



LUND UNIVERSITY

Dimensionering av flytande ventilstyrning

Jensen, Lars

1973

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):
Jensen, L. (1973). *Dimensionering av flytande ventilstyrning*. (Research Reports TFRT-3059). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

Total number of authors:
1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

E DIMENSIONERING AV FLYTANDE VENTILSTYRNING[†]

L.H. Jensen

[†] Denna rapport avser anslag nr D 698 från Statens råd för byggnadsforskning till Institutionerna för byggnadskonstruktionslära och reglerteknik vid LTH.

<u>Innehållsförteckning</u>	Sida
Problemställning	3
Förenkling	3 - 5
Approximativ lösning	5 - 6
Normerat problem	6 - 7
Simulering	7
Exakt lösning	7 - 9
Normerat problem	9
Enstegsinreglering	10 - 11
Simulering	12
Glapp i ventildrift	12
Sammanfattning	13
Referenser	13
Figurer	14 - 19
Tabeller	20 - 25
Diagrambilaga	26 - 36

Problemställning.

Flytande reglering är ett enkelt sätt att styra blandning av två olika tempererade flöden till ett flöde med önskad temperatur. Även andra egenskaper än temperatur hos flöde kan tänkas styras. Den önskade temperaturen jämförs med den erhållna och är avvikelsen för stor, får en motor, som går konstant hastighet, en signal att öppna eller stänga reglerventilen. Ventilen kan ha olika karakteristik och vara av två- eller trevägstyp.

Normålt mätes temperaturen så nära blandningspunkten som möjligt för att undvika onödig tidsfördröjning, men hänsyn måste tas till att tillräcklig blandning skett. Detta gäller speciellt vid stora diametrar på rören. Problemställningen är hur påverkas reglerförloppet av

- motorställtid
- ventilkaraktistik
- tidsfördröjning
- tidskonstant hos givaren
- tillåten avvikelse
- största temperaturskillnad mellan de två inkommande flödena

Krav för att undvika självsvängning behandlas med hjälp av beskrivande funktion för relä med dödzon och Nyquist-kurva för övriga delen av reglerystemet. Detta ger en approximativ metod, som är enkel och stämmer något så när. Vidare kommer en exakt metod att tas fram, vilken bygger på att hela tidsförloppet löses för en självsvängning. Slutligen bestäms villkor för att en stegstörning med given amplitud kommer att slås ner på ett styringrepp.

Förenkling

Genom att göra vissa förenklingar är det möjligt att analytiskt beskriva reglerkretsen för ett visst val av de ingående parametrarna. Förenklingar är följande antagande:

- 1 Ventilmotor går med konstant hastighet K_m .
- 2 Ventilen är linjär och av trevägstyp och har förstärkningen K_v .
- 3 Transportfördröjningen är konstant T_d .
- 4 Flödets värmeutbyte med röret försummas.
- 5 Givare har en tidskonstant T_k .
- 6 Givare har förstärkningen 1.0.
- 7 Styrreläet har dödzone $\pm D$ och utsignalen 0, -1 eller 1.
- 8 Temperaturskillnaden mellan flödena är konstant U_{12} .

Att ventilen är linjär är oftast inte fallet, men om förstärkningen justeras så att den är lika med ventilens största förstärkning, fås en säker uppskattning.

En annan och bättre möjlighet är att studera olinjäriteten och insignalernas samverkan.

Insignal-utsignalsambandet för en olinjär ventil kan skrivas så här:

$$y(t) = f_1(x) u_1(t) + f_2(x) u_2(t)$$

Där

$y(t)$ utsignal

$u_1(t)$ insignal i

$f_1(x)$ ventilkarakteristik för insignal i

x ventilläge.

För små variationer i x kring en arbetspunkt fås för y följande variationer i utsignalen:

$$dy(t) = \left[\frac{df_1(x)}{dx} u_1(t) + \frac{df_2(x)}{dx} u_2(t) \right] dx$$

$$dy(t) = k dx$$

Här motsvarar k produkten $K_v U_{12}$ för en linjär ventil.

Alltså ersätter k $K_v U_{12}$ i den fortsatta behandlingen av problemet och olinjära ventiler kan approximeras till linjära ventiler, om variationerna är små i x .

Vidare är tidsfördröjningen T_d oftast inte konstant, men om den största tidsfördröjningen väljs, fås god marginal för andra fall.

Både ventilens olinjäritet och tidsfördröjning kan samverka på så sätt att, när ventilen arbetar i sitt känsligaste område kan flödet vara som störst och följaktligen tidsfördröjningen som minst och tvärtom. I sådana fall får man studera olika arbetspunkter var för sig, för att kunna bedöma om självsvängningar uppkommer. Inflödestemperaturerna antages vara konstanta. Om självsvängning inte kan undvikas för detta fall, så går det inte heller för det allmänare fallet.

Att analysera reglersystemet med ett eller två varierande flöden är omöjligt att göra då ventilen fungerar som en multiplikator.

Approximativ lösning.

Reglersystemet utom styrreläet kan nu beskrivas analytiskt med en överföringsfunktion. Efter reläets utgång sitter en ventilmotor, vilket motsvaras av en integrator med en viss förstärkning K_m . Motorn styr den linjära ventilen med förstärkningen K_v . Genom att inflöden är konstanta multipliceras endast temperaturskillnaden eller motsvarande för olinjära ventiler med ventilläget. Genom röret fås en transportfördröjning, som har överföringsfunktionen e^{-sT_d} . Givaren har överföringsfunktionen $1/(sT_k+1)$. För att ytterligare underlätta analysen sätts reläet lika med ett enhetsrelä med dödzon $+1$. Den ursprungliga dödzonbredden D ingår nu istället i överföringsfunktionens linjära del, som är följande:

$$G(s) = \frac{K_m \cdot K_v \cdot U_{12} e^{-sT_d}}{s(sT_k+1)D}$$

Genom att tillämpa Nyquistteoremet med beskrivande funktion [1] för relä med dödzon tillsammans med Nyquistkurvan för $G(s)$ kan uppkomst av självsvängning avgöras. Metoden med beskrivande funktion är approximativ, då den endast tar hänsyn till grundtonen i reglersystemet. Olinjäriteten genererar övertoner till grundtonen, men om den linjära delen av reglersystemet dämpar höga frekvenser kraftigt, kan dessa försummas och metoden ger bra resultat. Den beskrivande funktionen har ingen fasförskjutning och har följande amplitudgång:

$$Y_N(C) = \frac{4}{\pi C} \sqrt{1-1/C^2} \quad C > 1$$

Här är C amplituden hos insignalen till reläet. Insignalen antages vara

$C \cdot \sin(\omega t)$. Deriveras $Y_N(C)$ med avseende på C fås maximum för $C = \sqrt{2}$ och då är $Y_N(\sqrt{2}) = 2/\pi$

Genom att tillämpa Nyquistteoremet ser man, eftersom $Y_N(C)$ är reell och positiv, att $-1/Y_N(C)$ ligger på negativa reella axeln och närmast origo för $C = \sqrt{2}$ och på avståndet $\pi/2$, vilket medför att om Nyquistkurvan skär negativa axeln för större värden än $-\pi/2$, fås inga självsvängningar. Hur detta skall göras effektivt behandlas i nästa avsnitt.

Normerat problem.

Genom att normera överföringsfunktionen kan enkla tabeller ställas upp för att bestämma självsvängning eller för att undvika detsamma. Normeringen görs så att tidsfördröjningen alltid är en tidsenhet i tabellerna.

$$s' = s T_d' \quad T_d' \text{ dimensionslös}$$

Vilket medför att $G(s)$ blir:

$$G(s) = \frac{K_m K_v U_{12} T_d' e^{-s T_d'}}{D(s) T_d' (s T_d' T_k' / T_d' + 1)}$$

Vilket medför att $G(s')$ blir:

$$G(s') = \frac{K' e^{-s'}}{s' (s' T_k' + 1)}$$

$$K' = K_m K_v U_{12} T_d' / D$$

$$T_k' = T_k / T_d'$$

Den normerade överföringsfunktionens största negativa skärning med reella axeln har beräknats för tidskonstanterna 0.01 (0.01) 1.00 tidsenheter och 1.0 (1.0) 100. tidsenheter.

I tabellerna har istället den största tillåtna förstärkningen tabellerats, vilken är lika med $\pi/2$ dividerat med tidigare nämnd skärning. Se tabellerna 1 och 2.

För en given tidsfördröjning fås en normerad tidskonstant, Ur tabellerna fås sedan en förstärkning, som jämföres med den egna förstärkningen K' och om K' är mindre fås ingen självsvängning.

Om självsvängning erhålles kan antingen förstärkningen minskas genom att använda långsammare motor eller tillåta större avvikelse eller antingen genom att välja mindre tidskonstant.

Det bör observeras att om självsvängning fås kan amplituden variera mellan olika fall trots att samma normerade överföringsfunktion har använts i båda fallen. t ex $K_{m1}/D_1 = K_{m2}/D_2$.

Simulering

Sex olika fall har simulerats med olika förstärkningar och olika störningar. Tidsfördröjningarna har varit på 0.5, 1.0 och 2.0 tidsenheter. Tidskonstanterna har varit 1.0 och 10.0 tidsenheter. Förstärkningen valdes så att de blev 110 %, 90 % och 50 % av förstärkningen på stabilitetsgränsen. Störningarna var i form av steg på ena insignalen från +35 till -25 och från -15 till -25. Den andra insignalen var konstant 25. Störningen skedde efter 5 tidsenheter och hela simuleringstiden omfattar 80 tidsenheter.

Av simuleringarna framgår det att samtliga 110 % fall är instabila, vilket var väntat, men även de 90 % fall med tidskonstanter på 10 tidsenheter.

Eftersom metoden är en approximativ metod behöver man ej förvånas över resultatet. I nästa avsnitt kommer en exakt metod att tas fram.

Exakt metod.

Om en symmetrisk självsvängning äger rum, kan med tidigare antagande samtliga tidsförlopp bestämmas såväl ventilläge, flödestemperatur och uppmätt flödestemperatur. Självsvängningens amplitud antages vara y , arbetstiden för motor t_a , insvängningstiden för givaren t_b och den totala förstärkningen K . Vidare antages t_a vara större än 1 tidsenhet.

En självsvängning består av två arbetsperioder t_a och två insvängningsperioder t_b . (se fig. nr 4).

För den uppmätta temperaturen gäller då följande:

$y_m(0) = 1$	arbetsperioden börjar
$y_m(t_a) = 1$	" slutar
$y_m(t_a + t_b) = -1$	nästa arbetsperiod börjar
$y_m(2t_a + t_b) = -1$	" " slutar
$y_m(2t_a + 2t_b) = 1$	perioden är fullbordad

Vidare bestäms $y_m(t)$ av följande differentialekvation:

$$\frac{dy_m(t)}{dt} = (y(t) - y_m(t))/T_k$$

$y(t)$ flödets temperatur vid givaren

$y_m(t)$ flödets uppmätta temperatur

T_k givarens tidskonstant

Då $y(t)$ är känd i intervallet $(0, t_a)$ kan ett samband fås mellan t_a , T_k och K , genom att integrera differentialekvationen för $y_m(t)$ under en arbetsperiod.

$$y_m(t_a) = e^{-t_a/T_k} \cdot y_m(0) + \int_0^{t_a} e^{-(t_a-s)/T_k} \cdot y(s)/T_k \, ds + \int_1^{t_a} e^{-(t_a-s)/T_k} \cdot y(s)/T_k \, ds \quad (1)$$

Här är

$$y(t) = y \quad 0 \leq t \leq 1$$

$$y(t) = y - K \cdot (t-1) \quad 1 \leq t \leq t_a$$

Vidare gäller följande enkla samband:

$$y = K \cdot t_a / 2 \quad (2)$$

Genom insättning av randvillkor och ekvation (2) i ekvation (1) fås slutligen efter förenkling följande uttryck:

$$F(t_a, T_k, K) = (K t_a / 2 - 1)(1 - e^{-t_a/T_k}) - K(t_a - 1) + K T_k (1 - e^{-(t_a-1)/T_k}) \quad (3)$$

Om F är mindre än noll för alla t_a , finns det inga lösningar t_a ,

men om F är större än noll, finns det två rötter.

Stabilitetsgränsen fås då när de två rötterna övergår till en dubbelrot och det ytterligare nödvändiga kravet blir att tangering sker i roten dvs

$$\frac{\partial F}{\partial t_a} = 0$$

Normerat problem.

Tidsfördröjningen valdes som tidsenhet i likhet med tidigare.

För att bestämma stabilitetsgränsen för olika T_k , varierades K så att endast en rot t_a erhöles till ekvation (3). Om K var tillräckligt liten, erhöles ingen rot och ingen självsvängning.

Detta gjordes med en minimeringsalgoritm genom att kräva följande:

$$F(t_a, T_k, K) = 0$$

$$\frac{\partial F(t_a, T_k, K)}{\partial t_a} = 0$$

Följande funktion minimeras:

$$G(t_a, K) = F(t_a, T_k, K)^2 + \left(\frac{\partial F(t_a, T_k, K)}{\partial t_a} \right)^2$$

Stabilitetsgränsen har tabellerats för olika värden på tidskonstanten T_k . Vid rätt resultat skulle alltså $G(t_a, K) = 0$. För de olika T_k , som tabellerades, erhöles funktionsvärden på 10^{-16} och mindre.

Vid minimeringen av $G(t_a, K)$ kan lätt lokala minima uppstå. Deras inverkan eliminerades genom att öka staffet för derivatan i funktionen. En faktor 100 gav bra resultat.

Resultatet finns tabellerat för tidskonstanterna 0.1(0.01) 1.00 tidsenheter och 1.0(1.0)100.0 tidenheter i tabellerna 3 resp 4. Se även figur 5 och 6. Simulering se simulering approximativ metod och diagrambilaga.

Enstegsinreglering.

Krav för att undvika självsvängning har ställts upp i de tidigare avsnitten, men vilken förstärkning som är lämplig för en reglerkrets beror dels på hurudana störningarna är och dels på hur det efterföljande systemet dämpar dåligt nerreglerade störningar.

I detta avsnitt skall villkor ges för att ett styringrepp skall slå ner en stegstörning med en viss given amplitud. Den största tillåtna förstärkningen kommer att bero på tidskonstanten och stegstörningens amplitud. Tidsfördröjningen väljes som tidsenhet.

Exakt samma lösningsförfarande som vid den exakta metoden kan användas med enda skillnaden att $y(t)$ ej är periodisk utan följande:

$$\begin{aligned} y(t) &= y & t &\leq 1 \\ y(t) &= y - K(t-1) & 1 < t \leq t_a + 1 \\ y(t) &= -1 & t > t_a + 1 \end{aligned}$$

Här är alltså $y(t)$ precis på den undre gränsen efter enstegsinreglering och $y_m(t)$ kommer att svänga in mot detta värde.

Ett givet samband är:

$$y + 1 = K t_a \quad (4)$$

Med ekvationen (4) insatt i ekvation (1) och med randvillkor fås följande ekvation:

$$e^{-t/T_k} - 1 + (y + 1) (1 + T_k - T_k e^{-(t_a-1)/T_k/t_a}) = 0 \quad (5)$$

En skillnad mot tidigare är att här är y känd, eftersom enstegsinreglering skall slå ner en stegstörning med en given amplitud. För ett givet T_k och y kan t_a lätt bestämmas och därmed också K .

Ekvationen har en rot $t_a > 1$ approximativt lika med $(T_k + 1)(y + 1)/2$

Tabeller för förstärkningen K har tagits fram som funktion av T_k och y . Amplituden y har varierats från 2,5,10 till 100 och tidskonstanten 0.01(0.01)1.00 och 1.0(1.0)100. Se tabellerna 5-12 och figurerna 5 och 6. Det visar sig att för stora amplituder y blir de tillåtna förstärkningarna lika oavsett amplituden y . Detta har sin förklaring, eftersom givaren har ett rampföljfel, vilket tillsammans med tidsfördröjningen bestämmer den största tillåtna förstärkningen K för att enstegsinreglering skall ske. Följande måste då gälla:

rampfel + tidsfördröjning \cdot förstärkning = 2 \cdot toleransen i utsignal

$$f_r + K \cdot 1 = 2 \quad (5)$$

Rampen är:

$$y(t) = K \cdot t$$

Givaren följer rampen som:

$$y_m(t) = K \cdot t - K \cdot T_k (1 - e^{-t/T_k})$$

$$y_m(0) = 0 \quad (\text{betydelselöst})$$

För stora t fås:

$$f_r = y(t) - y_m(t) \approx K \cdot T_k$$

Alltså ger ekvation (5):

$$K = 2/(1+T_k)$$

Detta stämmer väl överens med tidskonstanter över 5 tidsenheter och för amplituden större än 10 enheter. Av detta framgår det att det finns en undre gräns för förstärkningen i reglersystemet under vilken man ej förbättrar enstegsinreglering för stora stegstörningar, eftersom amplituden är begränsad.

Det bör observeras att om enstegsinreglering fås för en viss amplitud så fås ej tvåstegsinreglering för en amplitud motsvarande kvadraten på den förra.

Simulering.

Detta har gjorts med två olika amplituder på störningen och med fyra olika tidskonstanter. Amplituderna var 5 och 10 ggr toleransen och tidskonstanterna var 1, 2, 5 och 10 tidsenheter. Tidsfördröjningen var som vanligt 1 tidsenhet. Förstärkningen anpassades för att slå ner störningen i ett steg. Vid simuleringen varierades amplituderna ± 0.5 enheter kring tidigare uppgivna värden för att kontrollera att enstegsinreglering erhöles i det ena fallet med den mindre amplituden och att mer än ett steg krävdes i det andra fallet.

Resultatet blev att samtliga fall med enstegsinreglering stämde, medan hälften av flerstegsinregleringsfallen slogs ner på ett regleringrepp. Utsignalen var endast 0.01 enheter från toleransgränsen på 1.0 enheter och simuleringsfelet kan uppskattas till 0.01 enheter (tidsteget \cdot förstärkningen).

Glapp i ventildrift

Glapp kan behandlas som en ren tidsfördröjning. Om glappet antages vara x_g längdenheter och motorhastigheten K_m längdenhet/tidsenhet, vid självsvängning fås att glappet märks som en tidsfördröjning $T_g = x_g / K_m$ tidsenheter. Alltså kan tidsfördröjningen ökas med den av glappet orsakade. Samma tabeller kan användas, om glappet x_g och ventilhastigheten K_m fixeras. Samma förfarande kan användas vid enstegsinreglering. Starttillståndet hos glappet är då väsentligt och måste fixeras.

Sammanfattning

Av tabeller och figurer framgår det att en förstärkning större än 2 alltid kommer att ge ett instabilt system. En enkel förklaring är att systemet kan under en tidsfördröjning ändra utsignalen mer än hela toleransintervallet. En förstärkning lika med eller mindre än 1 kommer däremot alltid att ge ett stabilt system.

Den tillåtna förstärkningen för stabilitet påverkas direkt av K_m , K_v , U_{12} , T_d och D^{-1} . Inverkan från T_k är mycket svagare, om T_k ändras från 0.10 till 100 tidsenheter påverkas den tillåtna för-

stärkningen från 1.95 till endast 1.12.

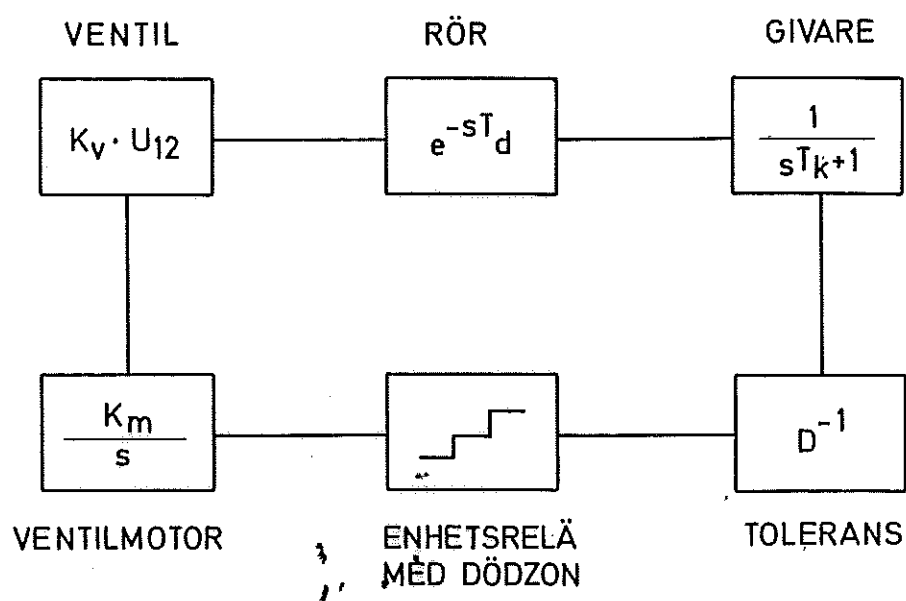
Vid enstegsinreglering är däremot tidskonstantens påverkan mycket större vid nerreglering av stora amplituder. Här är förstärkningen omvänt proportionell mot T_k (se ekv (6)).

Genom att göra mindre ändringar i algoritmer, är det möjligt att studera en reglerkrets, som har utökats med en proportionell återkoppling från ventilläge till styrläge. Dimensioneringsproblemet innehåller då två valfria förstärkningar. Om en fixeras kan samma typer av tabeller att kunna tas fram. Ett specialfall är den flytande regleringen, då den proportionella återkopplingen är noll. Detta kommer att behandlas i en senare rapport.

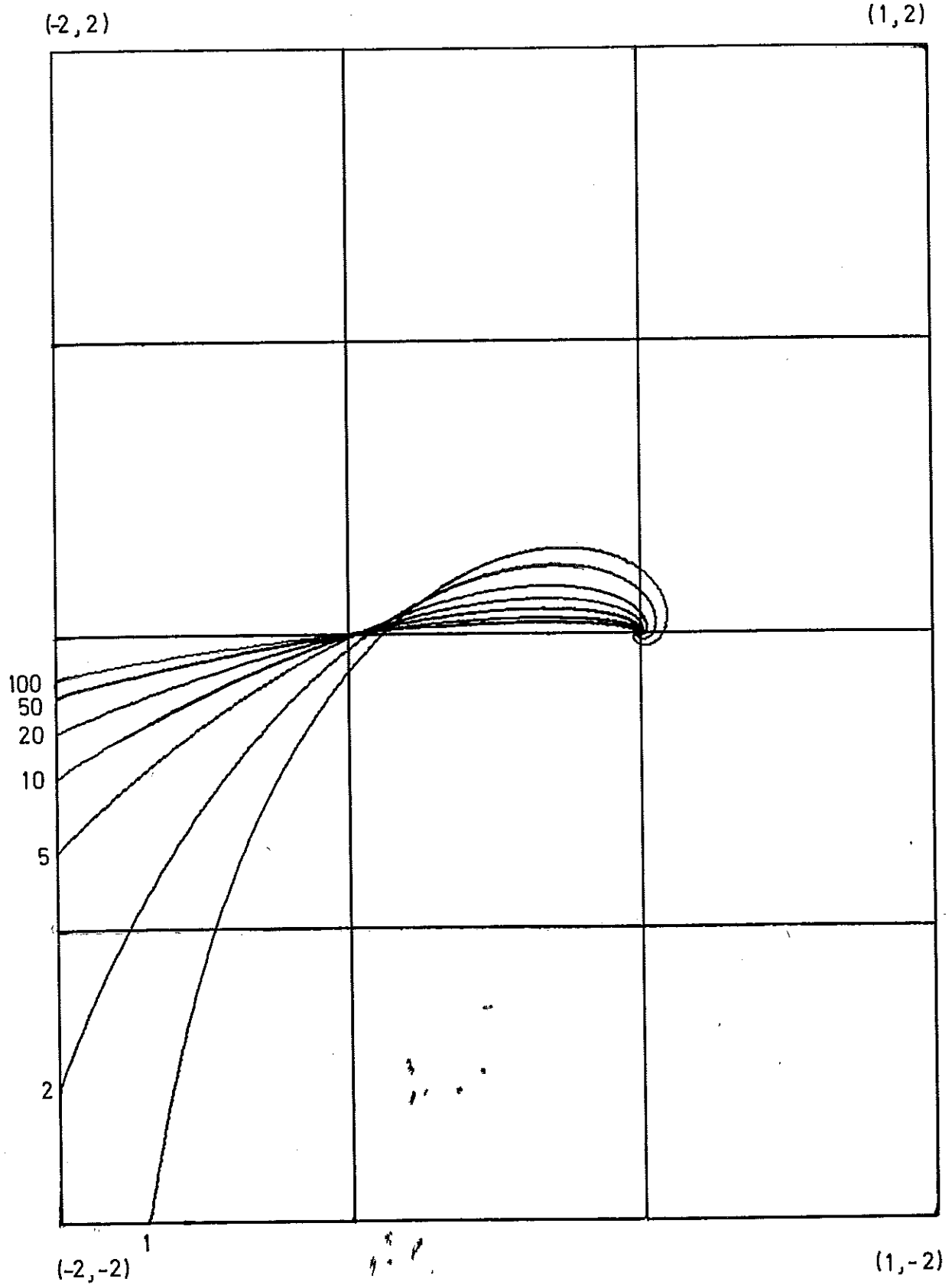
Andra utvecklingsmöjligheter är att studera påverkan från rörets dynamik, annan givaredynamik och annan form av styrrelä t ex relä med dödzon och hysteres.

Referenser

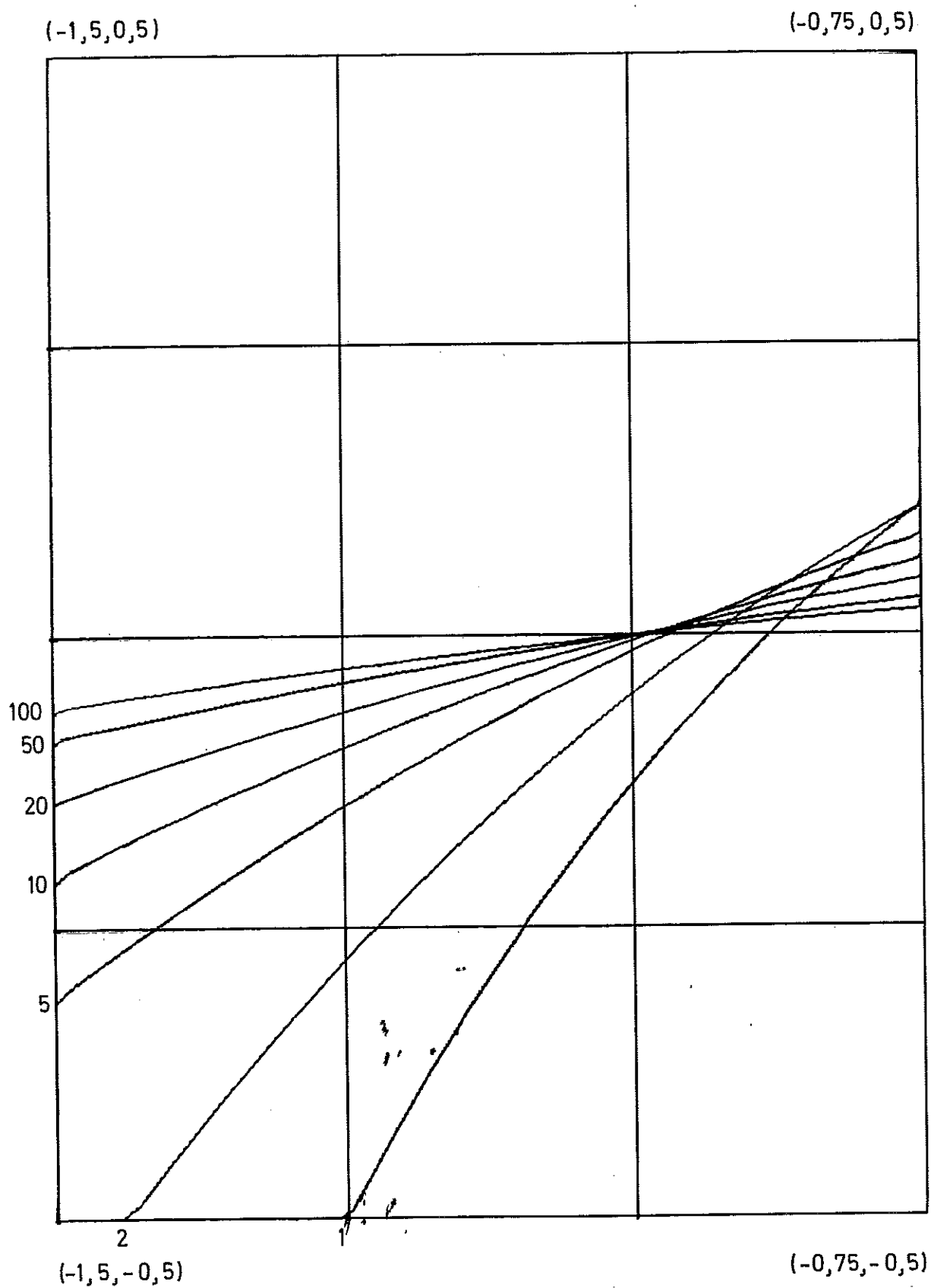
Olinjära system. Föreläsningar vid LTH 1968. K.J. Åström. Reviderat. 1970 K. Eklund och S. Lindahl.



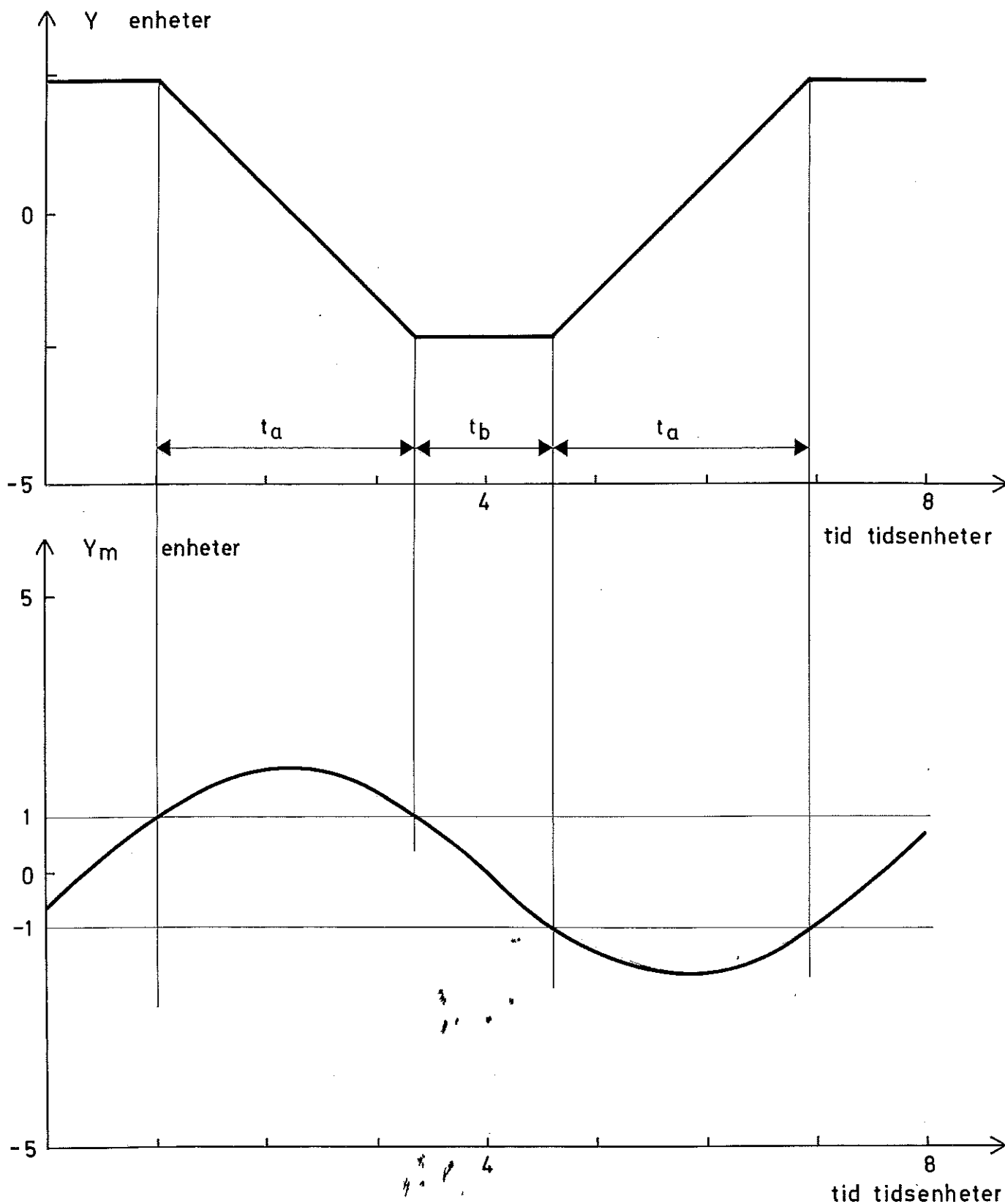
Figur nr1. Blockschema för reglersystem för flytande reglering av ventiler.



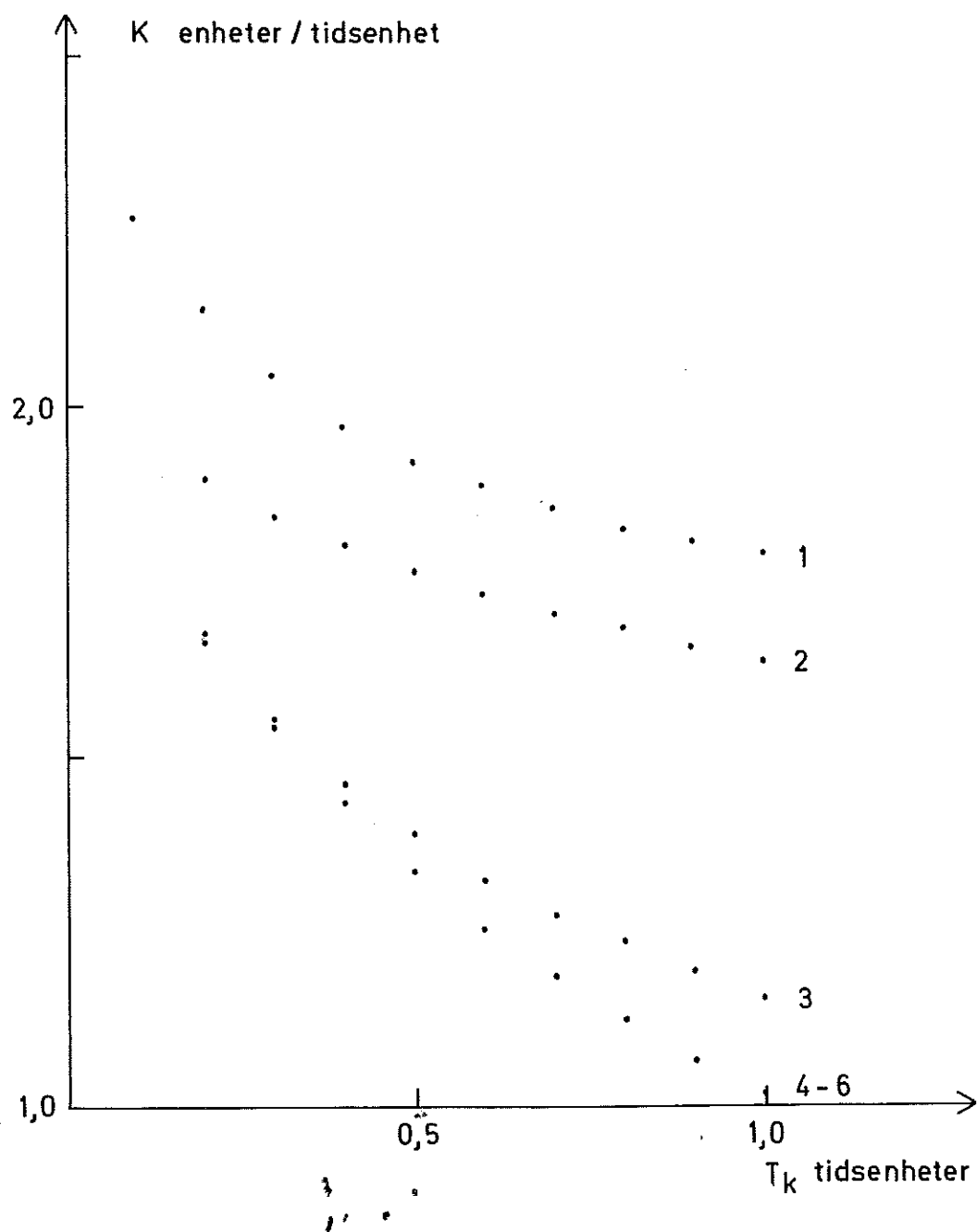
Figur nr 2 Nyquist-kurva för $G(s) = \frac{e^{-s}}{s(sT_k + 1)}$ för olika tidskonstanter T_k på 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 tidsenheter.



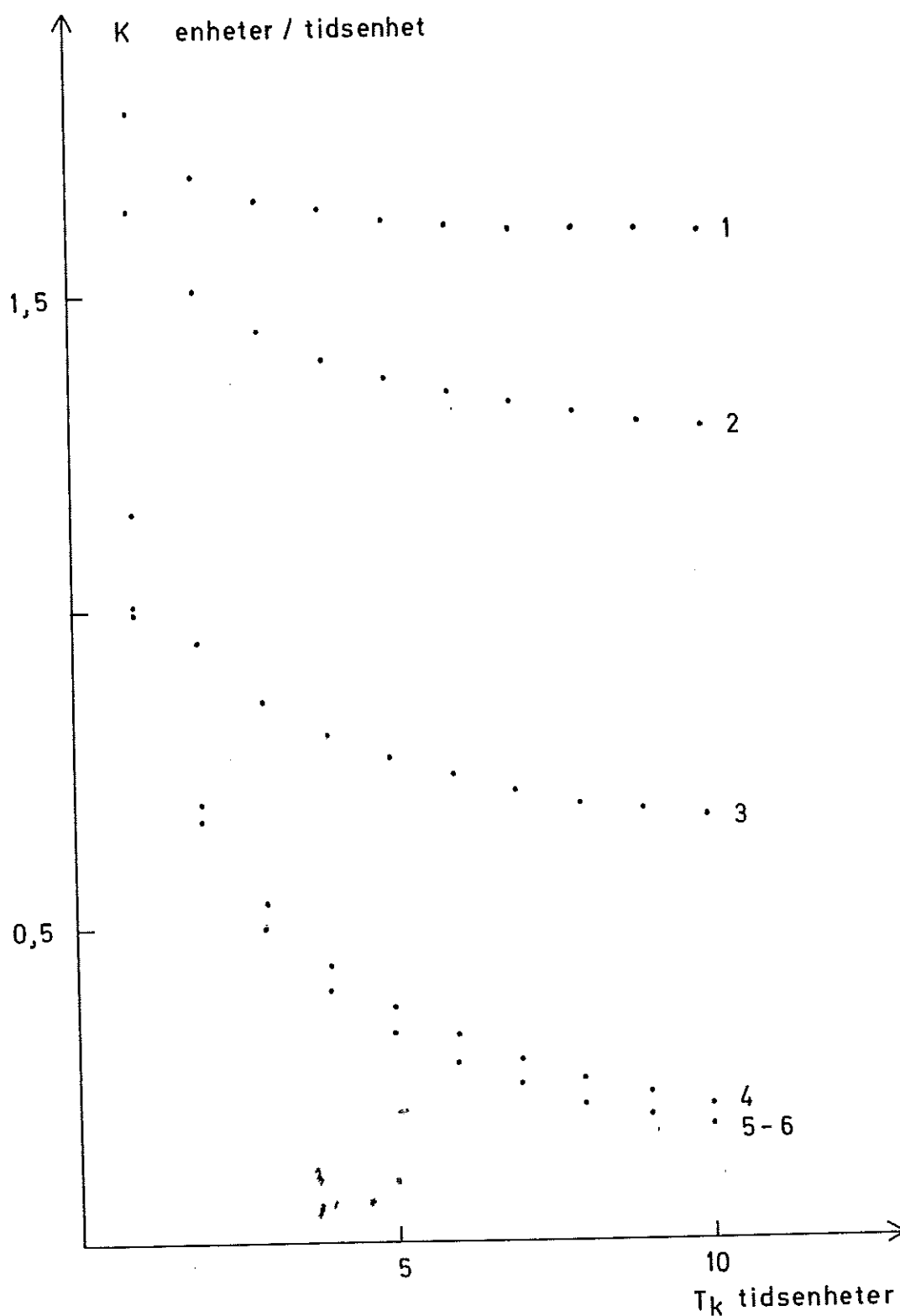
Figur nr 3 Nyquist-kurva för $G(s) = \frac{e^{-s}}{s(sT_k + 1)}$ för olika tidskonstanter T_k på 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 tidsenheter.



Figur nr 4 Självsvängning med tidsfördröjning $T_d = 1$ tidsenhet, tidskonstant $T_k = 1$ tidsenhet, toleransen $D=1$ enhet och förstärkningen $K=2$ enheter/tidsenhet. Y är flödets temperatur vid ventilen. Y_m är uppmätt temperatur efter 1 tidsenhets transportfördröjning.



Figur nr 5. 1 Stabilitetsgränsen med approximativ metod
 2 " " exakt "
 3 - 6 Förstärkningsgränser för enstegsinreglering vid amplituderna
 2,5,10 och 100 resp. kurvor är 3,4,5 och 6.



Figur nr 6 1 Stabilitetsgränsen med approximativ metod
 2 " " " exakt "
 3 - 6 Förstärkningsgränser för enstegsinreglering vid
 amplituderna 2,5,10 och 100 resp. kurvor är 3,4,5 och 6.

Tabell nr 1 Stabilitetsgränsen som funktion av tidskonstanten. $T_k = 0.01(0.01)1.0$

	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09	.10
.00	2.4435	2.4202	2.3981	2.3769	2.3567	2.3373	2.3157	2.3003	2.2837	2.2673
.10	2.2515	2.2303	2.2217	2.2077	2.1942	2.1812	2.1657	2.1567	2.1450	2.1338
.20	2.1230	2.1126	2.1025	2.0927	2.0833	2.0742	2.0654	2.0569	2.0486	2.0406
.30	2.0320	2.0233	2.0180	2.0110	2.0041	1.9974	1.9910	1.9847	1.9786	1.9726
.40	1.9603	1.9512	1.9557	1.9504	1.9452	1.9401	1.9352	1.9304	1.9257	1.9212
.50	1.9167	1.9124	1.9081	1.9040	1.8999	1.8960	1.8921	1.8884	1.8847	1.8811
.60	1.8775	1.8741	1.8707	1.8674	1.8642	1.8610	1.8579	1.8549	1.8519	1.8490
.70	1.8461	1.8433	1.8406	1.8379	1.8353	1.8327	1.8301	1.8277	1.8252	1.8229
.80	1.8203	1.8181	1.8159	1.8136	1.8115	1.8093	1.8072	1.8051	1.8031	1.8011
.90	1.7991	1.7971	1.7952	1.7934	1.7915	1.7897	1.7879	1.7862	1.7844	1.7827

Tabell nr 2. Stabilitetsgränsen som funktion av tidskonstanten. $T_k = 1.0(1.0)100$

	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
.00	1.7827	1.6803	1.6520	1.6328	1.6209	1.6129	1.6071	1.6026	1.5992	1.5964
10.00	1.5941	1.5922	1.5900	1.5892	1.5880	1.5869	1.5860	1.5852	1.5844	1.5837
20.00	1.5831	1.5826	1.5821	1.5816	1.5812	1.5808	1.5804	1.5801	1.5798	1.5795
30.00	1.5792	1.5789	1.5787	1.5784	1.5782	1.5780	1.5778	1.5776	1.5775	1.5773
40.00	1.5771	1.5770	1.5769	1.5767	1.5766	1.5765	1.5763	1.5762	1.5761	1.5760
50.00	1.5759	1.5758	1.5757	1.5756	1.5755	1.5755	1.5754	1.5753	1.5752	1.5751
60.00	1.5751	1.5750	1.5749	1.5749	1.5748	1.5747	1.5747	1.5746	1.5746	1.5745
70.00	1.5745	1.5744	1.5744	1.5743	1.5743	1.5742	1.5742	1.5741	1.5741	1.5741
80.00	1.5740	1.5740	1.5739	1.5739	1.5739	1.5738	1.5738	1.5738	1.5737	1.5737
90.00	1.5737	1.5736	1.5736	1.5736	1.5735	1.5735	1.5735	1.5735	1.5734	1.5734

Tabell nr 3 Stabilitetsgränsen som funktion av tidskonstanten. $T_k = 0.10(0.01)1.00$

	.0000	.0200	.0300	.0400	.0500	.0600	.0700	.0800	.0900	.1000
.1000	1.9405	1.9347	1.9290	1.9233	1.9177	1.9121	1.9065	1.9010	1.8956	1.8902
.2000	1.8848	1.8795	1.8743	1.8692	1.8641	1.8590	1.8541	1.8492	1.8444	1.8396
.3000	1.8349	1.8303	1.8257	1.8213	1.8168	1.8125	1.8082	1.8040	1.7998	1.7957
.4000	1.7917	1.7877	1.7838	1.7800	1.7762	1.7724	1.7688	1.7651	1.7616	1.7580
.5000	1.7546	1.7512	1.7478	1.7445	1.7412	1.7380	1.7348	1.7317	1.7286	1.7256
.6000	1.7226	1.7196	1.7167	1.7138	1.7109	1.7081	1.7054	1.7026	1.7000	1.6973
.7000	1.6947	1.6921	1.6895	1.6870	1.6845	1.6820	1.6796	1.6772	1.6748	1.6725
.8000	1.6702	1.6679	1.6656	1.6634	1.6612	1.6590	1.6568	1.6547	1.6526	1.6505
.9000	1.6484	1.6464	1.6444	1.6424	1.6404	1.6384	1.6365	1.6346	1.6327	1.6308

Tabell nr 4 Stabilitetsgränsen som funktion av tidskonstanten. $T_k = 1.0(1.0)100.0$

	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000	10.0000
.0000	1.0290	1.5055	1.4402	1.3979	1.3674	1.3440	1.3254	1.3099	1.2969	1.2857
10.0000	1.2759	1.2692	1.2595	1.2526	1.2462	1.2405	1.2352	1.2303	1.2258	1.2216
20.0000	1.2177	1.2140	1.2105	1.2073	1.2042	1.2013	1.1985	1.1959	1.1934	1.1910
30.0000	1.1887	1.1865	1.1845	1.1825	1.1805	1.1787	1.1769	1.1752	1.1735	1.1719
40.0000	1.1704	1.1689	1.1675	1.1661	1.1647	1.1634	1.1621	1.1609	1.1597	1.1585
50.0000	1.1574	1.1563	1.1552	1.1541	1.1531	1.1521	1.1512	1.1502	1.1493	1.1484
60.0000	1.1475	1.1466	1.1458	1.1449	1.1441	1.1433	1.1425	1.1418	1.1410	1.1403
70.0000	1.1396	1.1389	1.1382	1.1375	1.1368	1.1362	1.1355	1.1349	1.1343	1.1337
80.0000	1.1351	1.1345	1.1339	1.1333	1.1328	1.1322	1.1297	1.1292	1.1286	1.1281
90.0000	1.1276	1.1271	1.1266	1.1261	1.1256	1.1252	1.1247	1.1242	1.1238	1.1233

Tabell nr 5. Förstärkningsgräns för enstegsinreglering vid störamplitud 2 enheter som funktion av tidskonstanten

$$T_K = 0.01(0.01)1.00$$

	.0100	.0200	.0300	.0400	.0500	.0600	.0700	.0800	.0900	.1000
.0000	1.9802	1.9608	1.9417	1.9231	1.9048	1.8868	1.8692	1.8519	1.8350	1.8184
.1000	1.8022	1.7864	1.7709	1.7558	1.7410	1.7265	1.7124	1.6986	1.6852	1.6720
.2000	1.6592	1.6465	1.6344	1.6224	1.6107	1.5992	1.5881	1.5771	1.5664	1.5560
.3000	1.5458	1.5358	1.5260	1.5164	1.5070	1.4979	1.4889	1.4801	1.4715	1.4631
.4000	1.4548	1.4467	1.4388	1.4310	1.4234	1.4159	1.4086	1.4014	1.3943	1.3874
.5000	1.3806	1.3739	1.3674	1.3610	1.3546	1.3484	1.3424	1.3364	1.3305	1.3247
.6000	1.3190	1.3134	1.3079	1.3025	1.2972	1.2920	1.2868	1.2818	1.2768	1.2719
.7000	1.2671	1.2623	1.2576	1.2530	1.2485	1.2440	1.2396	1.2353	1.2310	1.2268
.8000	1.2226	1.2185	1.2144	1.2105	1.2065	1.2027	1.1988	1.1951	1.1913	1.1877
.9000	1.1840	1.1805	1.1769	1.1734	1.1700	1.1666	1.1632	1.1599	1.1567	1.1534

Tabell nr 6 Förstärkningsgräns för enstegsinreglering vid störamplitud 2 enheter som funktion av tidskonstanten

$$T_K = 1.0(1.0)100.$$

	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000	10.0000
.0000	1.1534	.9523	.8576	.8010	.7629	.7353	.7142	.6976	.6842	.6730
.10000	.6636	.6595	.6485	.6424	.6370	.6322	.6279	.6240	.6205	.6173
.20000	.6143	.6116	.6091	.6067	.6045	.6025	.6006	.5988	.5971	.5955
.30000	.5940	.5926	.5912	.5899	.5887	.5875	.5864	.5853	.5843	.5833
.40000	.5823	.5814	.5805	.5796	.5788	.5780	.5772	.5764	.5757	.5750
.50000	.5743	.5736	.5729	.5723	.5717	.5710	.5704	.5698	.5693	.5687
.60000	.5681	.5676	.5671	.5665	.5660	.5655	.5650	.5645	.5640	.5636
.70000	.5651	.5626	.5622	.5617	.5613	.5609	.5604	.5600	.5596	.5592
.80000	.5588	.5584	.5580	.5576	.5572	.5568	.5564	.5560	.5556	.5553
.90000	.5549	.5545	.5541	.5538	.5534	.5531	.5527	.5524	.5520	.5517

Tabell nr 7 Förstärkningsgräns för enstegsinreglering vid störamplitud 5 enheter som funktion av tidskonstanten

$$T_k = 0.01(0.01)1.00$$

	.0100	.0200	.0300	.0400	.0500	.0600	.0700	.0800	.0900	.1000
.0000	1.9802	1.9608	1.9417	1.9231	1.9048	1.8868	1.8692	1.8519	1.8349	1.8182
.1000	1.8018	1.7857	1.7699	1.7544	1.7391	1.7241	1.7094	1.6949	1.6807	1.6667
.2000	1.6529	1.6393	1.6260	1.6129	1.6000	1.5873	1.5748	1.5625	1.5504	1.5385
.3000	1.5268	1.5152	1.5038	1.4926	1.4816	1.4707	1.4600	1.4494	1.4390	1.4298
.4000	1.4187	1.4087	1.3989	1.3893	1.3797	1.3703	1.3611	1.3520	1.3429	1.3341
.5000	1.3253	1.3167	1.3082	1.2998	1.2915	1.2833	1.2752	1.2673	1.2594	1.2517
.6000	1.2440	1.2365	1.2291	1.2217	1.2144	1.2073	1.2002	1.1932	1.1863	1.1795
.7000	1.1728	1.1662	1.1596	1.1531	1.1467	1.1404	1.1342	1.1280	1.1219	1.1159
.8000	1.1099	1.1040	1.0982	1.0925	1.0868	1.0812	1.0756	1.0701	1.0647	1.0593
.9000	1.0540	1.0488	1.0436	1.0385	1.0334	1.0284	1.0234	1.0185	1.0136	1.0088

Tabell nr 8 Förstärkningsgräns för enstegsinreglering vid störamplitud 5 enheter som funktion av tidskonstanten

$$T_k = 1.0(1.0)100$$

	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000	10.0000
.0000	1.0088	.6946	.5380	.4422	.3768	.3290	.2924	.2634	.2397	.2201
.10000	.2035	.1893	.1770	.1662	.1567	.1482	.1406	.1338	.1276	.1219
.20000	.1168	.1120	.1077	.1036	.0999	.0964	.0932	.0901	.0873	.0846
.30000	.0821	.0798	.0775	.0754	.0734	.0715	.0697	.0680	.0664	.0649
.40000	.0634	.0620	.0606	.0593	.0581	.0569	.0558	.0547	.0536	.0526
.50000	.0516	.0507	.0498	.0489	.0481	.0472	.0465	.0457	.0450	.0442
.60000	.0436	.0429	.0422	.0416	.0410	.0404	.0398	.0393	.0387	.0382
.70000	.0377	.0372	.0367	.0362	.0357	.0353	.0348	.0344	.0340	.0336
.80000	.0332	.0328	.0324	.0320	.0317	.0313	.0310	.0306	.0303	.0300
.90000	.0297	.0293	.0290	.0287	.0284	.0282	.0279	.0276	.0273	.0271

Tabell nr 9. Förstärkningsgräns för enstegsinreglering vid störamplitud 10 enheter som funktion av tidskonstanten

$$T_k = 0.01(0.01)1.00$$

	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
0.000	1.9802	1.9608	1.9417	1.9231	1.9048	1.8868	1.8692	1.8519	1.8349	1.8182
1.000	1.8018	1.7857	1.7699	1.7544	1.7391	1.7241	1.7094	1.6949	1.6807	1.6667
2.000	1.6529	1.6393	1.6260	1.6129	1.6000	1.5873	1.5748	1.5625	1.5504	1.5385
3.000	1.5267	1.5152	1.5038	1.4925	1.4815	1.4706	1.4599	1.4493	1.4388	1.4286
4.000	1.4184	1.4085	1.3986	1.3889	1.3793	1.3699	1.3605	1.3514	1.3423	1.3333
5.000	1.3245	1.3158	1.3072	1.2987	1.2903	1.2821	1.2739	1.2658	1.2579	1.2500
6.000	1.2422	1.2346	1.2270	1.2195	1.2121	1.2048	1.1976	1.1905	1.1834	1.1765
7.000	1.1696	1.1628	1.1561	1.1494	1.1429	1.1364	1.1300	1.1236	1.1173	1.1111
8.000	1.1050	1.0989	1.0929	1.0870	1.0811	1.0753	1.0696	1.0639	1.0583	1.0527
9.000	1.0472	1.0417	1.0363	1.0310	1.0257	1.0205	1.0153	1.0102	1.0051	1.0001

Tabell nr 10. Förstärkningsgräns för enstegsinreglering vid störamplitud 10 enheter som funktion av tidskonstanten

$$T_k = 1.0(1.0)100$$

	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000	10.0000
0.000	1.0001	0.6677	0.5019	0.4024	0.3360	0.2885	0.2528	0.2249	0.2027	0.1844
10.0000	0.1692	0.1503	0.1452	0.1356	0.1272	0.1197	0.1131	0.1072	0.1019	0.0971
20.0000	0.0927	0.0887	0.0850	0.0816	0.0785	0.0756	0.0729	0.0704	0.0681	0.0659
30.0000	0.0638	0.0619	0.0601	0.0584	0.0568	0.0552	0.0538	0.0524	0.0511	0.0499
40.0000	0.0487	0.0476	0.0465	0.0454	0.0445	0.0435	0.0426	0.0417	0.0409	0.0401
50.0000	0.0393	0.0386	0.0379	0.0372	0.0365	0.0359	0.0353	0.0347	0.0341	0.0336
60.0000	0.0330	0.0325	0.0320	0.0315	0.0310	0.0306	0.0301	0.0297	0.0292	0.0288
70.0000	0.0284	0.0280	0.0277	0.0273	0.0269	0.0266	0.0263	0.0259	0.0256	0.0253
80.0000	0.0250	0.0247	0.0244	0.0241	0.0238	0.0235	0.0233	0.0230	0.0228	0.0225
90.0000	0.0223	0.0220	0.0218	0.0216	0.0213	0.0211	0.0209	0.0207	0.0205	0.0203

Tabell nr 11 Förstärkningsgräns för enstegsinreglering vid störamplitud 100 enheter som funktion av tidskonstanten

$$T_K = 0.01(0.01)1.00$$

	.0100	.0200	.0300	.0400	.0500	.0600	.0700	.0800	.0900	.1000
.0000	1.9802	1.9608	1.9417	1.9231	1.9048	1.8868	1.8692	1.8519	1.8349	1.8182
.1000	1.8018	1.7857	1.7699	1.7544	1.7391	1.7241	1.7094	1.6949	1.6807	1.6667
.2000	1.6529	1.6393	1.6260	1.6129	1.6000	1.5873	1.5748	1.5625	1.5504	1.5385
.3000	1.5267	1.5152	1.5038	1.4925	1.4815	1.4706	1.4599	1.4493	1.4388	1.4286
.4000	1.4184	1.4085	1.3986	1.3889	1.3793	1.3699	1.3605	1.3514	1.3423	1.3333
.5000	1.3245	1.3158	1.3072	1.2987	1.2903	1.2821	1.2739	1.2658	1.2579	1.2500
.6000	1.2422	1.2346	1.2270	1.2195	1.2121	1.2048	1.1976	1.1905	1.1834	1.1765
.7000	1.1696	1.1628	1.1561	1.1494	1.1429	1.1364	1.1299	1.1236	1.1173	1.1111
.8000	1.1050	1.0989	1.0929	1.0870	1.0811	1.0753	1.0695	1.0638	1.0582	1.0526
.9000	1.0471	1.0417	1.0363	1.0309	1.0256	1.0204	1.0152	1.0101	1.0050	1.0000

Tabell nr 12. Förstärkningsgräns för enstegsinreglering vid störamplitud 100 enheter som funktion av tidskonstanten

$$T_K = 1.0(1.0)100$$

	1.0000	2.0000	3.0000	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	9.0000	10.0000
.0000	1.0000	.6667	.5000	.4000	.3333	.2857	.2500	.2222	.2000	.1818
10.0000	.1667	.1538	.1429	.1333	.1250	.1176	.1111	.1053	.1000	.0952
20.0000	.0909	.0870	.0833	.0800	.0769	.0741	.0714	.0690	.0667	.0645
30.0000	.0625	.0606	.0588	.0571	.0556	.0541	.0526	.0513	.0500	.0488
40.0000	.0476	.0465	.0455	.0444	.0435	.0426	.0417	.0408	.0400	.0392
50.0000	.0385	.0377	.0370	.0364	.0357	.0351	.0345	.0339	.0333	.0328
60.0000	.0323	.0317	.0313	.0308	.0303	.0299	.0294	.0290	.0286	.0282
70.0000	.0278	.0274	.0270	.0267	.0263	.0260	.0256	.0253	.0250	.0247
80.0000	.0244	.0241	.0238	.0235	.0233	.0230	.0227	.0225	.0222	.0220
90.0000	.0217	.0215	.0213	.0211	.0208	.0206	.0204	.0202	.0200	.0198

Diagrambilaga

Samtliga diagram består av fem kurvor, vilka uppifrån är insignal 1 U_1 , insignal 2 U_2 , ventilläget V , utsignalen vid ventilen Y och nederst den uppmätta utsignalen Y_m .

De vertikala axlarna omfattar intervallen $(-50.,0.)$, $(0.,50.)$, $(0.,1.)$, $(-10.,10.)$ och $(-10.,10.)$. De horisontella axlarna omfattar 80 tidsenheter utom för diagrammen 5 och 6, vilka omfattar 400 tidsenheter.

Diagram 1 och 2 visar simulering med 90% av approximativ metods förstärkning vidare med $T_d = 1$ tidsenhet och $T_k = 1$ resp. 10 tidsenheter.

Diagram 3 och 4 som föregående, men med exakt metod.

Diagram 5 - 6 som föregående, men med fem gånger längre tidsskala.

Diagram 7-8 visar enstegsinregleringen för störamplituden 5 enheter med $T_d = 1$ tidsenhet, $T_k = 1$ tidsenhet och störningsamplituderna 4,5 resp. 5,5 enheter.

Diagram 9-10 som föregående, men med $T_k = 10$ tidsenheter.

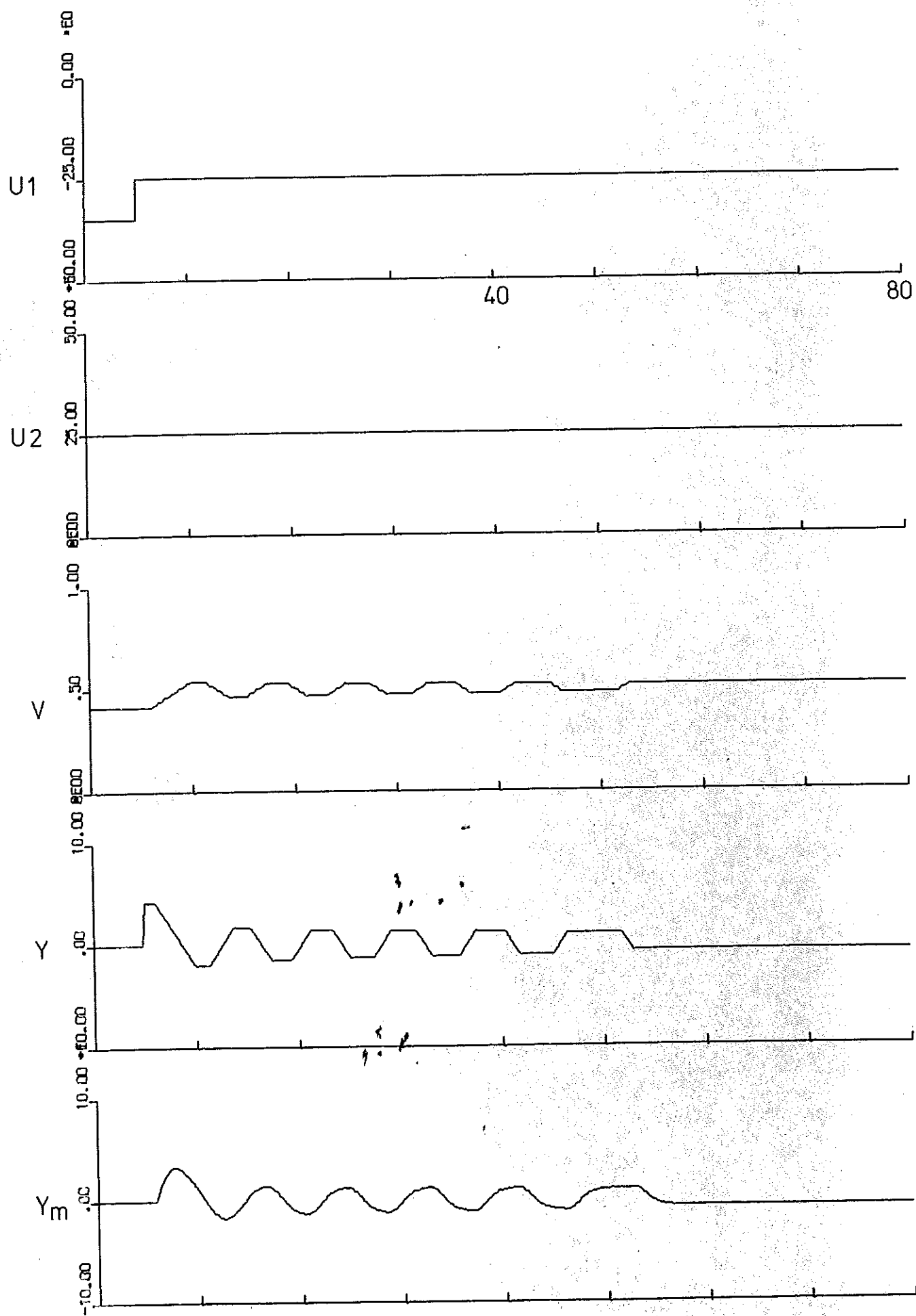
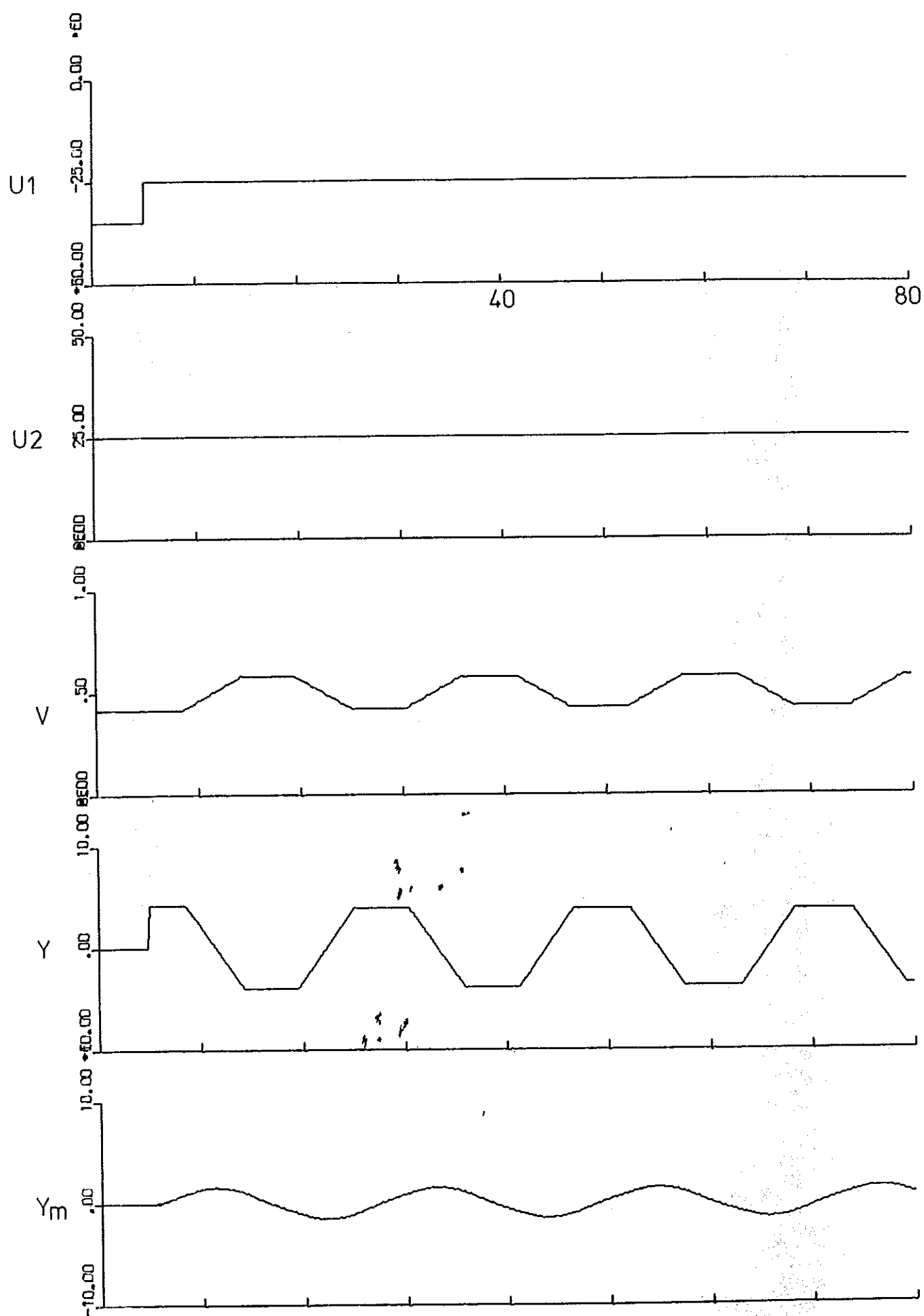


Diagram 2



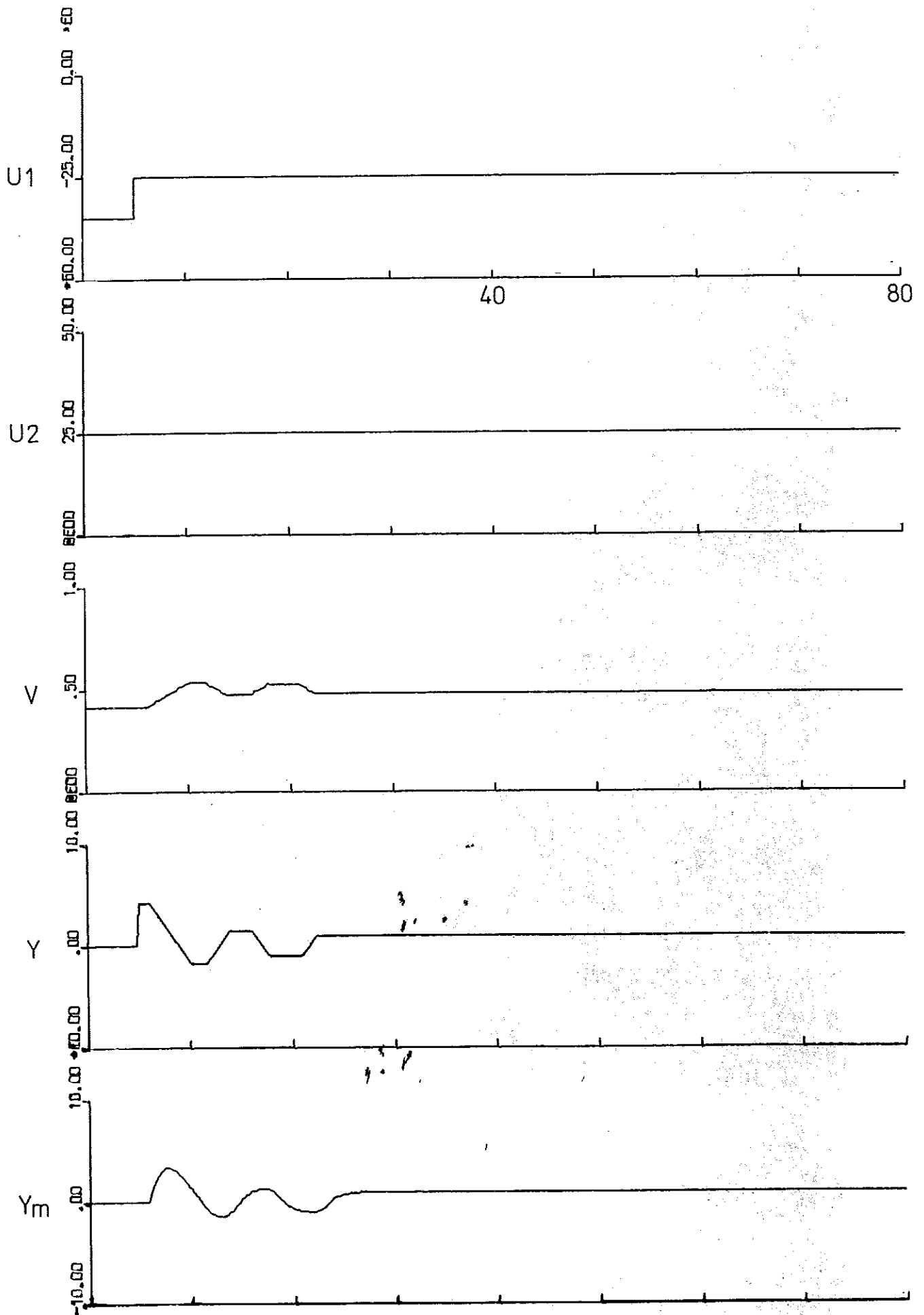


Diagram 4

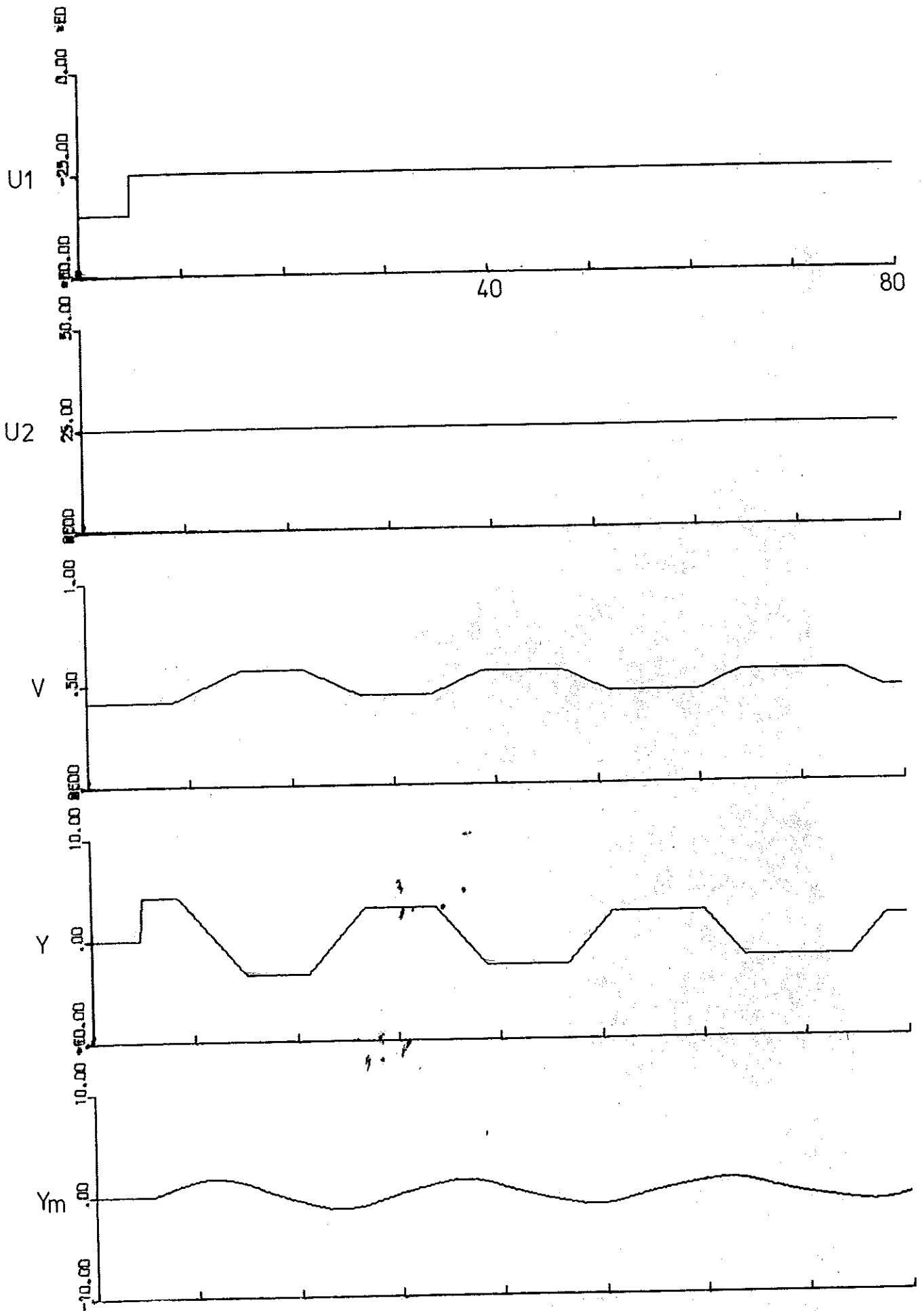
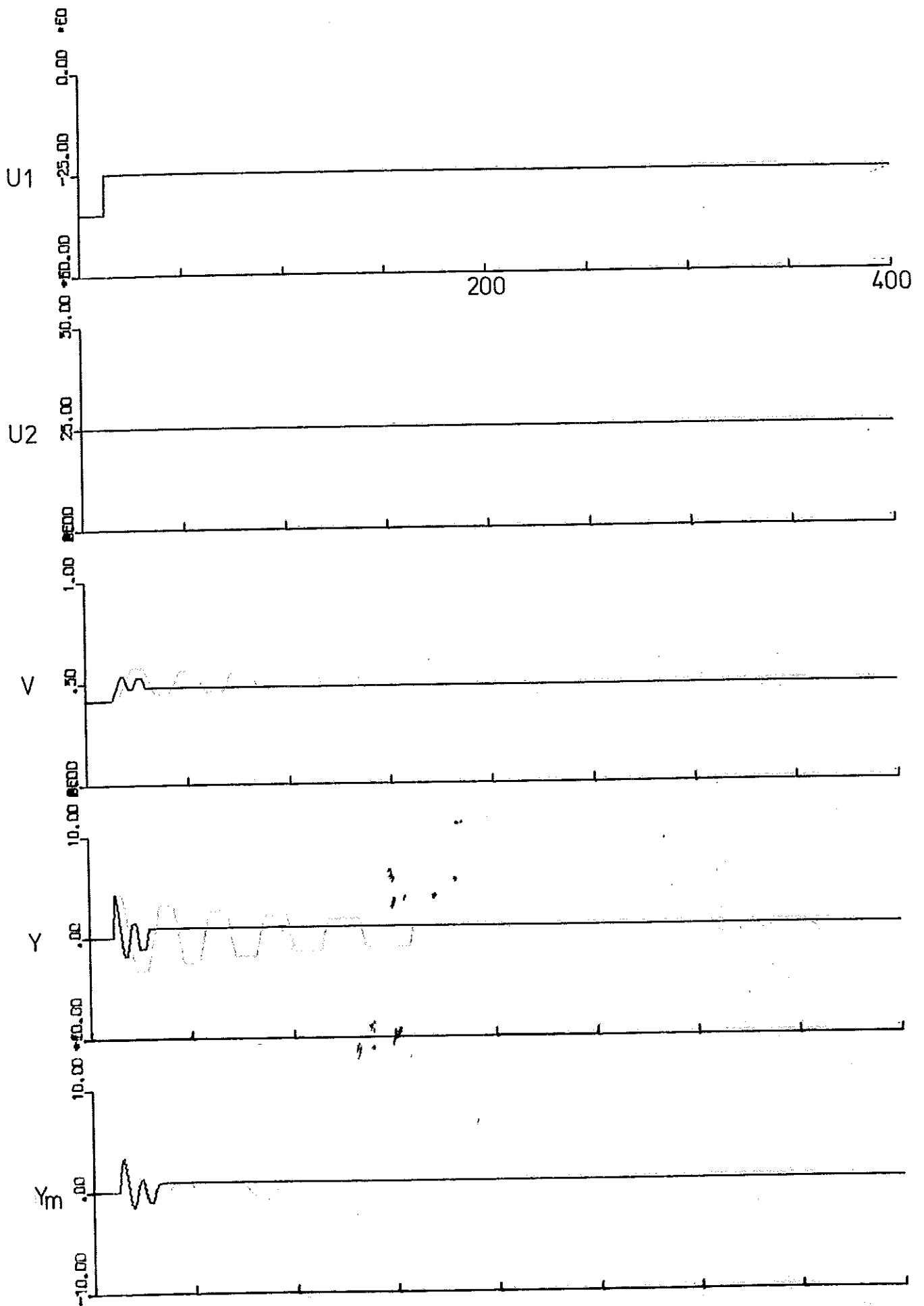


Diagram 5



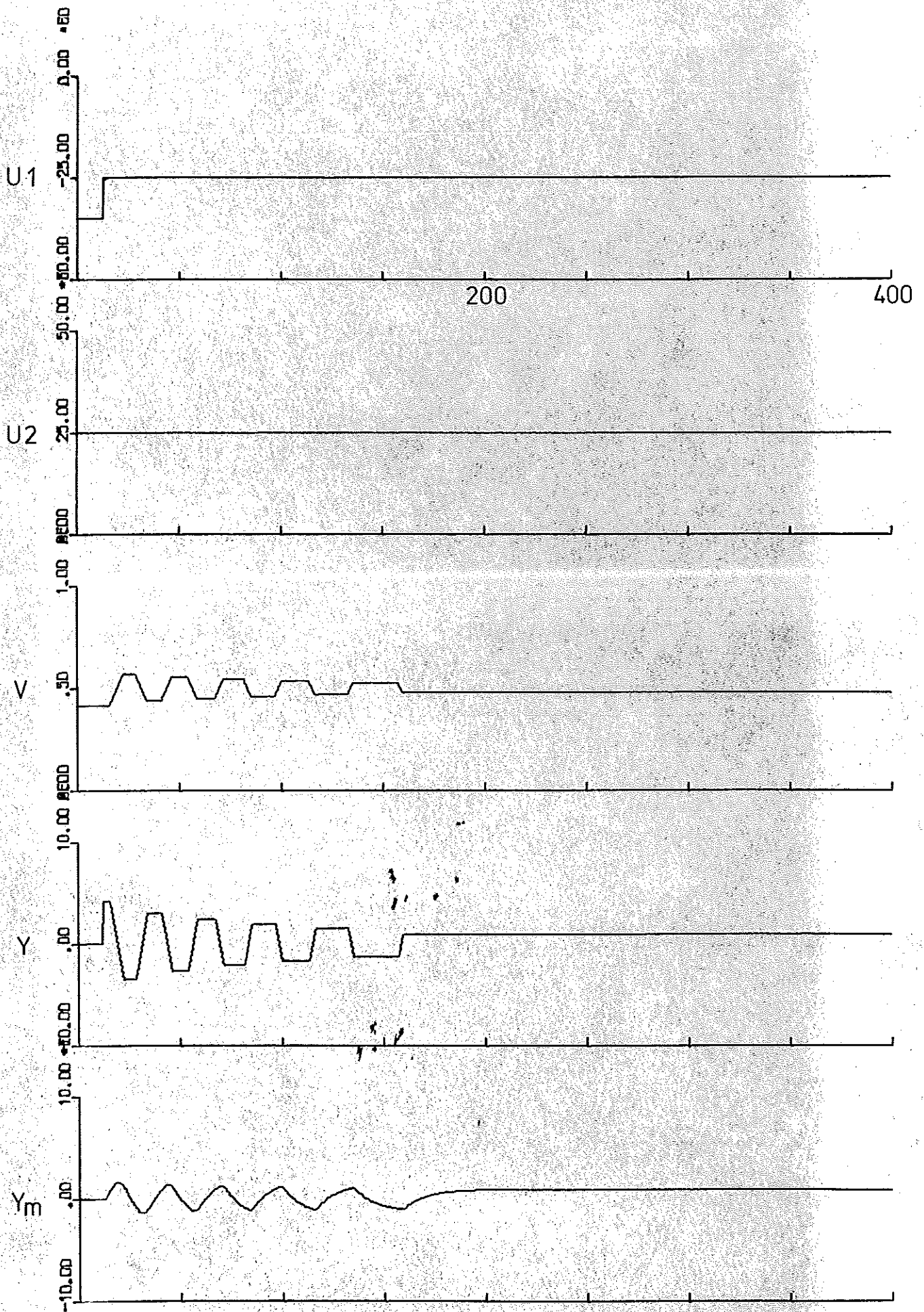


Diagram 7

