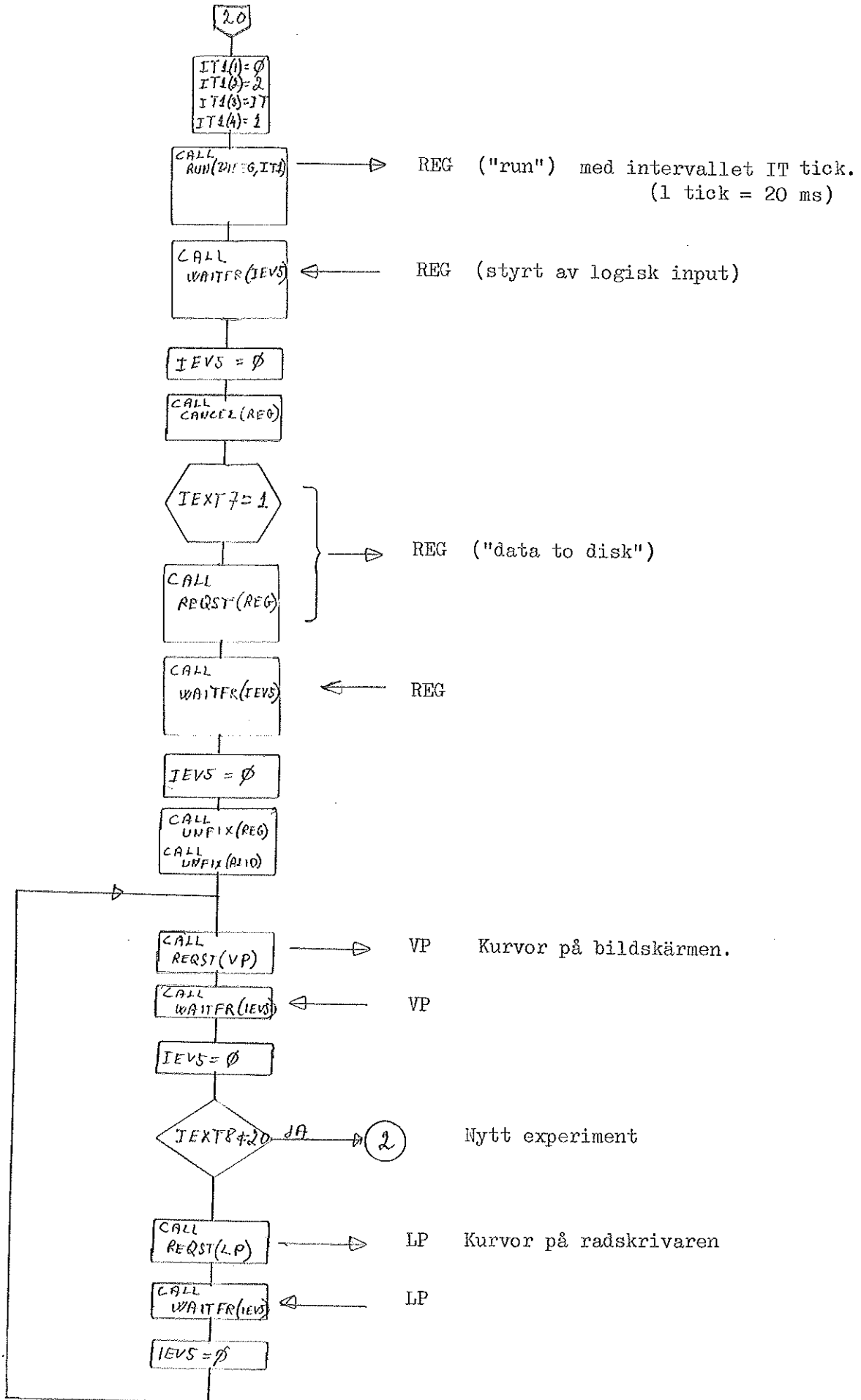


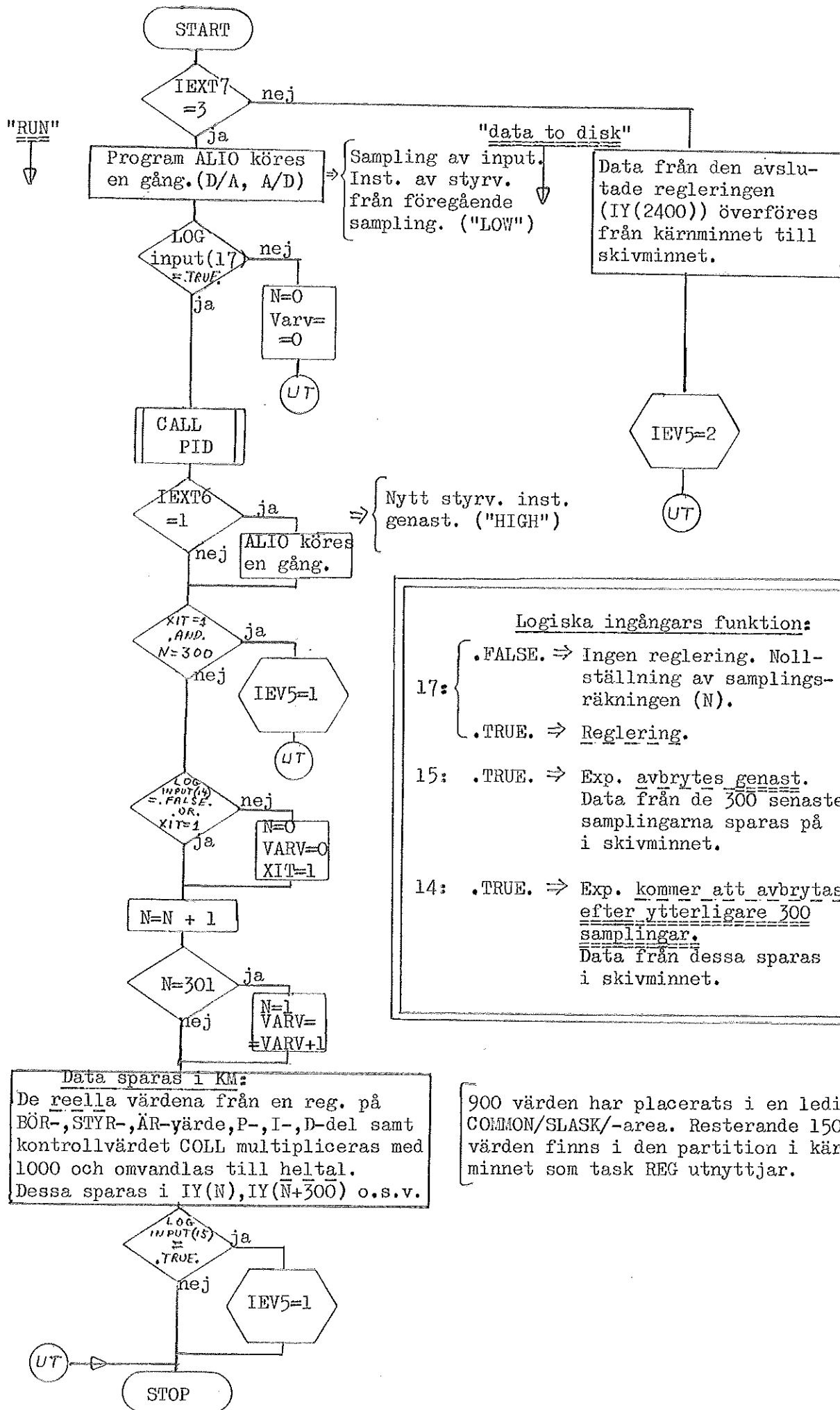
Samma parametrar som i fig. 6

Samtliga variabler utom IT1(4)
finns i COMMON-blank.



SET Fastställer parametrar o.dyl.





⇒ Nytt styrv. inst. genast. ("HIGH")

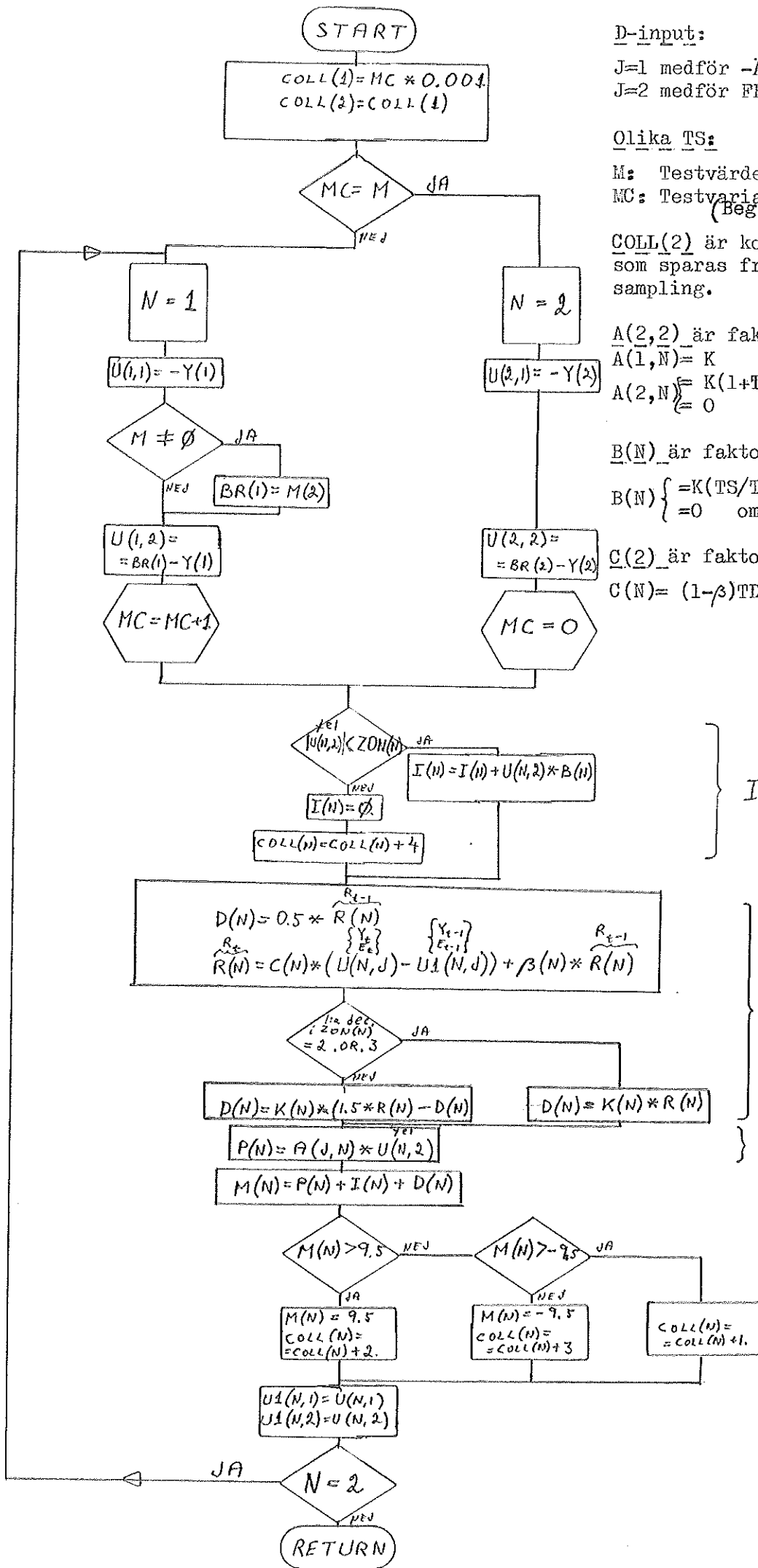
Logiska ingångars funktion:

17: {
 .FALSE. ⇒ Ingen reglering. Nollställning av samplingsräkningen (N).
 .TRUE. ⇒ Reglering.

15: .TRUE. ⇒ Exp. avbrytes genast. Data från de 300 senaste samplingsarna sparas på i skivminnet.

14: .TRUE. ⇒ Exp. kommer att avbrytas efter ytterligare 300 samlingar. Data från dessa sparas i skivminnet.

[900 värden har placerats i en ledig COMMON/SLASK/-area. Resterande 1500 värden finns i den partition i kärnminnet som task REG utnyttjar.]



D-input:

J=1 medför -ÄR-värdet
J=2 medför FEL-värdet

Olika TS:

M: Testvärde (=2TS/1TS)
MC: Testvariabel $\begin{cases} MC=M & \text{om } M \neq 0 \\ MC=1 & \text{om } M=0 \end{cases}$
(Beg. v. =)

COLL(2) är kontrollvärdet som sparas från varje sampling.

A(2,2) är faktor i P-delen.

$A(1, N) = K$
 $A(2, N) = \begin{cases} K(1+TD/TI) \\ 0 \end{cases}$ om $TI=0$

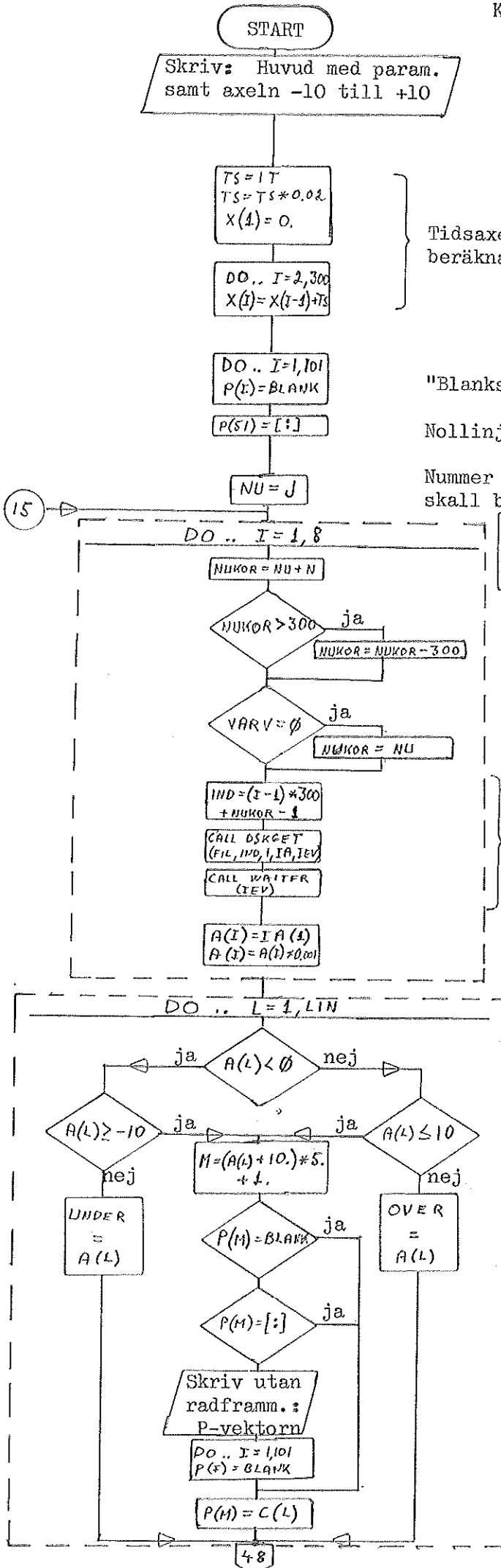
B(N) är faktor i I-delen.

$B(N) = \begin{cases} =K(TS/TI) \\ =0 \end{cases}$ om $TI=0$

C(2) är faktor i D-delen.

$C(N) = (1-\beta)TD/TS$

Kurvor plottas på radskrivaren.



Tidsaxeln beräknas.

"Blankställ" P-vektorn.

Nollinjen markeras med ":"

Nummer på den sampling som kurvorna skall börja med.

Från skivminnet hämtas data till de sju kurvorna och COLL-värdet för den aktuella samplingen.

Data är "ringlagrat" i en 300-vektor. Efter första varvet måste korrigering av samplingsnummret ske. (Senaste sampling är N och äldsta sampling är N+1.)

Data hämtas från skivminnet.

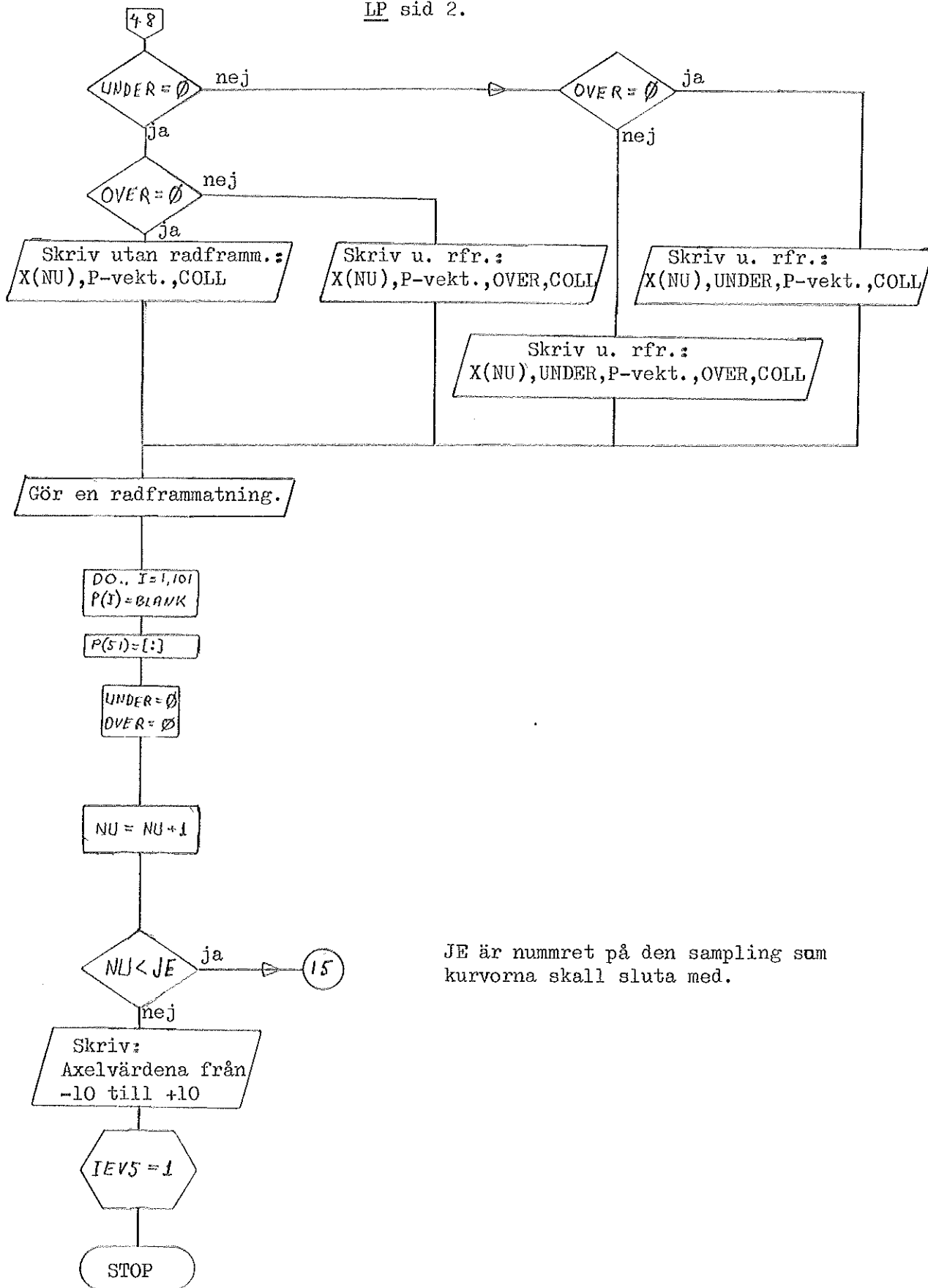
Det reella värdet placeras i A(8)-vektorn.

P(101)-vektorn tilldelas kurvornas tecken. Ev. värden utanför ±10.0 placeras i OVER resp. UNDER.

Skalningen medför 0.2 enheter per tecken på radskrivaren.

Om två kurvor sammanfaller sker en extra utskrift av P-vektorn.

C-vektorn innehåller tecknen som skall skrivas.



JE är nummret på den sampling som kurvorna skall sluta med.

REFERENSER.

- Fertik, H.A. - Direct Digital Control Algorithm With Anti-
Ross, C.W. Windup Feature, presenterat vid 22nd Annual
ISA Conference 11-14/9 1967. Publicerat av
Leeds & Northrup Company.
- Harriott, P. Process Control, McGraw-Hill, N.Y. 1964
- Lindorff, D.P. Theory of Sampled-Data Control Systems,
J. Wiley & Sons, N.Y. 1965
- Petterson, O. Prosessdatateknikk, Institutt for Regulerings-
teknikk, Norges Tekniske Høgskole, 1969
- Wieslander, J. Opublicerat material över experimentuppställ-
ningen "Bommen" vid Institutionen för Regler-
teknik, LTH