LUND UNIVERSITY

PH-Reglering

Bäckström, Peter; Bramsmark, Göran; Johansson, Gerd; Nerman, Henrik; Jeppsson, Håkan; Ragnarssson, Jahn; Malmqvist, Klas; Perby, Maja-Lisa; Kronqvist, Per; Gutman, Per-Olof; Olsson, Rickard

1973

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

Link to publication

Citation for published version (APA):
Bäckström, P., Bramsmark, G., Johansson, G., Nerman, H., Jeppsson, H., Ragnarssson, J., Malmqvist, K., Perby, M.-L., Kronqvist, P., Gutman, P.-O., & Olsson, R. (1973). *PH-Reglering*. (Technical Reports TFRT-7032). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

Total number of authors:
11

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

TFRT- 7032

PH - REGLERING

Göran Bramsmark
Peter Bäckström
Per-Olof Gutman
Håkan Jeppsson
Gerd Johansson
Per Kronqvist
Klas Malmqvist
Henrik Nermann
Rickard Olsson
Maja-Lisa Perby
Jahn Ragnarsson

TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET
UTLÅNAS EJ

Rapport 7319 (B) Juni 1973
Inst.för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola

P H - R E G L E R I N G

Göran Bramsmark
Peter Bäckström
Per-Olof Gutman
Håkan Jeppsson
Gerd Johansson
Per Kronqvist
Klas Malmqvist
Henrik Nerman
Rickard Olsson
Maja-Lisa Perby
Jahn-Ragnarsson

Handledare: Björn Wittenmark

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. Inledning

2. Processen

2.1) Rörströmningen

2.2) pH-mätningen

2.3) Systemdynamiken

2.4) Totala dynamiken

3. Problemställningen

3.1) Tidsfördröjningen

3.2) Olinjäriteten

4. Analog reglering

4.1) Fasavancering

4.2) Påtvungen svängning

4.3) Otto-Smith-reglering

5. Digital reglering

6. Avslutning

7. Litteraturförteckning

1. Inledning

Detta projekt genomfördes parallellt med inlärningen av Reglerteknik AK. Avsikten var att analysera en reglerteknisk frågeställning från problemformuleringen till dess eventuella lösning. På så sätt skulle projektet ge en helhetsbild av reglertekniken, vilket måste ses som ett värdefullt komplement till kurserna i ämnet som framförallt behandlar de matematiska hjälpmedlen inom reglertekniken.

Valet föll på reglering av en kemisk process, där man strävade efter att erhålla ett visst bestämt pH-värde i ett rör. För att åstadkomma detta insprutades syra och bas vid inloppet till röret. Vi utgick ifrån ett enkelt återkopplat system där det erhållna pH-värdet återkopplades och direkt påverkade insprutningen. De yttre omständigheterna tillät inte mätning av det erhållna pH-värdet direkt vid rörinloppet utan pH-givaren måste placeras en bit uppströms röret.

Det intressanta i problemet trodde vi - och även institutionens kvalificerade personal - låg i att transportsträckan mellan insprutning av syra och bas vid rörinloppet upp till pH-givaren gav upphov till en tidsfördröjning hos givarens utsignal. Det visade sig senare att det förmodligen största problemet i stället var att pH-kurvan är mycket olinjär.

2. Processen

Försöksuppställningen framgår av figur 2:1 på nästa sida.

Den består av det kemiska systemet, ett spänningsaggregat och en "svart elektroniklåda" med jämförare, plats för regulatorer och förstärkare. Möjlighet finns att koppla in oscilloskop och andra mätinstrument.

De olika delarna av uppställningen och processen beskrivs i följande avsnitt:

2.1) Rörströmningen
2.2) pH-mätningen
2.3) Systemdynamiken

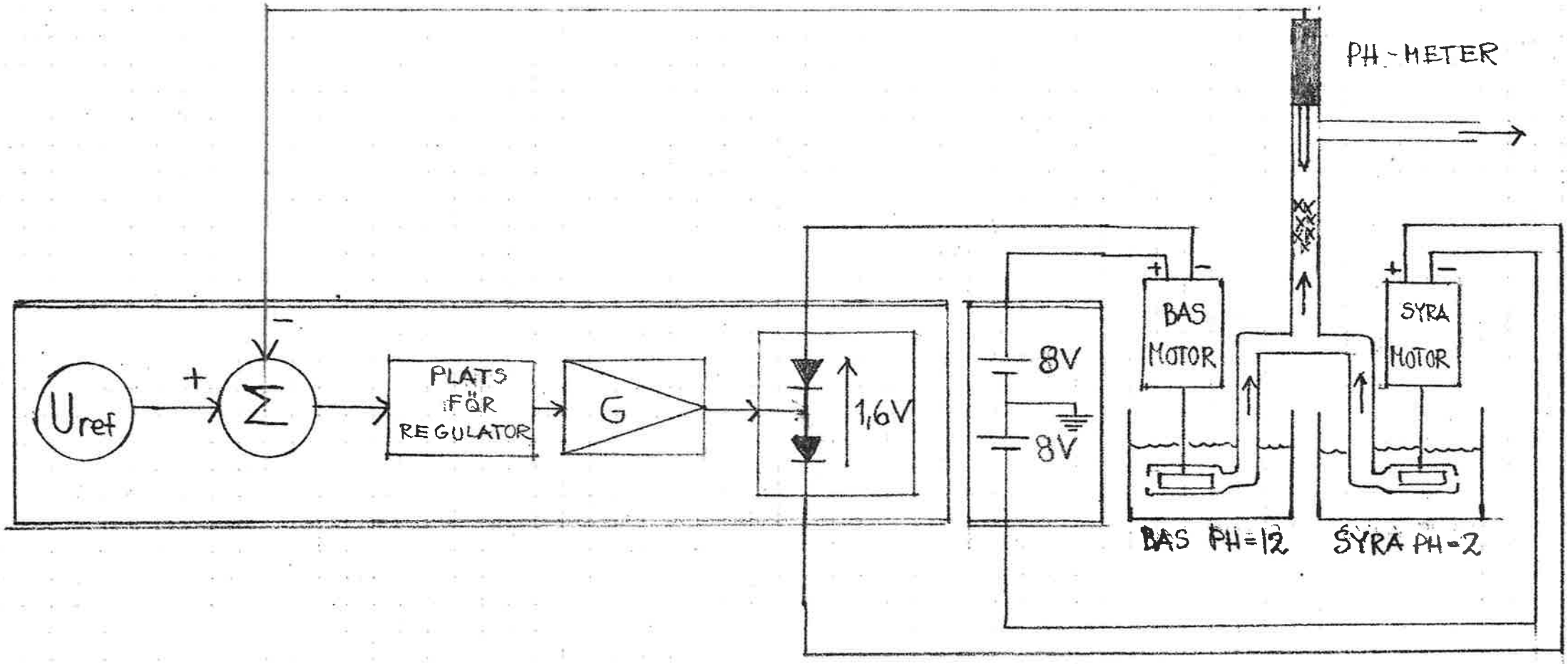


FIG 2.1. Försöksuppställning

2.1) Rörströmningen

Förutsättningar

Systemet består av ett vertikalt rör i vars botten två fluider med olika pH-värden pumpas in. I toppen av röret sitter en pH-meter som registrerar den förbipasserande fluidens pH-värde. pH-metern avses styra ett reglersystem, som skall reglera de två matarpumparna så att blandningen alltid erhåller ett konstant pH-värde.

Problemet

pH-metern måste mäta det verkliga pH-värdet hos blandningen, så att reglersystemet erhåller en korrekt insignal. Detta innebär, att när en viss vätskevolym passerar pH-metern, bör vätskan dels ha samma pH-värde som den erhöll vid rörinloppet, dels bör pH-värdet vara konstant över rörtvärsnittet. Vi erhåller alltså följande två delproblem:

I att åstadkomma god blandning av fluiderna i sidled,
II att erhålla konstant strömningshastighet över rörtvärsnittet.

Lösningsmetoder

I Löses genom att skapa kraftig turbulens i röret.
II Går ej att lösa genom turbulens. Dessutom existerar det alltid ett laminärt skikt intill rörväggen då strömningen är turbulent ("Even in a highly turbulent flow a thin laminar film exists next to the wall"; Hunsaker och Rightmire: Engineering Applications of Fluid Mechanics (p. 122), McGraw-Hill Book Company Inc., New York och London 1947). Löses i stället genom att fylla röret med filter.

Tillämpningar

I. T u r b u l e n s

Avgörande för om strömningen är turbulent eller laminär är Reynolds tal Re.

$$Re = \frac{2\, r\, \varrho\, \bar{v}}{\eta}$$

r = rörets radie
ϱ = vätskans densitet
$\bar{v}$ = vätskans medelhastighet
η = vätskans dynamiska viskositet
$\frac{\eta}{\rho}$ = " kinematiska "

Vid höga Re-tal är strömningen turbulent och vid låga laminär. Gränsen mellan turbulent och laminär strömning kallas Rekrit. Rekrit har ett nedre värde, men inget övre. Man har lyckats få laminär strömning för reynoldska tal på upp till 100 000. Strömningen är dock mycket instabil vid så höga Re-tal, så minsta störning gör den turbulent. Under Rekrits nedre värde $\sim$ 2320 dämpas alla störningar och strömningen förblir laminär.

Vätskans strömning före inträdet i röret samt rörinloppets utseende är av avgörande betydelse för värdet på Rekrit.

Vid fritt rör erhålles i vårt fall laminär strömning. För att erhålla turbulens måste vi alltså öka Re-talet. Detta sker enklast genom att skapa en förträngning i röret. (Då minskas visserligen rörets radie r, men eftersom hastigheten är omvänt proportionell mot r^2 ökar ändå Re.)

Kraftig turbulens uppstod och detta beror på:
a) Turbulensen, som uppstår inne i förträngningen på grund av att Re höjs, fortplantar sig och orsakar turbulens efter förträningen.
b) Rekrit sänks på grund av förträngningens utseende.

II Filter

Strömningsmotståndet i ett filter är proportionellt mot kvadraten på strömningshastigheten. Om vi förutsätter att filtret är homogent, är den tryckuppbyggnad, som sker i filtret då fluiden strömmar in, beroende av fluidens hastighetsprofil vid inträngandet. Tryckuppbyggnaden för laminär strömning åskådliggöres i fig. 2:2. Den turbulenta tryckuppbyggnaden erhålles analogt.

I bägge fallen erhålles större mottryck i centrum av filtret än ute vid rörväggen, varför fluiden pressas ut åt sidorna (se fig. 2:3). Efter en viss reaktionssträcka erhålles en konstant strömningshastighet över hela rörtvärsnittet. Denna hastighetsprofil bibehålles sedan genom hela filtret. Tillåts fluiden strömma fritt efter filtret uppstår laminär strömning.

Slutlig lösning

För att erhålla optimal strömning enligt I och II bör man alltså använda en lämplig kombination av filter och förträngning. Se fig. 2:4.

Fig 2.2 Tryckuppbyggnad i filter vid laminär strömning.

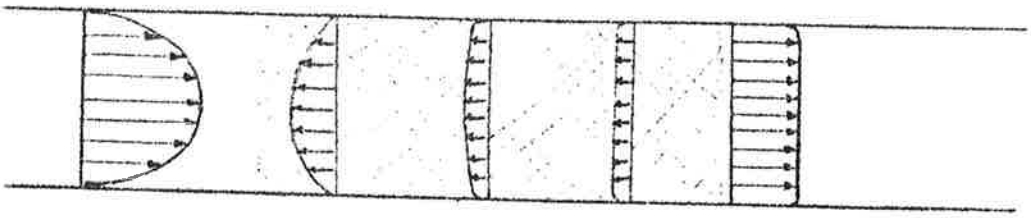
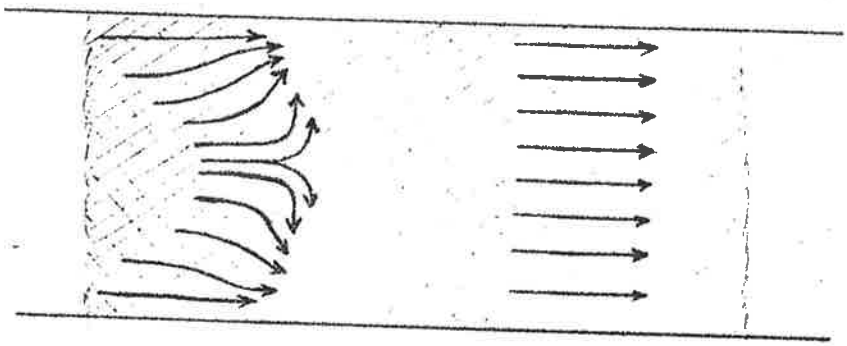


Fig 2.3 Utjämningsströmning i filter.



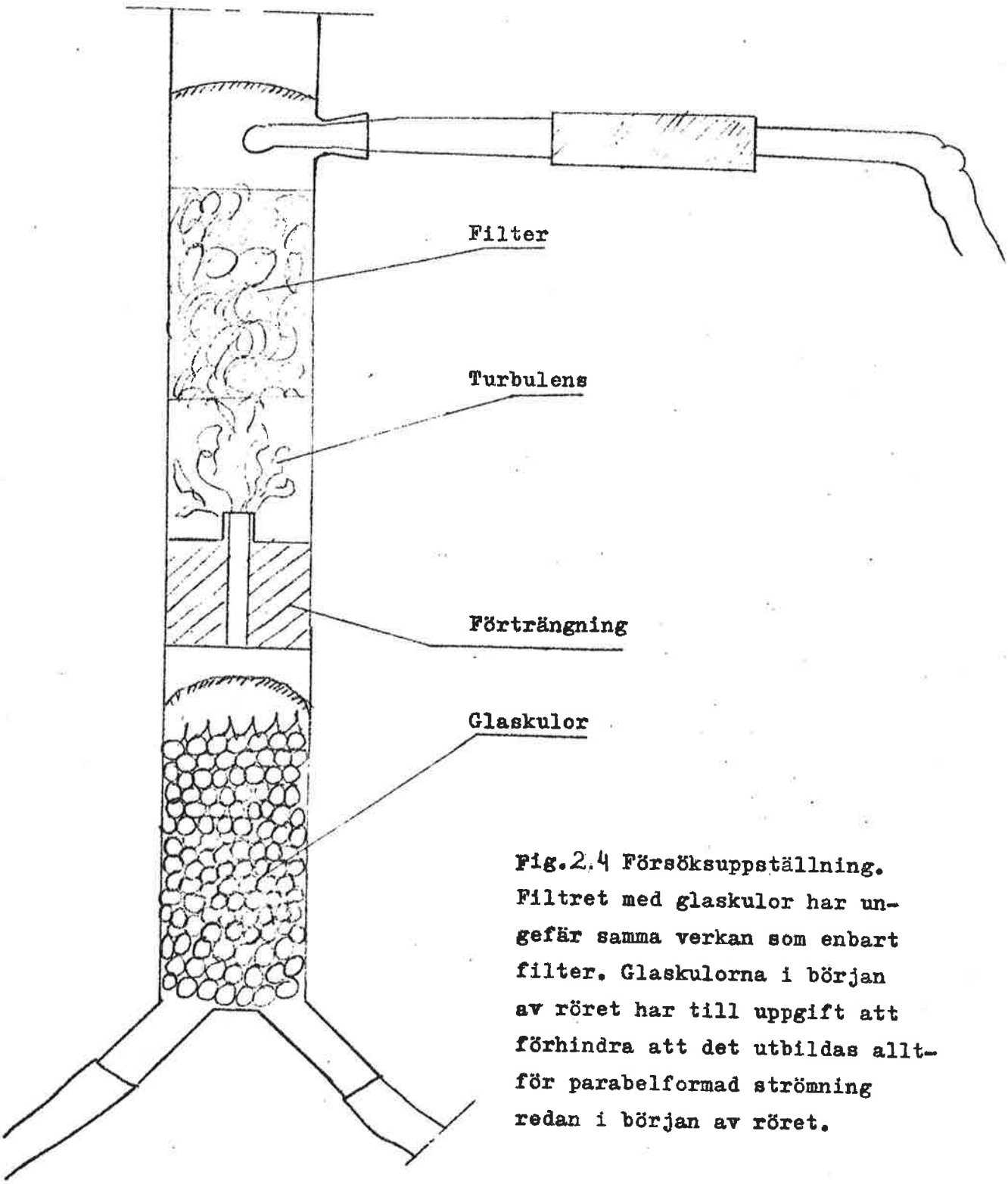


Fig.2.4 Försöksuppställning. Filtret med glaskulor har ungefär samma verkan som enbart filter. Glaskulorna i början av röret har till uppgift att förhindra att det utbildas alltför parabelformad strömning redan i början av röret.

2.2) pH-mätningen

pH-värdet definieras som

$$pH = - \log [H^+]$$

där $[H^+]$ är vätejonkoncentrationen. pH-värdet mäts i regel med en glaselektrod som är uppbyggd enligt fig. 2:5.

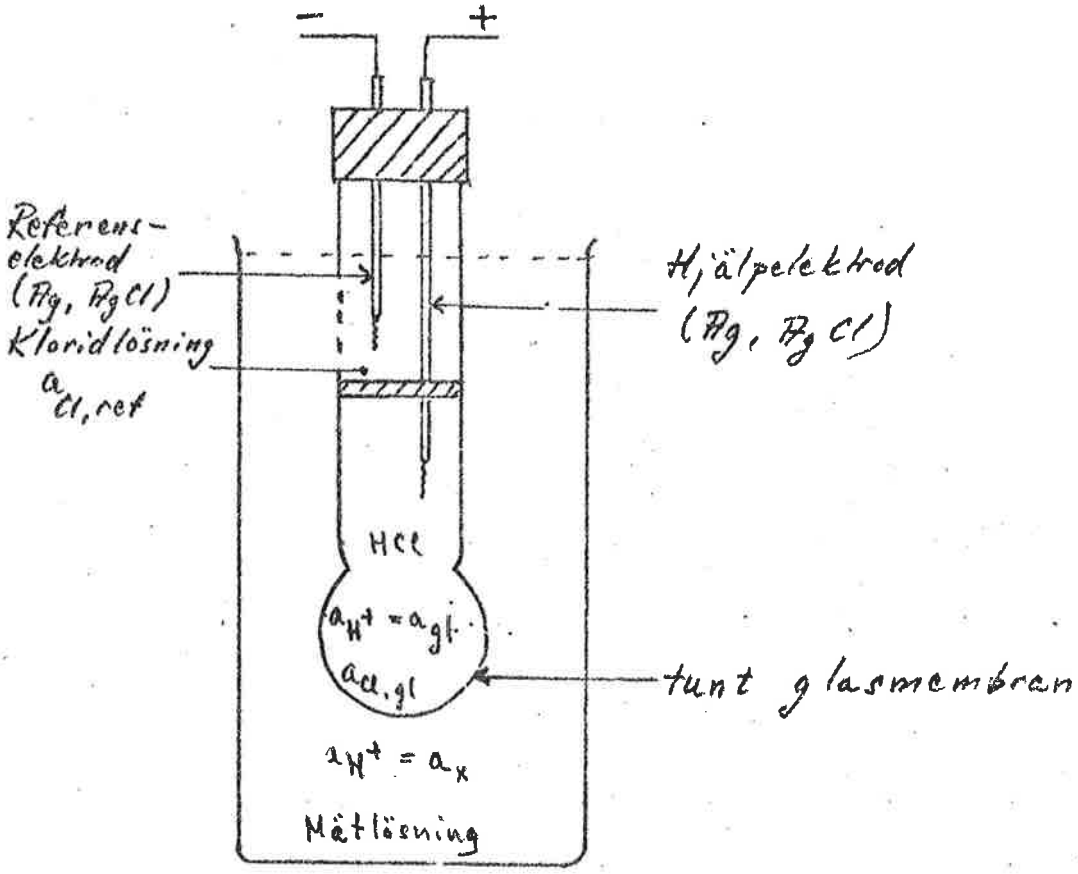


Fig. 2:5. Uppbyggnad av pH-elektrod. a betecknar aktivitet som är proportionell mot koncentrationen.

Funktion

Glaselektrodens aktiva del utgöres av ett tunt glasmembran som är semipermeabelt. Detta släpper endast (idealt) igenom vätejoner och om koncentrationen av vätejoner är olika innanför resp. utanför membranet vandrar vätejonerna från område med högre koncentration till lägre. En potentialdifferens erhålles som motverkar vätejontransporten och slutligen bildas ett jämviktstillstånd.

Elektrodprocesser

+pol	$AgCl(s) + e^- \rightarrow Ag(s) + Cl^-(a_{Cl,gl})$
membran	$H_3O^+(a_x) \rightarrow H_3O^+(a_{gl})$
-pol	$Ag(s) + Cl^-(a_{Cl,ref}) \rightarrow AgCl(s) + e^-$

Genom att beräkna ändringen i Gibbs energi för cellen och sedan omräkna detta till en elektromotorisk kraft E fås (när konstanter beräknats; vid 25°C):

$$E = E^o + 0{,}059 \cdot \log[H^+] \text{ volt}$$

E^o är en konstant som ej kan beräknas p.g.a. glasmembranets inner- och ytteryta inte har samma egenskaper av tillverkningstekniska skäl. Elektroden kalibreras därför i en lösning med känt pH.

Egenskaper

1) Noggrannhet ned till 0,03 pH-enheter.

2) -"- oberoende av observatören.

3) Mätningar påverkas ej av färg, konsistens, oxiderande eller reducerande ämnen. Mätvärdet är dock beroende av strömningens dynamik. Man erhåller oscillationer kring det korrekta pH-värdet.

4) Möjligt att göra kontinuerliga mätningar.

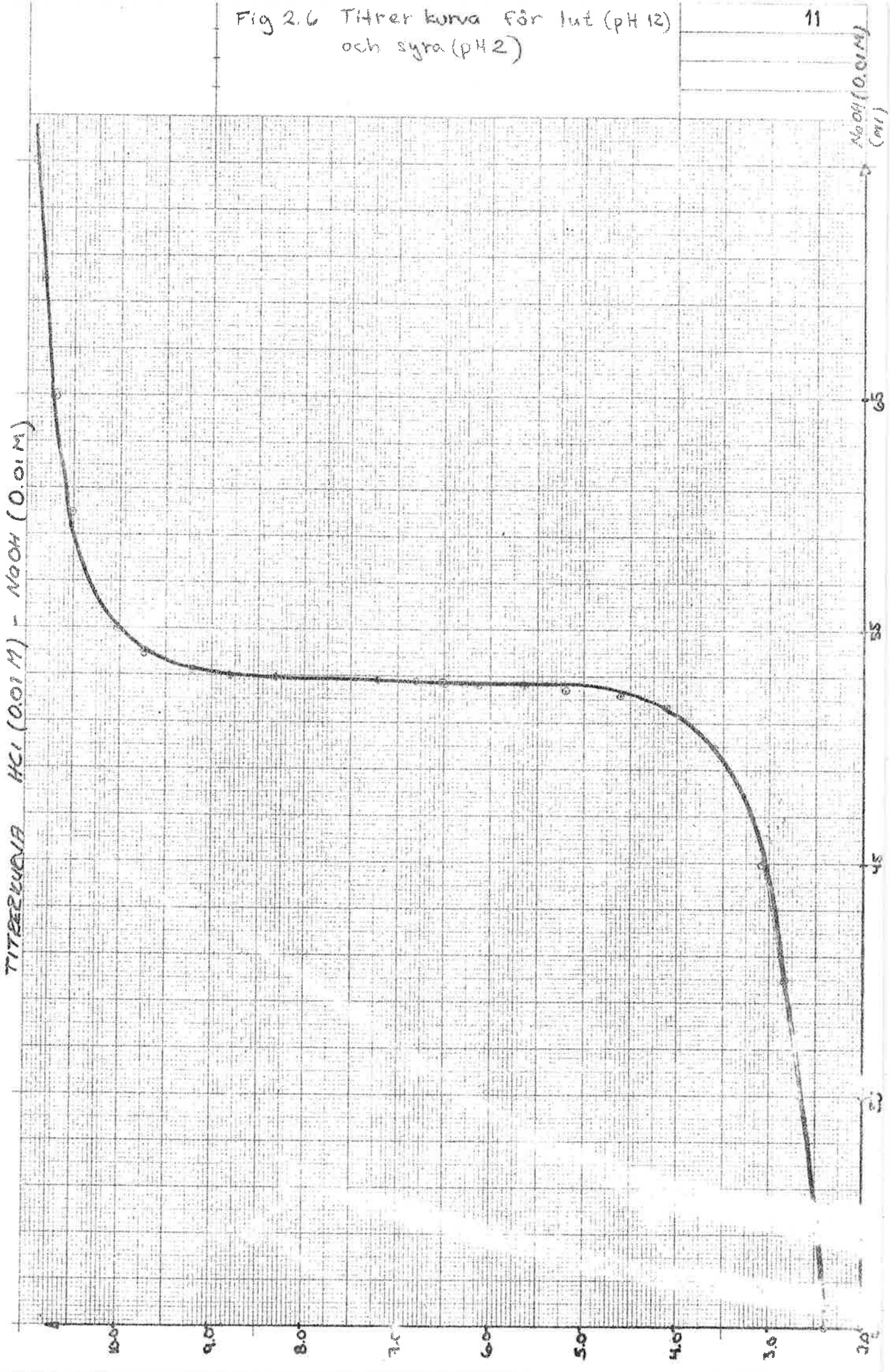
5) Glaselektroden släpper igenom Li^+, Na^+ och K^+ när de finns i höga koncentrationer i alkaliska lösningar (pH 10). Detta ger ett visst fel i uppmätt pH, som maximalt uppgår till ca 1/2 pH-enhet.

6) Glaset påverkas av starkt alkaliska lösningar vilket medför kortare livslängd för elektroden.

7) Glaselektrodens resistans är mycket hög och dessutom starkt temperaturkänslig (1 - 500 MΩ). Denna höga resistans fordrar en operationsförstärkare med speciell stor inimpedans som ingångssteg.

8) Reaktionstid: storleksordning några sekunder.

Fig 2.6 Titrer kurva för lut (pH 12) och syra (pH 2)



Att observera

Glaselektroden måste förvaras med membranet (kulan) nedsänkt i vatten. Om detta ej varit fallet måste membranet blötas under flera timmar före användandet.

2.3) Systemdynamiken

Bestämning av spänningen över motorerna som funktion av mätsignalen från pH-metern och det elektriska systemets förstärkning

Mätningen utföres på en uppställning enligt figur 2:7. Batterispänningarna är 8,0 V och spänningen över de båda dioderna är vid alla mättillfällena 1,6 V. Detta innebär, att totalspänningen över båda motorerna är 14,4 V och den totalt pumpade mängden vätska antas konstant.

Spänningen över motorerna (V_s över syramotorn och V_l över lutmotorn) uppmäts då ren syra (pH = 2) respektive ren lut (pH = 12) strömmar förbi pH-metern. Förstärkningen G, som definieras av potentiometerskalan på operationsförstärkaren, varieras från försök till försök.

Mätningarna utföres vid tre olika arbetsbelastningar hos den motor, vars vätska inte tillåts strömma upp genom röret till pH-metern:

1. tomgång, d.v.s. pumpen pumpar luft;
2. "free run", d.v.s. pumpen pumpar vätskan i separat slinga;
3. snörpt, d.v.s. röret, dit pumpen pumpar vätskan strypes, så att vätskan ej har något utlopp.

Skillnaderna i spänning är mycket liten: $\Delta V/V < 0{,}01$. Det är medelvärdet av de tre mätningarna (vid givet pH och G) som införes i figur 2:8.

Det elektriska systemet.

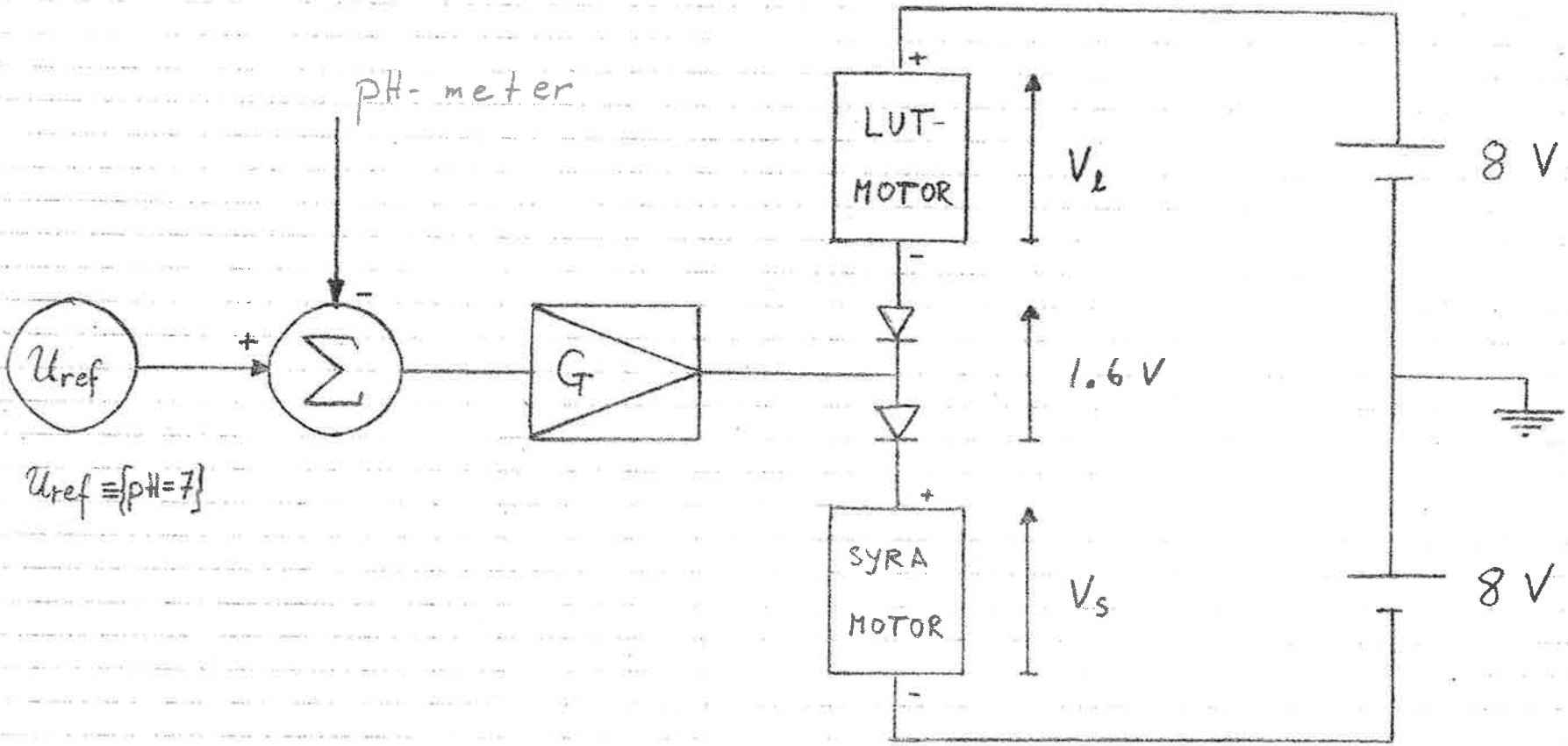


FIG 2:7

Efter studium av de inritade punkterna i figur 2:8 antas att spänningarna är linjärt beroende av såväl mätsignalen från pH-metern som förstärkningen G.

Det bör observeras, att om $V_s > V_1$ får den genom grenröret pumpade vätskan pH = 2 och om $V_1 > V_s$ blir vätskans pH = 12. Detta beror på titrerkurvans utseende (se figur 2:6): en liten övervikt för endera vätskan i närheten av ekvivalenspunkten får ett kraftigt genomslag i pH-värdet.

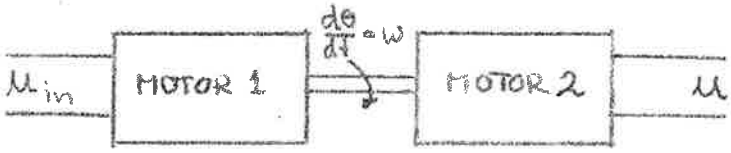
Om spänningen över endera motorn understiger 6,80 V slutar denna motor att pumpa över huvud taget.

OBSERVERA, att denna mätning gäller ideala motorer och pumpar. Under försökens gång, visar det sig att de båda pumparna pumpar olika för samma spänning, och således ligger inte ekvivalenspunkten vid $V_s = V_1 = 7{,}20$ V. Vidare blir den totalt pumpade vätskemängden (d.v.s. strömningshastigheten) beroende på spänningsfördelningen över motorerna. Ekvivalenspunktens förändring spelade mindre roll, eftersom referensvärdet U_{ref} kunde inställas godtyckligt, medan strömningshastighetens dynamiska beteende påverkade mätsignalen från pH-metern.

Bestämning av överföringsfunktion och tidskonstant för pumpmotor.

U t f ö r a n d e o c h t e o r i

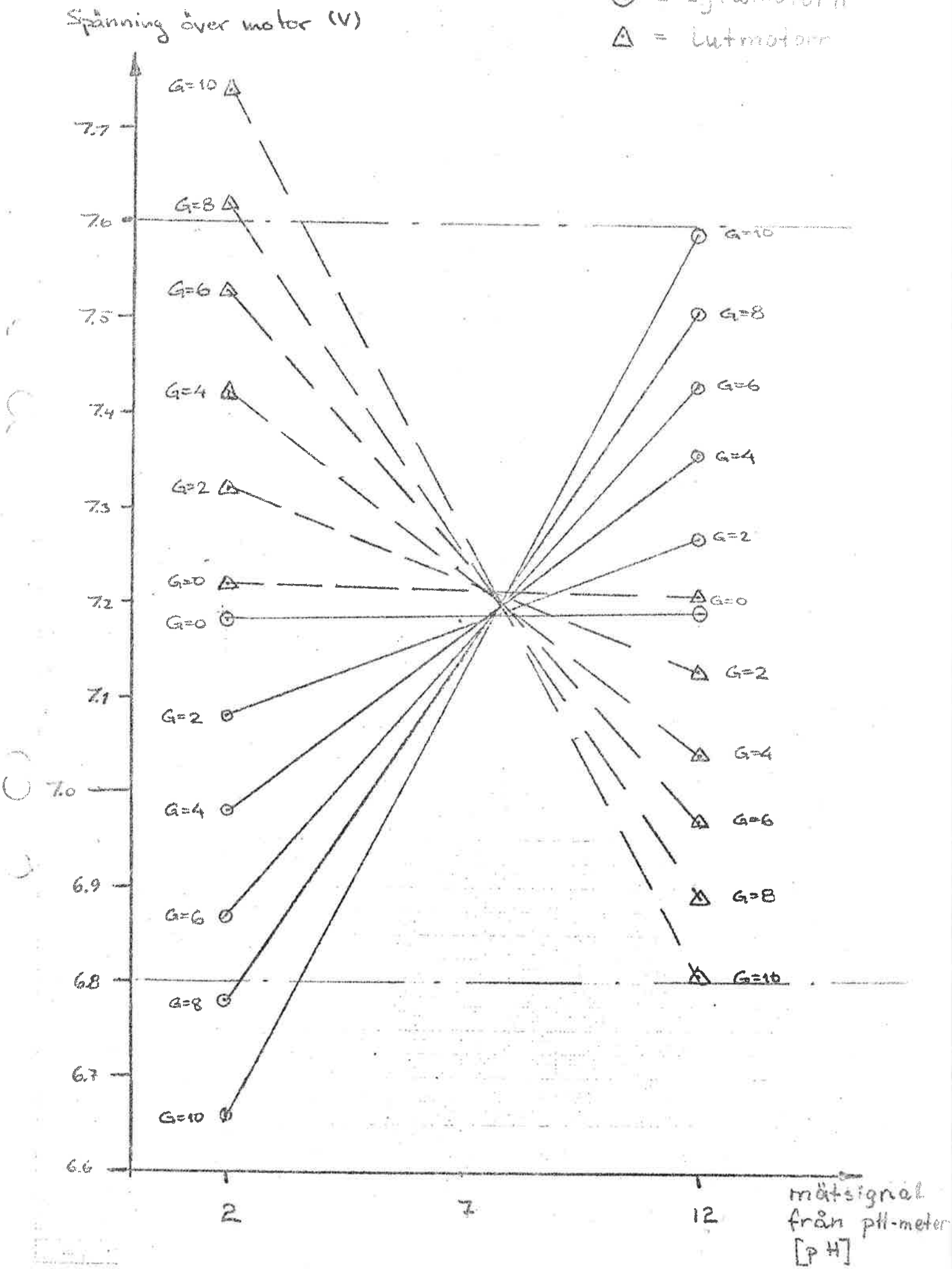
Vid försöket användes pumpmotorerna så att den ena motorn får driva den andra som i sin tur fungerar som generator och ger en utsignal.



På systemet utfördes en frekvensanalys enligt lab. 2. Ur det erhållna Bode-diagrammet (figur 2:9) bestämdes överföringsfunktionens G för systemet.

FIGUR 2:8

G = förstärkning
⊙ = syramotorn
△ = lutmotorn



$G(s) = 1/(1+s/5)$

Vi är intresserade av överföringsfunktionen $G_s(s) = Q/u_{in}$ där $Q =$ $=$ flödet från den tänkta pumpen på den andra motorns plats.

Med beteckningar enligt figur gäller:

$u = d\theta/dt$

Men

$G = u/u_{in} = s\cdot\theta/u_{in} = 1/(1+Ts)$

Detta medför att

$\theta/u_{in} = 1/(1+Ts)s$

Vi betraktar den drivna motorns tröghetsmoment som likvärdigt med friktionsmotståndet hos pumpen i dynamiskt avseende.

För pumpen gäller att flödet $Q = K\cdot d\theta/dt = Ks\theta$, där K konstant. Således blir den sökta överföringsfunktionen

$G_s(s) = Q/u_{in} = K/(1+Ts)$

R e s u l t a t: $G_s(s) = K/(1+s/5)$

S l u t s a t s:

Tidskonstanten är således $T \approx 0{,}2$ sek, vilket innebär att den med all sannolikhet är försumbar jämfört med andra tidskonstanter i systemet.

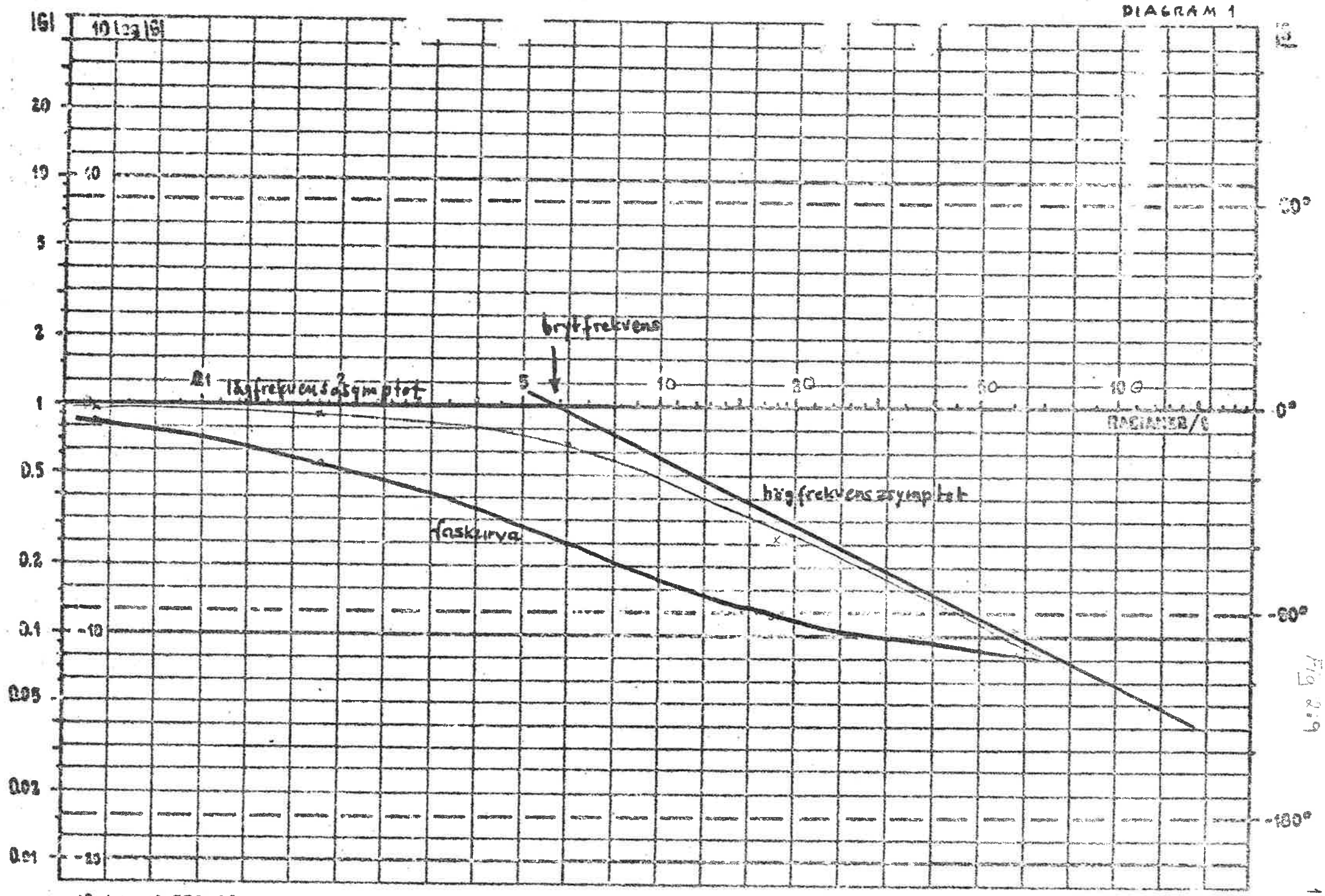


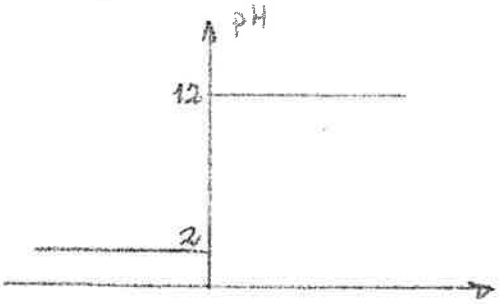
DIAGRAM 1
|G|
10 log |G|
20
10
5
2
1
0.5
0.2
0.1
0.05
0.02
0.01
10
-10
-20
0°
-90°
-180°
brytfrekvens
lågfrekvensasymptot
högfrekvensasymptot
faskurva
RADIANER/S
10:1 ∘ + 10 DECILOG = + 20 DECIBEL = + 2.30 NEPER
INSTITUTIONEN FÖR REGLERINGSTEKNIK L.TH.

Fig 2:9

2.4) Totala dynamiken

Bestämning av tidsfördröjning och tidskonstant i systemet

Titrerkurvans utseende (se figur 2:6) gjorde att vi bestämde oss för följande idealiserade pH-kurva:



Detta medför att pH nere i grenen av röret alltid är antingen 2 eller 12.

För att bestämma tidsfördröjningen och tidskonstanten i systemet gjordes följande experiment:

E x p e r i m e n t I:

Spänningen över syramotorn V_s inställdes så att bara syra pumpades i systemet. Utgången på pH-metern kopplades till y-ingången på ett oscilloskop. Med hjälp av ett negativt steg från en signalgenerator ändrades V_s så mycket att systemet för $t > 0$ bara pumpade bas (steget ändrade ej $V_s + V_b = 14{,}4V$). Figur 2:10 visar de kurvor som erhölls för olika inställning på potentiometerskalan på förstärkaren G. För G = 2 blir steget ej tillräckligt stort för att systemet enbart skall pumpa bas.

E x p e r i m e n t I I:

Spänningen över syramotorn inställdes så att bara bas pumpades i systemet. Med hjälp av ett positivt steg ändrades V_s så att systemet för $t > 0$ bara pumpade syra. Figur 2:11 visar de kurvor som erhölls. För G = 5 blir steget ej tillräckligt stort för att systemet enbart skall pumpa syra.

Ur figurerna 2:10 och 2:11 drogs följande slutsatser:

T i d s f ö r d r ö j n i n g e n = T_1 = den tid det tar från det att steget lägges på tills ändringen når pH-metern:

$$\begin{cases} (T_1)_I = 8 \text{ s} \\ (T_1)_{II} = 15 \text{ s} \end{cases}$$

T i d s k o n s t a n t e n = T_2: När steget når pH-metern är det ej längre idealt steg p.g.a. den uppblandning som sker på vägen. Vi får därför en tidskonstant som beror på trögheten i pH-metern samt "utsuddning" av steget p.g.a. blandning.

$$\begin{cases} (T_2)_I = 5 \text{ s} \\ (T_2)_{II} = 10 \text{ s} \end{cases}$$

S l u t s a t s: skillnaden i T_1 och T_2 för de båda experimenten beror på osymmetriska motorer och pumpar.

M o d e l l: En tidsfördröjning T_I i ett system ger upphov till en faktor e^{-sT_I} i systemets överföringsfunktion.
Tidskonstanten T_2 motsvaras av en faktor $1/(1+sT_2)$ varför vårt systems överföringsfunktion blir:

Om motorer och pumpar antages symmetriska och

$$\begin{cases} T_1 = 10 \text{ s} \\ T_2 = 7{,}5 \text{ s} \end{cases}$$

$$G(s) = K \cdot e^{-10s}/(1+7{,}5s)$$

Fig 2.10

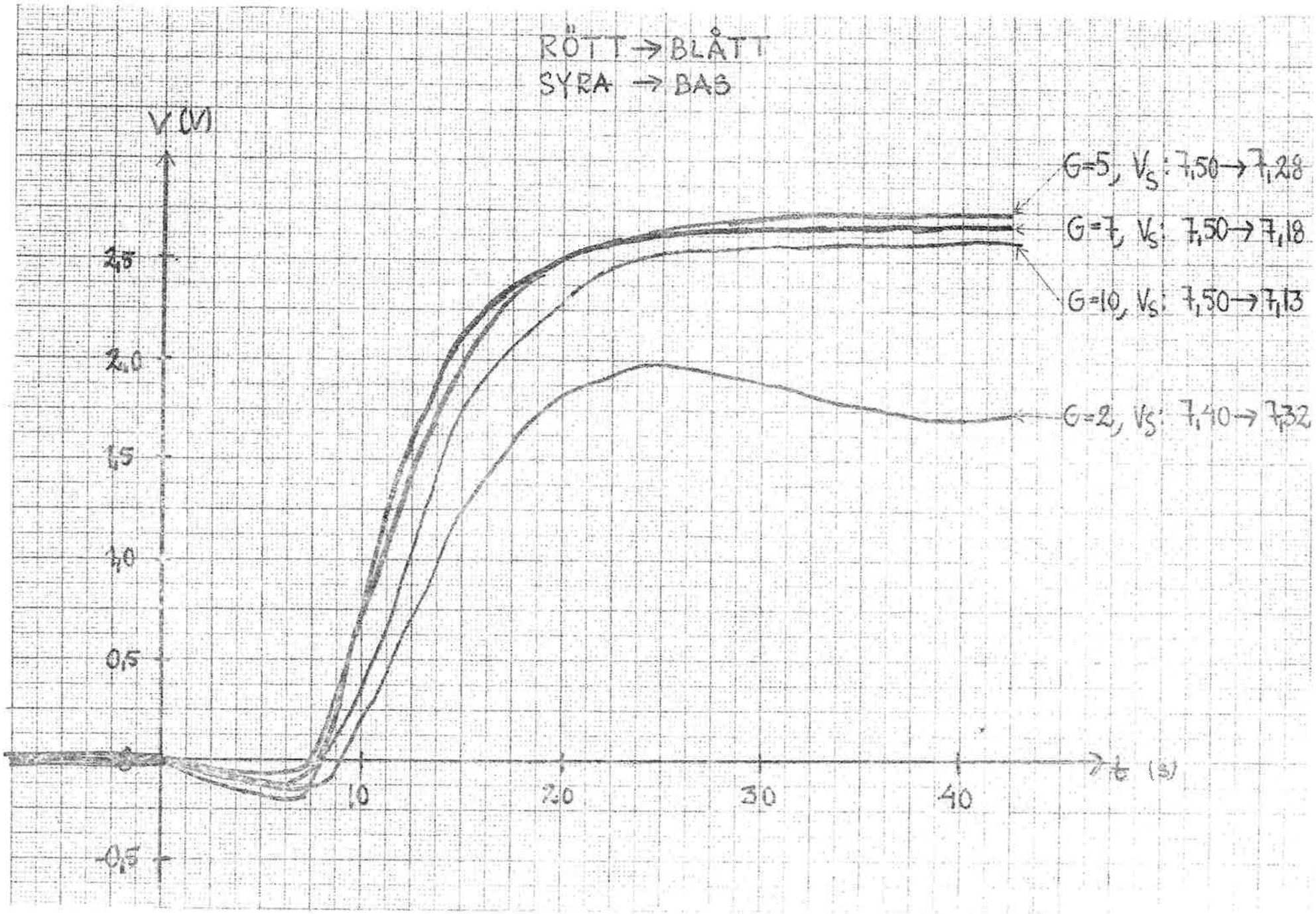
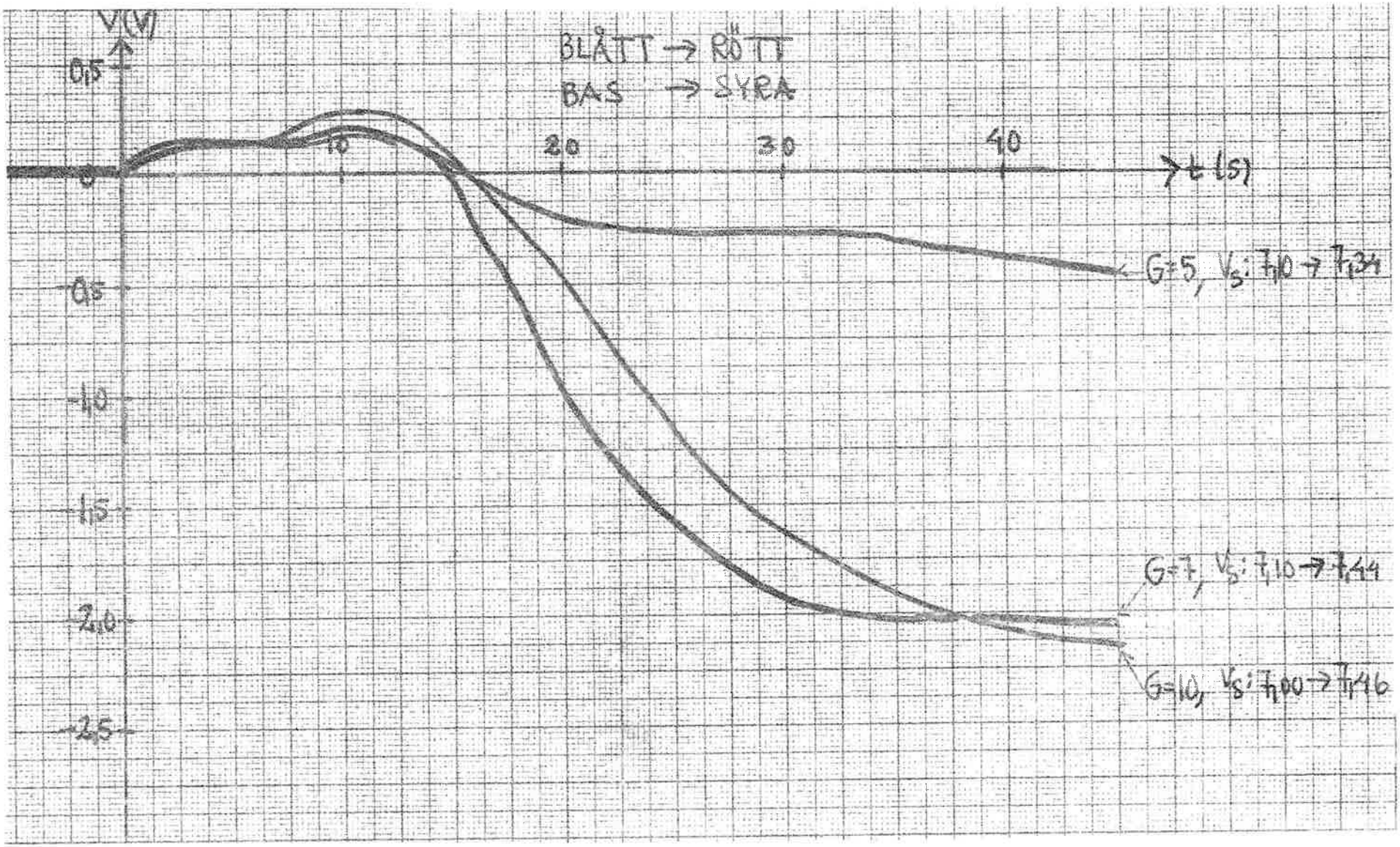

RÖTT → BLÅTT
SYRA → BAS
V (V)
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0
-0,5
10
20
30
40
t (s)
G=5, Vs: 7,50 → 7,28
G=7, Vs: 7,50 → 7,18
G=10, Vs: 7,50 → 7,13
G=2, Vs: 7,40 → 7,32

Fig 2.11


V(V)
0,5
0
-0,5
-1,0
-1,5
-2,0
-2,5
10
20
30
40
t (s)
BLÅTT → RÖTT
BAS → SVRA
G=5, Vs: 7,10 → 7,34
G=7, Vs: 7,10 → 7,44
G=10, Vs: 7,00 → 7,46

3. Problemställningen

Själva pH-processen i vårt system utgör en olinjär länk. Denna länk ger en förstärkning som beror av insignalen. pH-omslaget sker så snabbt att länken fungerar som ett relä. Jämför titrerkurvan i figur 2:6.

Vid små insignaler ger länken stor förstärkning. Detta gör att systemet dels blir instabilt, dels växer insignalen eftersom systemet är enkelt återkopplat. Men då insignalen ökat till ett visst värde sker omslag och förstärkningen minskar kraftigt. Men då passeras den stabila punkten vid börvärdet och systemet blir instabilt "på andra hållet" samtidigt som insignalen minskar igen. När insignalen blivit tillräckligt liten sker omslag tillbaka till den höga förstärkningen och processen upprepas igen.

Systemet kommer alltså att svänga mellan två olika tillstånd. Enligt kap. 2 kunde hela vårt system beskrivas med en 1:a ordningens överföringsfunktion enligt:

$$G(s) = K \cdot \frac{e^{-10s}}{1 + 7{,}5s}$$

Denna överföringsfunktion åskådliggöres i figur 3.1 (Nyqvist-diagram) för förstärkningen K = 1.

Ur fig. 3.1 framgår att K får vara max 1,8 c:a för att systemet skall vara stabilt.

En enkel stegsvarsanalys visade att pH-länken gav upphov till en förstärkning som varierade mellan -80 och 80. Om man försöker minska regulatorförstärkningen finner man att systemet blir så långsamt att det aldrig hinner svänga in sig.

Hur vårt system beter sig förklaras på följande sätt:

Vi antar att pumparna pumpar syra genom röret. Då ger pH-länken (pH-meter plus pH-förstärkare) förstärkningen +80 och insignalen växer

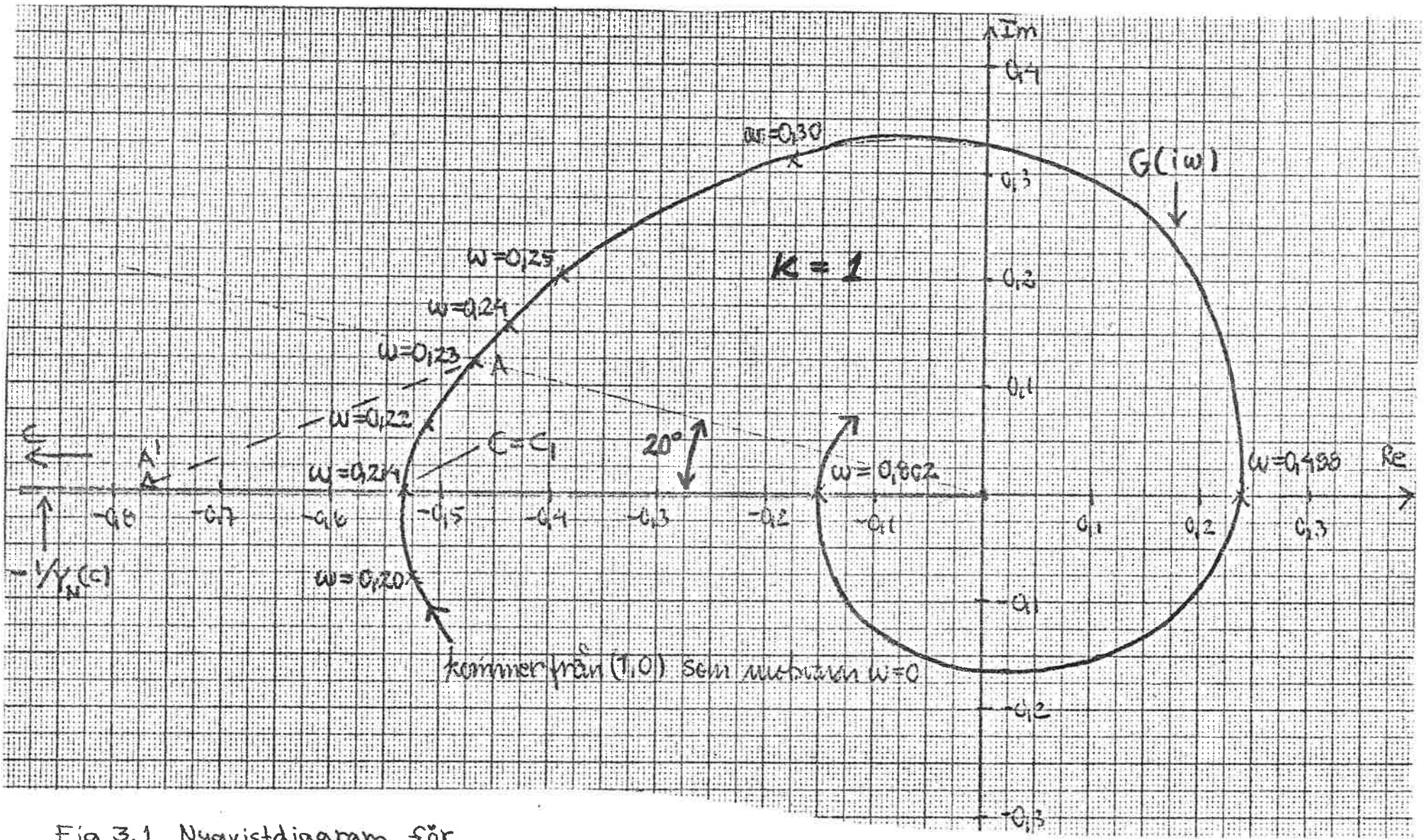


Fig 3.1 Nyqvistdiagram för

$$G(s) = \frac{e^{-10s}}{1+7{,}5s}$$

snabbt och omslag till förstärkningen -80 sker. Då börjar pumparna pumpa bas, men eftersom pH-metern sitter långt ifrån rörinloppet registrerar den fortfarande syra i röret under ytterligare ca. 10 sek. Därefter når basen fram till pH-metern. Insignalen minskar då snabbt och omslag tillbaka till förstärkningen +80 sker. Insignalen håller sig konstant tills den nya syran når fram till pH-metern, då den återigen växer snabbt och omslag sker. Pumparna kommer alltså att omväxlande pumpa en transportlängd syra och en transportlängd bas (transportlängd = rörlängd mellan inlopp och pH-meter).

Hade pH-länken fungerat linjärt och ej som olinjärt relä och pH-metern suttit i rörinloppet hade processen kunnat regleras med den ursprungliga enkla återkopplingen.

3.1) Tidsfördröjningen

På grund av transportsträckan mellan insprutning och registrering av pH-värde erhålles enl. kap. 2 en tidsfördröjning på max 15 sekunder. Tidsfördröjningen ger upphov till en kraftig negativ fasförskjutning. Man kan delvis kompensera tidsfördröjningen genom derivatorer men i detta fall skulle signalen behöva deriveras så många gånger att det i praktiken är uteslutet då signalen redan efter 3 - 4 deriveringar blivit så "brusig" att den är oanvändbar.

Det finns i stället en reglermetod speciellt utvecklad för att kompensera tidsfördröjningar, s.k. Otto-Smith-reglering. Se vidare kap. 4.3.

3.2) Olinjäriteten

För att illustrera olinjäritetens inverkan gjordes simuleringar på institutionens processdator (PDP-15). Vid simuleringen användes programpaketet SIMNON, som är avsett för simulering av olinjära system.

På grund av svårigheter med simulering av tidsfördröjningar tvingades vi ansätta en modell med ett antal "tankar", kopplade i serie.

Som modell för pH-kurvan hade vi en styckvis linjär kurva enligt figurerna 3:2 och 3:3. Lutningen på den icke-konstanta delen kunde varieras.

Modell 1: en tank och enkel återkoppling (fig. 3:2). Resultat som visar pH som funktion av tiden i figur 3:4. De olika kurvorna i figur 3:4 härrör från skiftande begynnelsefel. Denna modell visar sig vara alltför enkel för att beskriva det verkliga systemet.

Modell 2: två tankar och enkel återkoppling. Med denna modell kunde vi få de svängningar som observerades i det verkliga systemet. Stabiliteten berodde helt på lutningen på vår modell av pH-kurvan, så att en kraftig lutning gav ett instabilt system. Resultat med pH som funktion av tiden i fig. 3:5.

Modell 3: tre tankar och fasretarderande återkoppling (fig. 3:3). I detta fall fick vi alltid en instabil svängning som visas i fig. 3:6.

fig 3.2

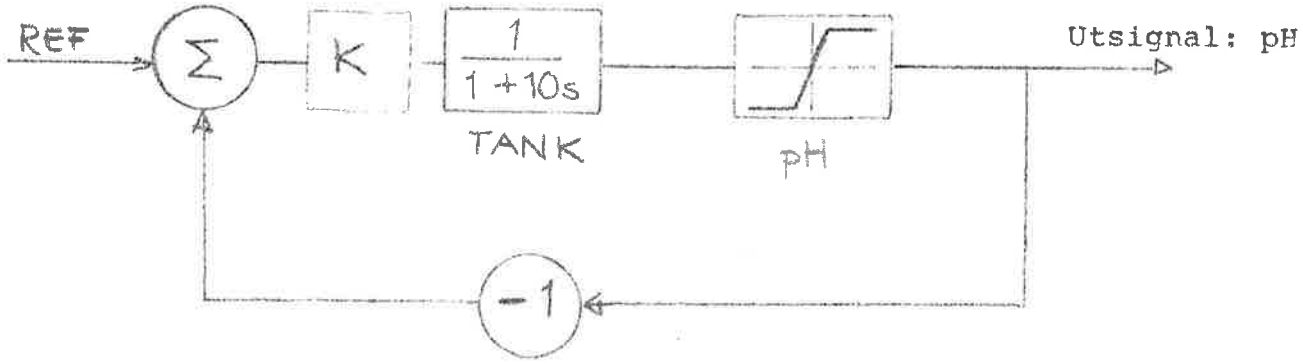

REF
Σ
K
1
1 + 10s
TANK
pH
Utsignal: pH
-1

fig 3:3

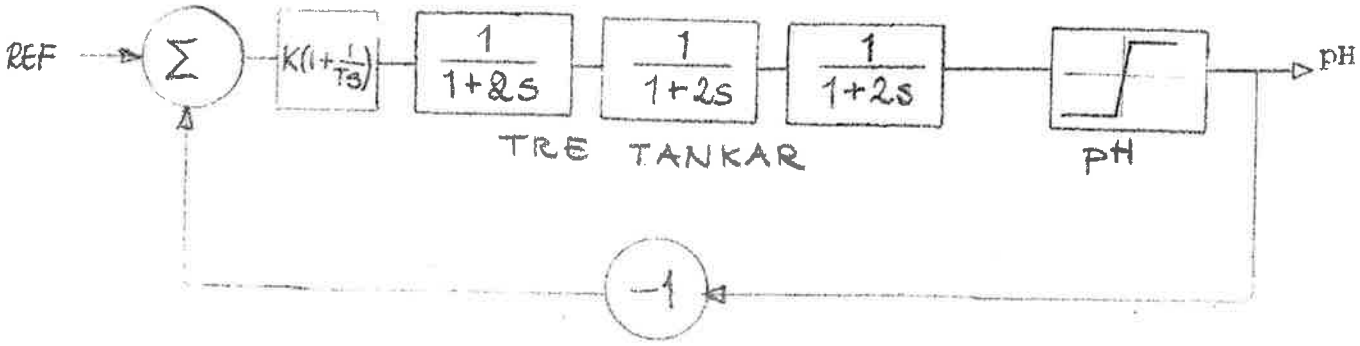

REF
Σ
K(1+1/Ts)
1
1+2s
1
1+2s
1
1+2s
TRE TANKAR
pH
pH
-1

Fig 3.4 **PLOT T-Y1** "ENTANK1 REF:0 A:.1 T1:10 K:1 X:.01, 1, 6

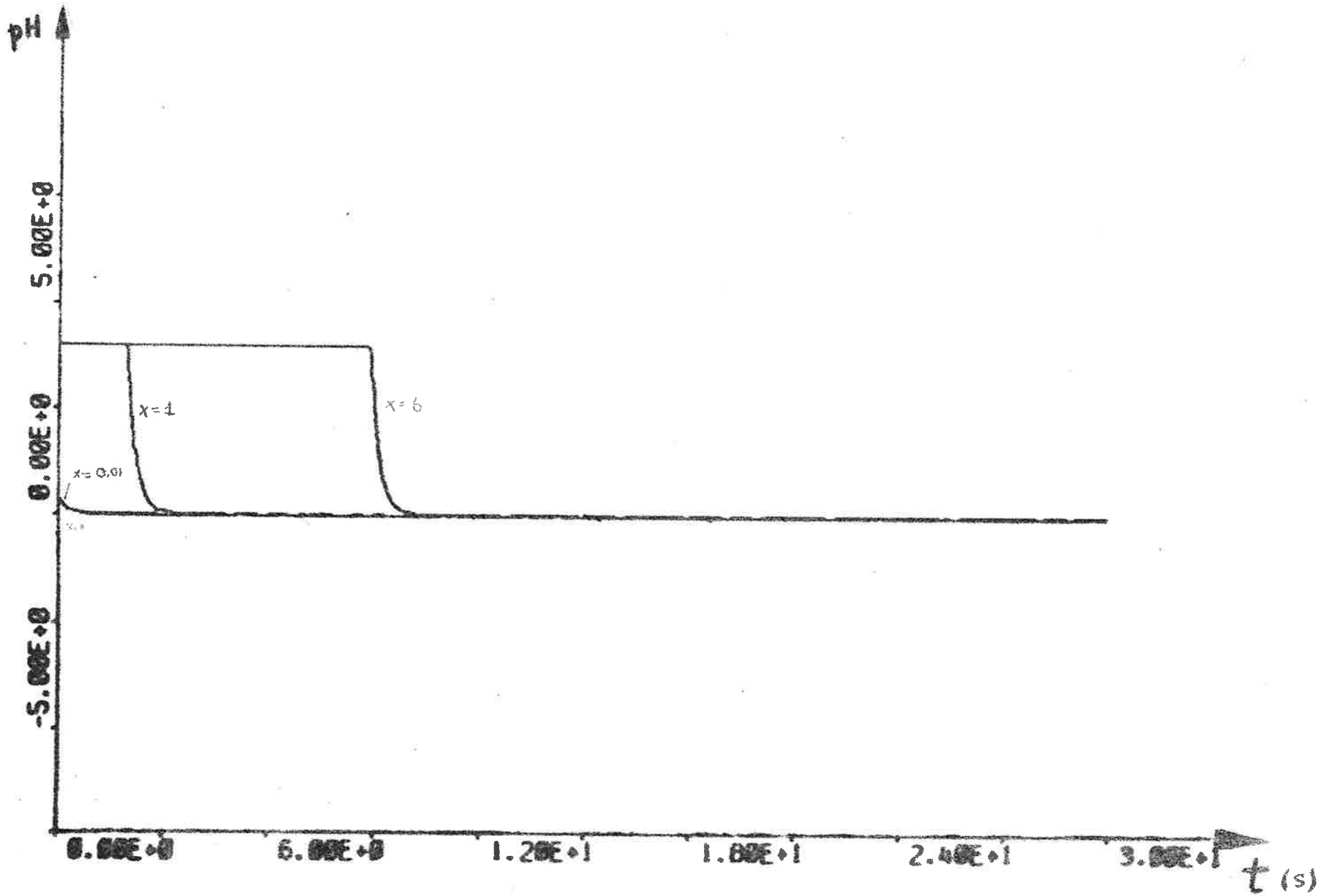


Fig 3.5 pH & INSIGNAL VID BEGYNNELSEFLE: pH 7-5

Avtagande svängning eftersom lutningen på pH-kurvan är relativt svag

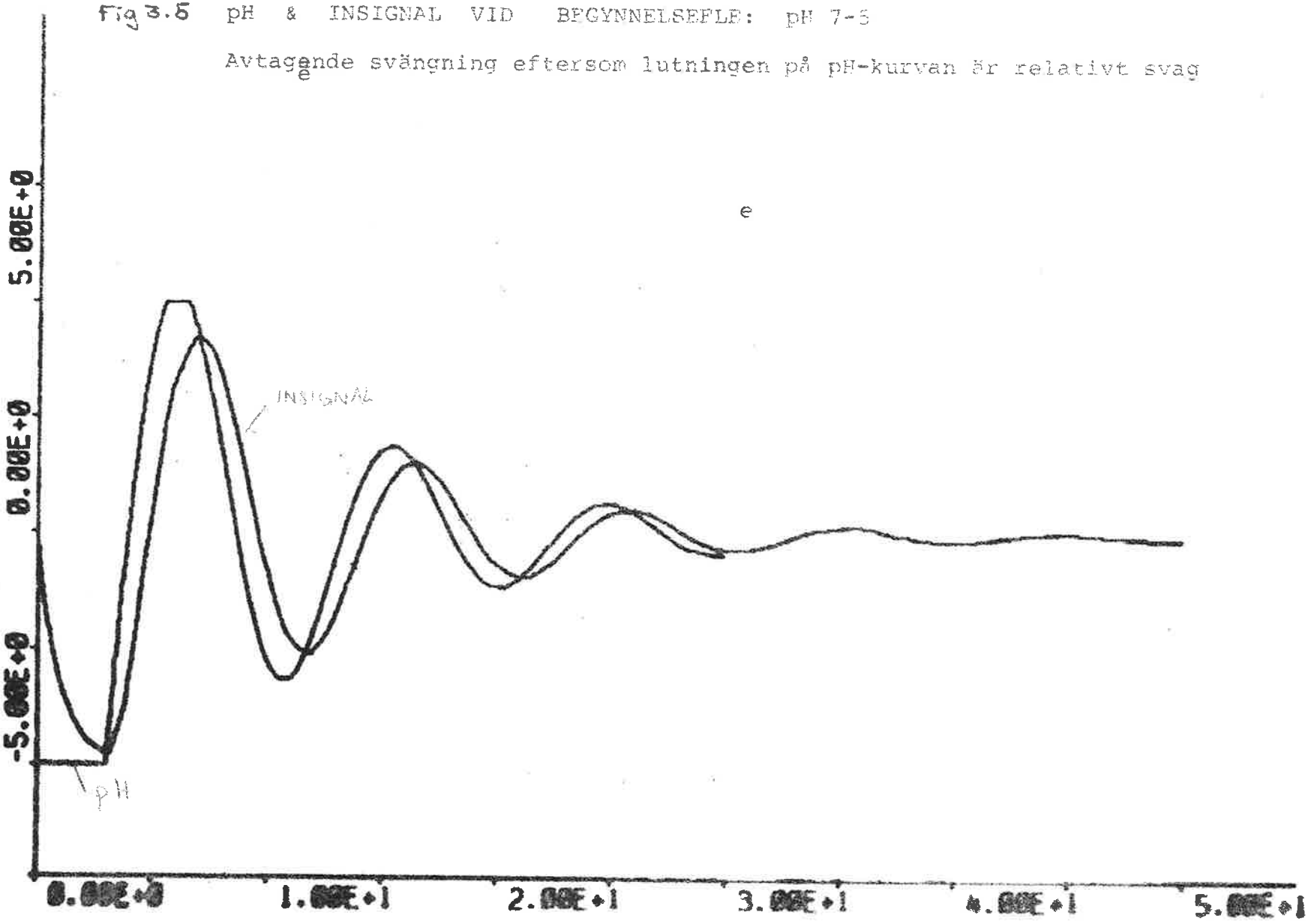
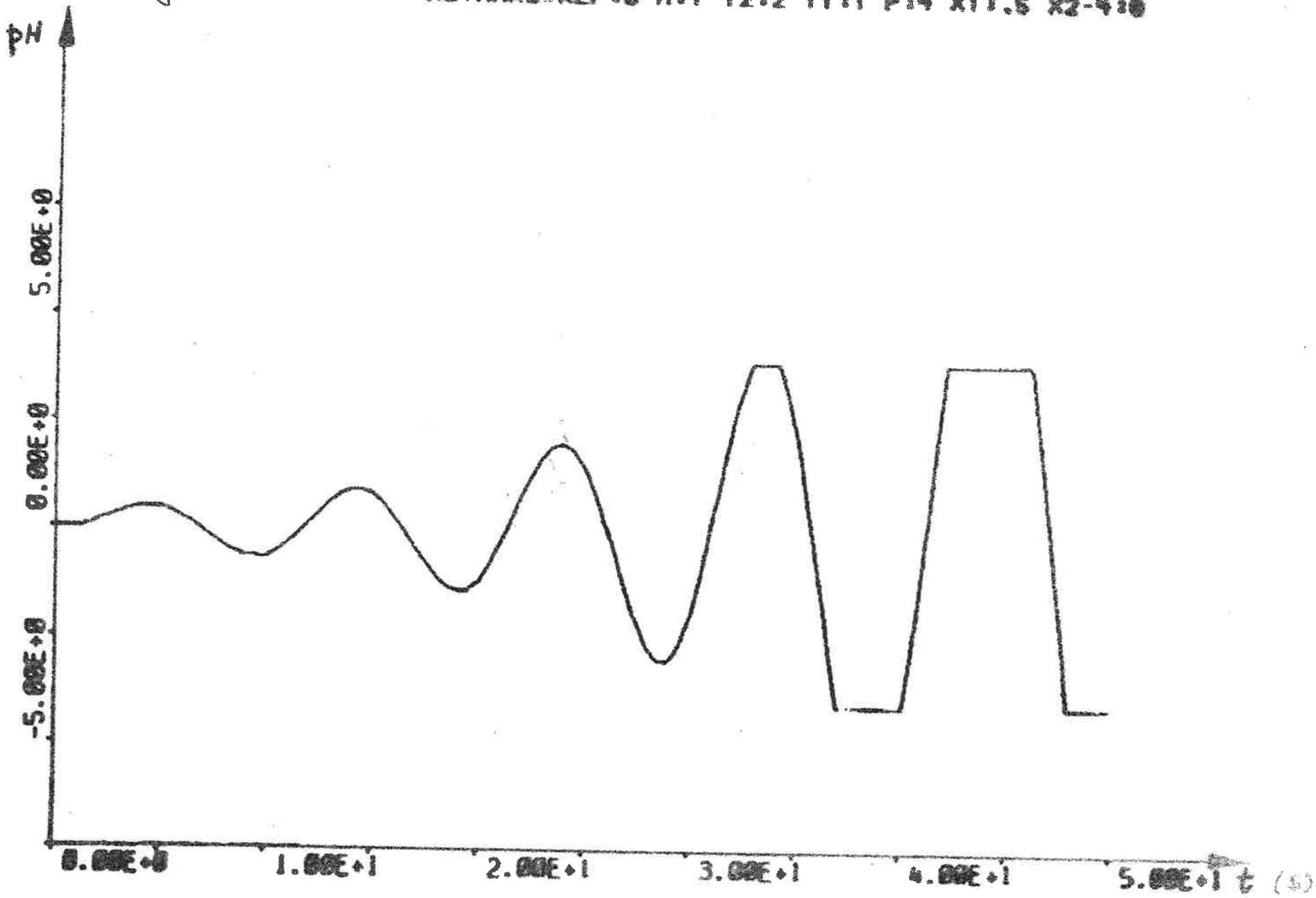


Fig3.6 PLOT T-Y1 "TRETANK01REF:0 A:1 T2:2 T1:1 P:4 X1:.5 X2-4:0

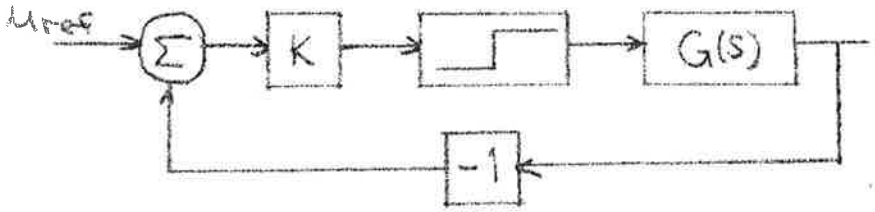


4. Analog reglering

I kapitel 2 kom vi fram till att vårt system kunde beskrivas med hjälp av en överföringsfunktion

$$G(s) = e^{-10s}/(1+7,5s)$$

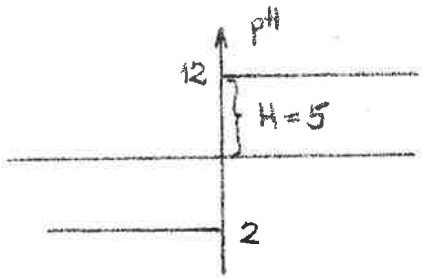
Vi gjorde en stabilitetsundersökning för nedanstående system m.h.a. beskrivande funktion (se kap. 5 i reglerteknik FK olinjära system).



Vi antar att det existerar en sinusformad signal på den olinjära länkens ingång

$$x(t) = C\sin \omega t$$

Den olinjära länkens utsignal är då periodisk och har periodtiden $2\pi/\omega$. Utsignalens grundton har amplitud och fasläge relativt insignalen som ges av den beskrivande funktionen. I vårt fall är den olinjära länken:



Den beskrivande funktionen för denna reläfunktion blir

$$\begin{cases} \mathrm{Re}\{Y_N(C)\} = 4\cdot H/\pi\cdot C \\ \mathrm{Im}\{Y_N(C)\} = 0 \end{cases}$$

Överföringsfunktionen för hela systemet blir nu

$$G^1(s) = G(s)/\left(1/Y_N(C) + G(s)\right)$$

Vi kan avgöra stabiliteten med en grafisk metod. I det komplexa G-planet ritar vi (se figur 4:1)

1) Nyqvist-diagrammet för G(s)

2) $-1/Y_N(C)$ som funktion av amplituden C

Nedanstående tabell ligger till grund för Nyqvist-diagrammet för G(s).

$$G(i\omega) = e^{-i\omega 10}/(1+7{,}5i\omega)$$

$$|G(i\omega)| = 1/\left(\sqrt{1 + (7{,}5\omega)^2}\right)$$

$$\arg G(i\omega) = -10\omega - \arctan 7{,}5\omega$$

ω	$\arg G(i\omega)$	$\lvert G(i\omega)\rvert$	ω	$\arg G(i\omega)$	$\lvert G(i\omega)\rvert$
0	0°	1,0	0,24	$-200{,}5^\circ$	0,46
0,2	$-172{,}5^\circ$	0,53	0,25	$-207{,}3^\circ$	0,44
0,214	$-180{,}0^\circ$	0,53	0,3	$-240{,}5^\circ$	0,36
0,22	$-186{,}0^\circ$	0,50	0,498	$-360{,}0^\circ$	0,24
0,23	$-193{,}7^\circ$	0,48	0,802	$-540{,}0^\circ$	0,15

Vi konstaterar (se figur 4:1) att $-1/Y_N(C)$ kommer att ligga innanför kurvan för G(s) då $C < C_1$ och utanför då $C > C_1$ vilket medför att systemet ställer in sig så att det svänger med amplituden C_1 och vinkelfrekvensen $\omega_1 = 0{,}214$ rad/s.

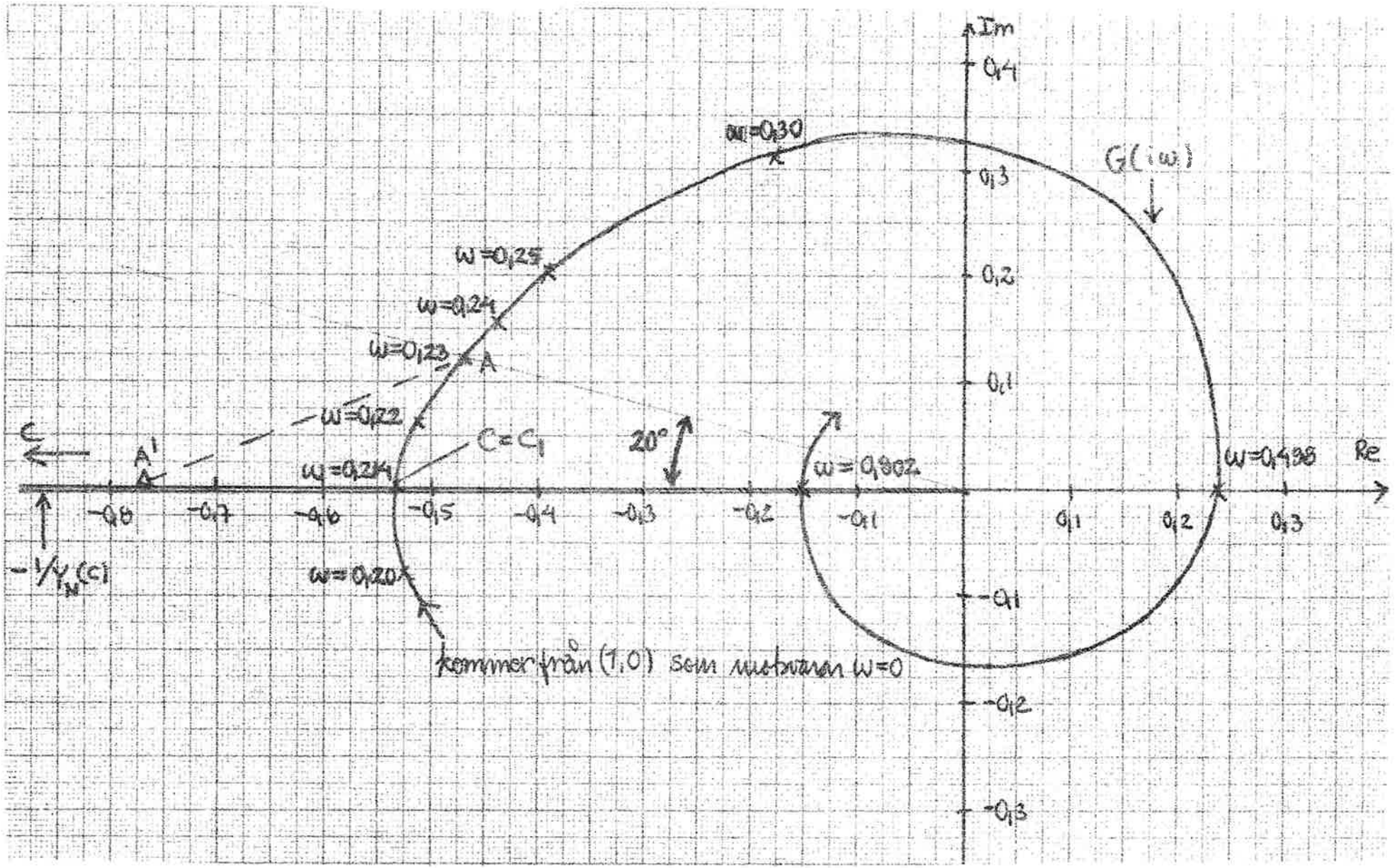

Im
0,4
0,3
0,2
0,1
-0,1
-0,2
-0,3
Re
-0,8
-0,7
-0,6
-0,5
-0,4
-0,3
-0,2
-0,1
0,1
0,2
0,3
ω=0,30
G(iω)
ω=0,25
ω=0,24
ω=0,23
A
ω=0,22
C
A'
ω=0,24
C=C1
20°
ω=0,902
ω=0,438
-1/YN(C)
ω=0,20
kommer från (1,0) som motsvarar ω=0

Fig 4.1

4.1) Fasavancerande reglering

Som framgått av analysen av systemet med hjälp av beskrivande funktion har vi ett Nyqvist-diagram enligt figur 4:2.

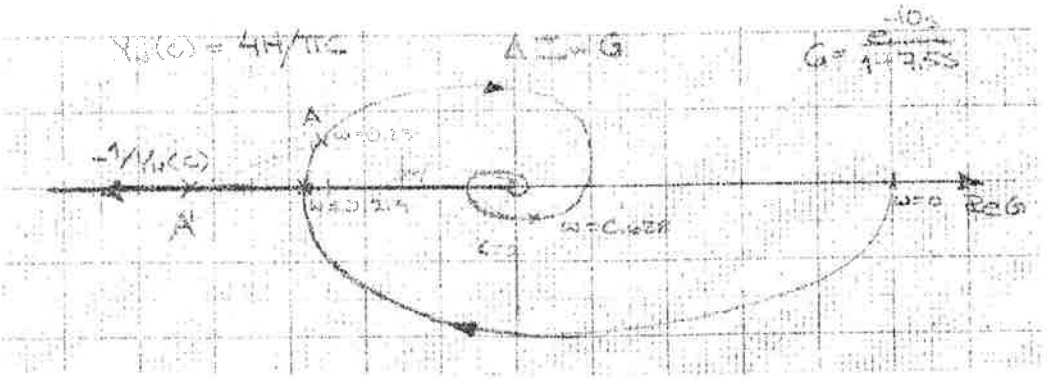


Fig. 4:2

Vi ser att något sätt att kompensera bort självsvängningarna inte går att åstadkomma då vi har en transportfördröjning, eftersom vi alltid får en skärningspunkt mellan frekvenskurvan och $-1/Y_N(C)$, d.v.s. en självsvängning med den frekvens och den amplitud som skärningspunkten ger. Amplituden kan vi ändra på genom att ändra förstärkningen i kretsen och frekvensen kan vi ändra med en kompenseringslänk. Med en kompenseringslänk av lead-typ kan vi åstadkomma en höjning av frekvensen. Om vi lyckas höja självsvängningens frekvens så att dess periodtid blir liten i förhållande till transportfördröjningen kan vi hoppas att blandning av komponenterna under strömningen genom röret åstadkommer en utjämning. Vi placerar alltså ett lead-nät i vårt system enligt figur 4:3.

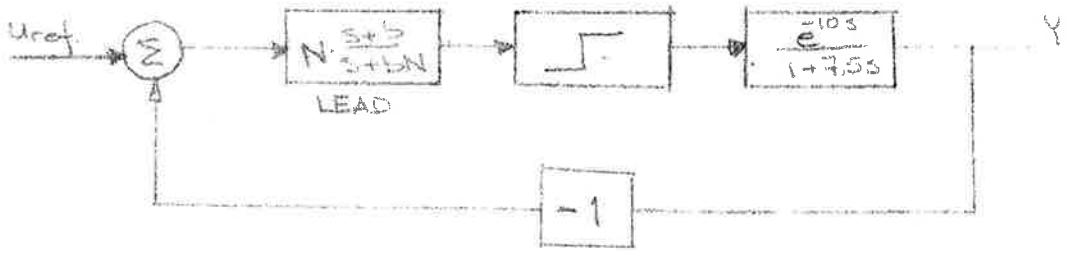


Fig. 4:3

Ett lead-nät har en överföringsfunktion

$$G_k(s) = N \frac{s + b}{s + bN}$$

och vi valde N = 2 och b = 0,1 till att börja med vilket ger en fasavancering på 20° i området kring självfrekvensen. Införes $G_k(s)$ som kompensering i vårt system så kommer alltså punkten A i figur 4:2 att överföras till A', d.v.s. spiralen vrids moturs 20° och ökar i storlek p.g.a. ändrad förstärkning, men då vi har en ratt för reglering av förstärkningen är denna storleksändring ganska ointressant för oss. Vårt system är således fortfarande självsvängande, men frekvensen, d.v.s. skärningspunkten, har ändrats så vi nu har en frekvens på 0,23 rad/s.

Vi ser att den höjning av egenfrekvensen vi lyckades åstadkomma var ganska blygsam, då vi önskade en vinkelfrekvens som var betydligt större än $2\pi/10 = 0,63$ rad/s, för att få en sådan krävs en fasavancering på betydligt mer än 270°, vilket krävs för att egenfrekvensen skall bli 0,63 rad/s (fig. 4:2). Vid utförda experiment befanns systemets egenfrekvens vara 0,27 rad/s, varför vi dimensionerade om vårt nät. Vi valde parametrar så att maximal fashöjning erhölls för denna frekvens, nämligen b = 0,1 och N = 10. Komponentvalet och konstruktionen framgår av figur 4:4 och nedanstående tabell.

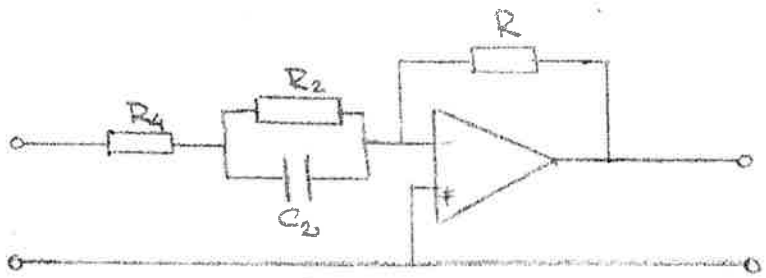


Fig. 4:4 - Lead-nät.

	C_2	R_2	R_4	R	b	N
LEAD I	10μF	1MΩ	1MΩ	2,2MΩ	0,1	2
LEAD II	10μF	1MΩ	120kΩ	1,2kΩ	0,1	10

Experiment

Vårt system kopplades upp enligt figur 4:3 med lead-näten inplacerade. På minnesoscilloskop registrerades dels spänningen från pH-metern dels spänningen över syramotorn.

Med fasavancerande reglering gick det att höja frekvensen hos svängningen, dock ej så mycket att det gick att få en tillfredsställande reglering.

Våra försök att reglera systemet med enbart ett lead-nät visade sig alltså tämligen utsiktslösa och vi fick söka andra vägar för att reglera vårt system.

4.2) Påtvungna svängningar

Som tidigare påpekats var vårt mål att söka öka svängningarnas frekvens för att få nytta av utjämningsförloppen i strömningen i röret. Inspirerade av detta kopplade vi in en sinussignal på summatorn i vårt system. Denna signal gav vi en frekvens som var hög i förhållande till egenfrekvensen och en amplitud som var lite större än den från pH-metern. Vi anslöt alltså en sinusspänning med 4 volts amplitud och 1 Hz frekvens.

Därefter ställde vi med hjälp av DC-servot in utflödet från röret på pH = 7 (indikatorn gul). Vi kopplade ur vår sinusvåg och systemet började svänga med sin egenfrekvens mellan pH = 2 och pH = 12. Vi kopplade åter in vår sinussignal och efter cirka 1 minut hade systemet ställt in sig på att den vätska som passerade pH-metern blev gul (pH = 7). Vi kopplade in signalen från pH-metern på oscilloskop för att observera förloppet mer "objektivt". Som tidigare påpekats så är pH-metern ytterst känslig för variationer i strömningshastigheten hos den förbipasserande vätskan, så den signal vi erhöll på skärmen var en svängning med frekvensen 1 Hz. Vi observerade dock att pH-metern svängde kring det inställda värdet och antog att oscillationerna berodde på variationer i strömningshastigheten.

Man skulle kunna tänka sig att en ytterligare höjning av den påtvungna frekvensen vore önskvärt, men det visade sig att motorerna i så fall ej hann med (jfr motorernas tidskonstant), varför 1 Hz ansågs optimalt. Ytterligare ökning av amplituden gav inga större förändringar medan däremot en viss minsta amplitud krävdes för att metoden skulle fungera.

Vi försökte därefter reglera systemet till andra pH-värden genom att ändra balanseringen i DC-servot och det visade sig att för måttliga förändringar från pH = 5 till pH = 9 så ställde systemet in sig på önskat pH-värde, efter cirka en minut. Försök gjordes också med triangelvåg, varvid liknande resultat erhölls.

Hur uppstår denna effekt?

Antag att motorerna är lika bra, då gäller approximativt för pH nere i förgreningen, som funktion av spänningen över syramotorn, ett förhållande enligt figur 4:5.

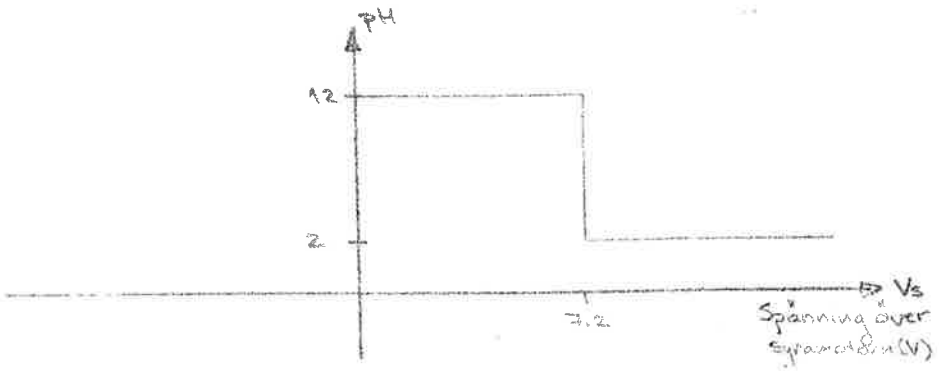


Fig. 4:5

D.v.s. så fort vi har lite mer spänning över syramotorn så rasar pH ner till 2 och vice verca.

Om vi nu återkopplar systemet så kan vi räkna med att systemet kommer fel och vi kommer att pumpa exempelvis pH = 2 under cira 15 sekunder, varefter pH-metern skickar order om att skicka pH = 12 under följande 15 sekunder, o.s.v. Vi kommer på grund av pH-kurvans branta lutning och vår långa transportfördröjning ej att få något stabilt pH-värde på utflödet.

Med vår på likspänningsnivån överlagrade sinusspänning får vi en varierande spänning över syramotorn med en kort period i jämförelse med självsvängningen.

Detta gör att vi kommer att få en omväxlande pumpning av syra och bas

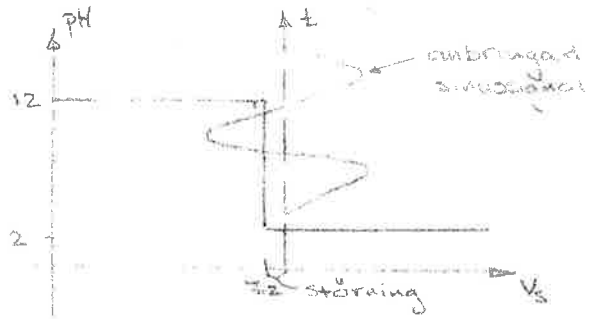


Fig. 4:6 - Svängningens inverkan på pumpförhållandet.

så att den vätska som passerar pH-mtern ej blir bara pH = 2 eller pH = 12 under en period utan blir en blandning av dessa.

Den överlagrade sinussignalen gör "reläet" mindre känsligt för variationer i likspänningsnivån från pH-metern, vilket gör att systemet går i viss mån att styra.

4.3) Otto-Smith-reglering

För att kompensera den kraftiga tidsfördröjningen beslöt vi oss för att använda Otto-Smith-reglering enligt kap. 3.1.

För att kunna realisera denna bestämde vi approximativt systems överföringsfunktion med hjälp av en enkel stegsvarsanalys. Vi erhöll då:

$$K_1G_1 = \frac{79}{1 + 8{,}6s}$$

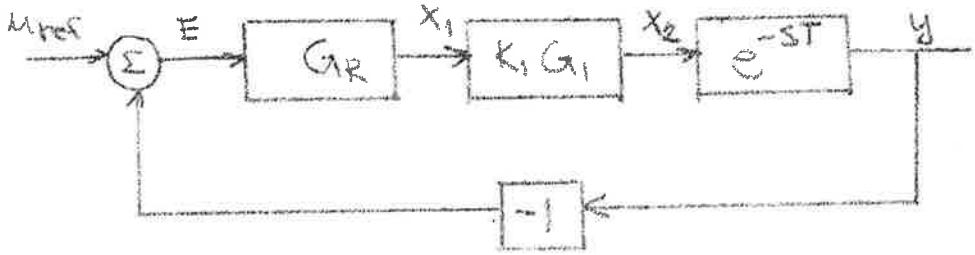
Systemets totala överföringsfunktion:

$G(s) = K_1 G_1 e^{-sT}$ där $T_{medel} = 10$ sek.

För att åstadkomma tidsfördröjningen hade vi ett speciellt aggregat som gav max. 6 sekunders fördröjning. Aggregatet bestod i princip av ett stort antal kondensatorer som avlästes med vissa samplingsintervall.

För att erhålla reglering av system enligt Otto-Smith resonerar man på följande sätt:

Vårt system enkelt återkopplat ser ut så här:



x_1 = systemets insignal

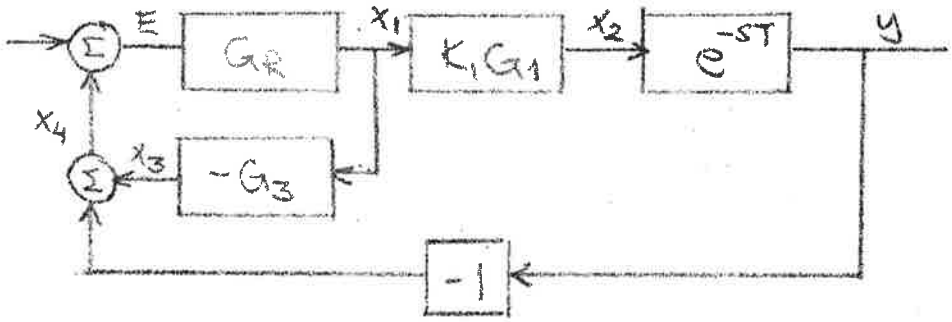
x_2 = pH-värde i rörets början

där G_R = regulatorns överföringsfunktion

$K_1 G_1$ = systemets överföringsfunktion

e^{-sT} = tidsfördröjningen

Svårigheten ligger i att tillståndet x_2 ej är tillgängligt, eftersom tidsfördröjningen ej går att separera från $K_1 G_1$. Man inför då en lokal återkoppling från tillståndet x_1.



Återkopplingsslingan skall kompensera bort tidsfördröjningen e^{-sT}, d.v.s. man vill erhålla tillståndet x_4 enligt

$$x_4 = - G_R K_1 G_1 E = - K_1 G_1 x_1 \qquad (1)$$

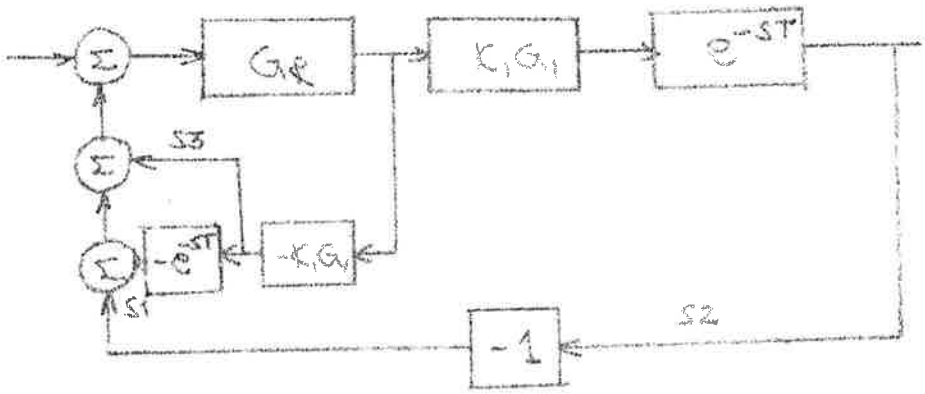
Ur fig. erhålles:

$$x_4 = x_3 - y = - G_3 x_1 - K_1 G_1 e^{-sT} x_1 \qquad (2)$$

(1) och (2) ger

$$G_3 = K_1 G_1 - K_1 G_1 e^{-sT}$$

Otto-Smith-regleringen får alltså följande utseende:



Man ser direkt ur figuren att kretsarna S1 och S2 slår ut varandra om man lyckas att dels simulera systemets överföringsfunktion K_1G_1 tillräckligt noggrant, dels åstadkomma tidsfördröjningen e^{-sT}.

Kvar återstår endast det ursprungliga systemet minus tidsfördröjning.

Vi beslöt oss att enligt ovan göra ett reglersystem enligt Otto-Smiths metod. Problemet för oss var att skapa den tidsfördröjning, som behövdes för regulatorn. Vi kunde endast uppbringa ett aggregat som fördröj-

de tiden 6 sek. i stället för de 10 - 15 sek. som behövdes. Vi beslöt oss då för att försöka reglera så gott vi kunde med detta aggregat. Då regulatorn blev inkopplad fann vi att systemet fortfarande självsvängde.

5. Digital reglering

P.g.a. tidsfördröjningen och olinjäriteten kan det behövas en ganska komplicerad regulator för pH-processen. I sådana fall är det ofta lämpligt att låta en dator utföra regleringen. Signalen till datorn måste då omvandlas från analog till digital form, och signalen från datorn måste omvandlas tillbaka till analog form.

Systemuppbyggnad. Inplacering av datorn.

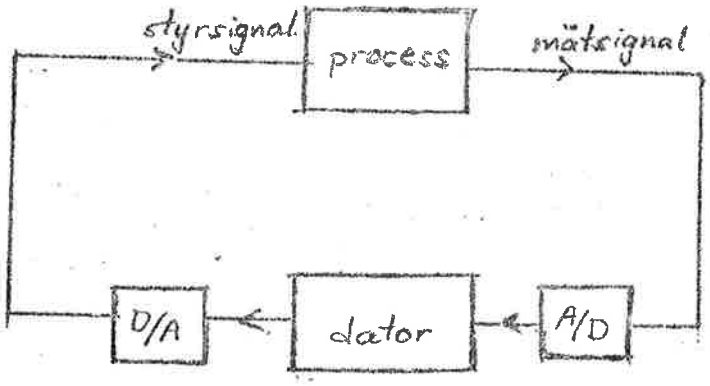


Fig 5.1

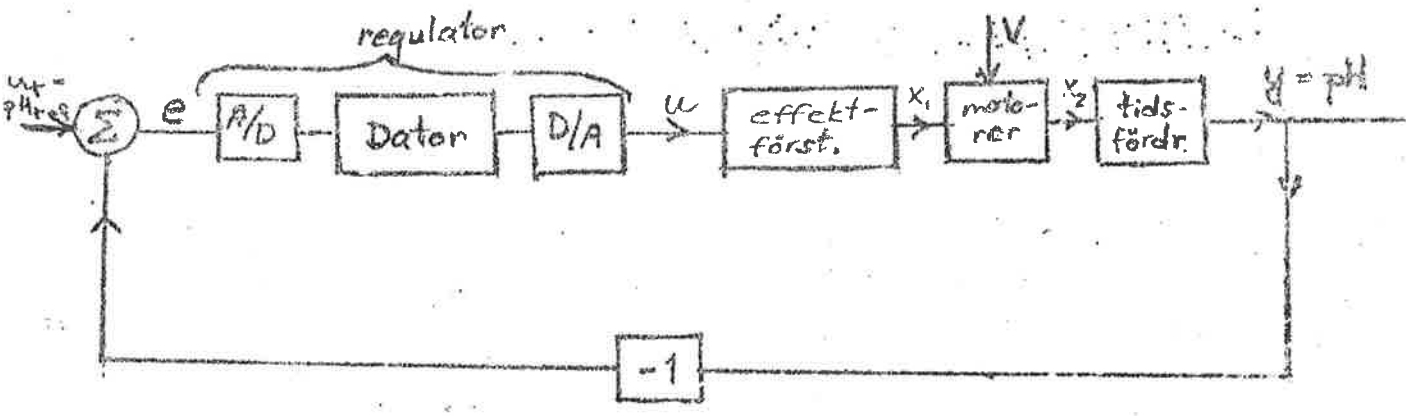


Fig. 5:2 - pH-processen.

u = insignal för ursprungliga (öppna) systemet

x_1 = förstärkt insignal

x_2 = flöde av syra och bas

V = störning

Regulatorns funktion

Som insignal till datorn tar man reglerfelet e (= pH_{ref} - pH) i diskreta tidpunkter, åtskilda av ett visst intervall, samplingsintervallet. Datorn utför önskade beräkningar och levererar sedan styrsignaler som är konstanta över samplingsintervallet.

Val av samplingsintervall

Det finns inga bestämda regler för hur långt ett samplingsintervall skall vara. Om mätningarna sker för tätt kan man råka ut för att datorn inte hinner utföra räkningarna. Om det är lång tid mellan mätningarna riskerar man å andra sidan att information går förlorad. I vårt fall försökte vi med samplingsintervall av längderna 1/2 resp. 1/3 av tidsfördröjningen i röret.

Samplingsmetodik för ett allmänt system

Vi söker lösningen till systemekvationerna då vi har ett samplat system. Förutsättningen är enligt tidigare att styrsignalen u(t) är styckvis konstant över intervall av längden T.
Antag att systemet är givet på tillståndsform:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ \\ y = Cx \end{cases}$$

Lösningen till detta system av differentialekvationer ges av

$$x(t) = e^{A(t-t_0)} x(t_0) - \int_{t_0}^{t} e^{A(t-s)} Bu(s)ds$$

Utnyttja att u(t) är styckvis konstant över intervall av längden T. Inför $s' = t_0 + T - s$. Man får då

$$x(t_0+T) = e^{At}x(t_0) + \int_0^T e^{As'}Bu(t_0)ds'$$

eller

$$\begin{cases} x(t_0+T) = \Phi x(t_0) + \Gamma u(t_0) & \text{där } \Phi = e^{AT} \text{ övergångsmatris} \\ y(t_0) = \theta x(t_0) & \Gamma = \int_0^T e^{As}Bds \\ & \theta = e \end{cases}$$

<u>Sampling av det öppna systemet</u>

Som en illustration utför vi sampling av det ursprungliga, öppna systemet

$$G_0(s) = \frac{e^{-sT_1}}{1 + T_2 s}$$

tidsfördröjning i röret

pH-meterns tidsfördröjning

$$Y(s) = G_0(s) \cdot U(s)$$

$$(1+T_2 s)Y(s) = e^{-sT_1}U(s)$$

I tidsplanet:

$$\frac{dy}{dt} + \frac{1}{T_2}y(t) = \frac{1}{T_2}u(t-T_1)$$

Tillståndsform:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{T_2}\,y(t) + \frac{1}{T_2}\,u(t-T_1)$$

$$\because \quad y(t+T) = \Phi y(t) + \Gamma u(t-T_1)$$

där

$$\Phi = e^{AT} = e^{-\frac{T}{T_2}}$$

$$\Gamma = \int_0^T e^{As}B\,ds = \int_0^T e^{-\frac{s}{T_2}} \cdot \frac{1}{T_2}\,ds = \left(1 - e^{-\frac{T}{T_2}}\right)$$

$$y(t+T) = e^{-\frac{T}{T_2}}\,y(t) + \left(1 - e^{-\frac{T}{T_2}}\right)u(t-T_1)$$

För att förenkla det hela kan man välja samplingsintervall så att förhållandet mellan T_1 och T är ett helt tal k, d.v.s. $T_1 = kT$, där k = t.ex. 2 el. 3.

Sampling av regulator

Som exempel väljer vi en PD-regulator. I kontinuerlig tid har den formen

$$u(t) = K\left[e(t) + T'\,\frac{de}{dt}\right]$$

Samplingen kan här göras enkelt genom att använda differenskvot i stället för derivata:

$$u(t+kT) = K\left[e(t+kT) + \frac{T'}{T}\left\{e(t+kT) - e(t+k-1)T\right\}\right]$$

Allmänt utförs sampling av en regulator enligt standardmetoden.

Räkningar på det återkopplade systemet med regulator

Det finns en långt gående analogi mellan kontinuerliga och diskreta system. Motsvarigheten till $\mathcal{L}$-transform är z-transform; genom den senare får man fram överföringsfunktionen för det diskreta fallet.

I ett komplicerat system kan man transformera varje del för sig och sedan sätta samman överföringsfunktionen för det slutna systemet enligt samma princip som för det kontinuerliga fallet. Vi gjorde detta då vi tänkte oss att man använde PD-regulator och Otto-Smith-regulator; syftet var att undersöka stabiliteten. Räkningarna blev jobbiga och resultatet ganska osäkert, så vi redovisar dem inte här.

Körningen på datamaskin

När vi skulle köra på datamaskin återgick vi till en enkel modell, som vi hade kunnat gissa oss till utan några teoretiska utsvävningar. Modellen innebär att man viktar gamla felsignaler och gamla styrsignaler för att få fram lämplig ny styrsignal:

$$u(t) = a_1e(t) + a_2e(t-1) + a_3e(t-2) + b_1u(t-1) + b_2u(t-2) + b_3u(t-3)$$

a_i, b_i lämpligt valda konstanter

För körning på institutionens processdator användes förutom regulatorprogrammet följande program:

RSX Möjliggör körning av program i reell tid. Man kan med detta program utföra operationer vid vissa givna tidsintervall.

LOGGER Användes för insamling av mätdata och utställande av reglersignaler.

DOS Monitor för körning off-line, d.v.s. alla operationer behöver kommandon från operatören.

Vid uttestning av vårt regulatorprogram användes istället för pH-processen ett enkelt system uppkopplat på analogimaskin. Reglering av detta system kunde efter en mängd besvär göras relativt noggrant, medan någon reglering av pH-processen utfördes däremot inte.

Regulatorprogrammet:

```
C       TASK REG
 DIMENSION E(3),U(4),A(3),B(3)
 COMMON ICOM(136),FLOVA(24),USER(36)
 EQUIVALENCE (FLOVA(1),PH),(FLOVA(17),UT),(USER(1),A(1)),
*(USER(4),B(1)),(USER(7),E(1)),(USER(10),U(1)),
*(USER(14),REF)
 U(4)=U(3)
 DO 1 I=1,2
 K=4-I
 E(K)=E(K-1)
1 U(K)=U(K-1)
 E(1)=REF-PH
 U(1)=0
 DO 2 I=1,3
2 U(I)=U(I)+A(I)*E(I)-B(I)*U(I+1)
 UT=U(1)
10 CALL EXIT
 GOTO 10
 END
```

6. Avslutning

Under arbetet med att lösa uppgiften har två faktorer varit avgörande: tidsfördröjningen och olinjäriteten i pH-processen. Då processer med reglering av pH inte är ovanlig inom industrin kan det vara av intresse att se lite på de metoder som används för kommersiellt bruk. För att komma till rätta med tidsfördröjningen används bl.a. framkoppling, d.v.s. samma princip som används vid temperaturreglering av bostadshus.

För att på ett enkelt sätt undvika de problem som uppstår p.g.a. pH-processens förlopp kring neutralisationspunkten kan man använda stora tankar med omrörare som jämnar ut de snabba variationer man får vid tillsats av syra eller bas. Dock bör påpekas att tankstorleken inte bör vara alltför kraftigt tilltagen eftersom det medför längre tid för blandningen och alltså större tidskonstanter.

På senare tid har den ökade användningen av processdatorer medfört att regleringar av ovanstående typ börjat utföras med hjälp av dator, vilket naturligtvis för med sig en alltmer sofistikerad reglering.

7. Litteraturförteckning

Brenkert
"Elementary Theoretical Fluid Mechanics", John Wiley and Sons Inc., New York/London.

D. Considine
"Process Instruments and Control Handbook".

Bruno Eck
"Technische Strömungslehre", 17:e upplagan, Springer-Verlag, Berlin/ /Heidelberg/New York, 1966.

Fribance
"Industrial Instrumentation Fundamentals".

Hunsaker och Rightmire
"Engineering Applications of Fluid Mechanics", Mc Graw-Hill Book Company Inc., New York och London, 1947.

Kolthohh - Elvig
"Treatise on Analytical Chemistry", Part 1, Vol. 1.

T. Matre
"Prosesstyrning med datamaskin - en introduksjon".

Ludvig Prandtl
"Strömungslehre", Friedr. Vieweg und Sohn, Baunschweig, 1960.

H. Richter
"Rohrhydraulik", 4:e uppl., Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1962.

O. Solheim
"Instrumenteringsteknik".

K.J. Åström
"Samplade system", 1965

Veckoblad Allmän Kemi I, F4, 1972.

Pedagogiskt efterord

Ja, vi lyckades till slut reglera den här processen, på några olika sätt. Inte för att det spelar någon roll, den perfekt blandade soppan av lut och syra kan väl inte vara till glädje för någon. Om man, förstås, inte kommer på den befängda idén att blanda groggar på det här sättet, men då måste man ju ha en tillförlitlig groggmeter.

Nej, betydelsen av det här projektet är en helt annan och betydligt större. Institutionen för Reglerteknik har nämligen visat på en väg att göra inlärning meningsfull och stimulerande. Ett sådant projekt i grupp tar nämligen till vara elevernas nyfikenhet och arbetsvilja, lär dem att samarbeta och planera sitt arbete och att presentera sitt resultat på ett (förhoppningsfullt) förståeligt sätt. Institutionen för Reglerteknik skall ha all heder av detta försök att ändra undervisningen från den förhärskande formen, där den enskilde elevens läsmotiv huvudsakligen är konkurrenssituationen och en önskan att "tenta av" ämnet så fort som möjligt.

Speciellt vill vi tacka Björn Wittenmark, som lagt ner mycket tid, intresse och energi att handleda oss på ett försynt och förståeligt sätt.