

5062 (1969)

U P P B Y G G N A D A V S E R V O

F Ö R

I N V E R T E R A D P E N D E L

Examensarbete av
Mats Sjöberg

Utfört vid
Institutionen för Regleringsteknik
Lunds Tekniska Högskola

X-jobs nr RE

Ans. hand. krustaf

Engelsk titel : Construction of
a servo for an inverted
pendulum.

INNEHÅLL

Abstract.....	1
Sammanfattning.....	2
Kap 1. Inledning.....	3
Kap 2. Mekaniska systemet.....	4
1. Teoretiska beräkningar av vagnens överföringsfunktion.....	4
2. Krav på reglersystemet.....	5
3. Uppbyggnad av vagnen.....	6
Kap 3. Reglersystemet för vagnen.....	9
1. Vinkelmätning.....	10
2. Kompenseringslänken.....	11
3. Drivförstärkaren.....	15
4. Val av motor och utväxling.....	16
5. Batteridrift.....	19
Kap 4. Prov med vagnen.....	20
1. Prov i samband med utformning av kompenseringen.....	20
2. Slutprov.....	21

APPENDIX

1. Beräkning av pendelns överföringsfkn.....	1
2. Beräkning av motorvagnens överföringsfkn..	2
3. Beräkning av tröghetsmomenten.....	4
1. Motorerna.....	4
2. Kuggväxeln.....	4
3. Vagnen.....	7

4. Operationsförstärkarna.....	9
5. Beräkning av kompenseringsslänkens överföringsfunktion.....	10

BRUKSANVISNING

ABSTRACTPurpose

The aim of this job was to build a low-cost, stabilized, inverted pendulum for demonstration purpose.

Conditions

Given conditions were among other things that the pendulum (length about 1 m) should be placed on a wagon driven by a permanent magnetic motor.

Construction

The wagon is built of a FAC construction equipment. The electronics, except the power supply, are mounted on the wagon. The angle detector is a pick-off.

Results

The wagon is relatively sensitive for the zero adjustment of the angle detector. It compensates an angle deviation of about $2,5^{\circ}$.

Sammanfattning

- Syfte Syftet med detta examensarbete var att till billigt pris uppbygga en stabiliserad inverterad pendel för demonstrationsändamål.
- Föruts. Givna förutsättningar var bl.a. att pendeln (längd ca 1 m) skulle stå på en vagn driven av en permanentmagnetmotor.
- Uppbyggnad Vagnen är byggd med hjälp av FAC konstruktionsset. Elektroniken utom spänningsaggregatet är monterad på vagnen. Vinkelgivaren utgöres av en pick-off.
- Resultat Prov visar att vagnen klarar ca $2,5^\circ$ vinkelavvikelse. Vagnen är relativt känslig för vinkelgivarens nollställning.

Kap. 1. Inledning

Föreliggande examensarbete, "Uppbyggnad av servo för inverterad pendel", utfördes huvudsakligen under sommaren 1969 i institutionens laboratorium.

Syftet var att för demonstrationsändamål tillverka en prisbillig stabiliserad inverterad pendel. Problemet med den inverterade pendeln behandlas vid föreläsningarna i reglerteknik. En inverterad pendel som kan köras på ett vanligt golv vore därför en bra illustration till problemen kring stabilisering av instabila system.

Givna förutsättningar var att pendeln skulle stå på en vagn driven av en permanentmagnetmotor, pendellängden skulle vara ca 1 m lång och vagnen skulle byggas med hjälp av en på inst. bef. FAC bygglåda. Om möjligt skulle den vara batteridriven.

Vissa problem med uppbyggnaden har uppstått bl. a. i samband med tendenser till självsvängning i drivförstärkare och kompensering, känslighet för jorddragningen samt kuggväxelns mekaniska hållfasthet.

Prov med den färdiga vagnen visar att den klarar ca $2,5^{\circ}$ vinkelavvikelse med det vid proven tillgängliga spänningsaggregatet som har 1 A max. ström. Batterier med tillräcklig kapacitet visade sig vid förfrågan vara för tunga. Systemet är relativt känsligt för vinkelgivarens nollställning.

För att få åskådligare text i rapporten har mera utrymmeskrävande beräkningar gjorts i ett appendix, vari även en bruksanvisning för servot finnes.

Kap. 2. Mekaniska systemet

2.1 Teoretiska beräkningar av vagnens överföringsfunktion

Vid dimensionering av motor och utväxling är det av intresse att känna till pendelns egenfrekvens. För att kunna göra en lämplig kompensering måste alla i systemet ingående överföringsfunktioner beräknas. I samband därmed krävs bl.a. en beräkning av kuggväxelns tröghetsmoment.

Här redovisas endast resultaten av beräkningarna och sidhänvisning sker till appendix för den intresserade.

Pendeln
(App. sid 1)

Om vagnens koordinat betecknas med Z och pendelns vinkelavvikelse från lodlinjen med ϕ fås pendelns överföringsfunktion som

$$G_p = \frac{\phi(s)}{Z(s)} = \frac{1}{g} \cdot \frac{s^2}{1 - (\tau_p s)^2}$$

$$\text{där } \tau_p = \frac{1}{\omega_p} = \sqrt{\frac{1}{g}} \quad .$$

Med värden insatta:

$$G_p = \frac{1}{9,81} \cdot \frac{s^2}{1 - 0,102s^2} \quad ; \quad \omega_p = 3,13 \text{ rad/s}$$

Motorvagnen
(App. sid 2)

Motorns induktans antages försumbar. Då fås vagnens överföringsfunktion (motorspänning till vagnens position)

$$G_v = \frac{Z(s)}{U(s)} = \frac{r}{NK_m} \cdot \frac{1}{s(1 + \tau s)} \quad ;$$

$$\tau = \frac{RJ}{K_m^2}$$

r = hjulens radie m

N = utväxlingen ggr

K_m = motorkonstanten Nm/A

J = den till motoraxeln reducerade summan
av motorns, växelns och vagnens
tröghetsmoment kgm²

För två motorer blir med värden insatta

$$G_v = 0,101 \cdot \frac{1}{s(1 + 0,181s)} \cdot$$

Valet av kugghjulens storlekar är diskuterat
i app. sid 4 - 6.

2.2 Krav på reglersystemet

Krav man kan ställa på reglersystemet är t.ex.

1. Det genomsnittliga vinkelfelet i stationärt tillstånd ska vara mindre än ett föreskrivet värde.
2. Vagnen skall kunna kompensera ett visst begynnelsevärde eller en störning av viss storlek.
3. Efter en störning skall felet konvergera mot 0 tillräckligt snabbt.
4. Vagnen står stilla när pendeln är stabiliserad.
5. Vagnen återgår till utgångsläget.

Inga specifikationer beträffande krav 1. och 3. var från början givna. För krav 2. nämndes 5° som ett rimligt värde. Motorn har därför dimensionerats för 5° vinkelfel och kompenseringen har därefter utprovats för att få optimala värden på dämpning och varians.

Faktorer som påverkar variansen i stationärt tillstånd är bl.a. friktionen i systemet samt motorernas startspänning.

Krav 4. och 5. är ej helt självklara. Vagnens läge och hastighet är ej observerbara då pendelns utslagsvinkel är enda utsignalen, vilket här är fallet. Om man t.ex. låter vagnen ha en begynnelsehastighet och samtidigt låter utslagsvinkeln vara noll så kommer vagnen teoretiskt sett att bibehålla denna hastighet samtidigt som pendeln hålles kvar i nolläge.

Med pendelns utslagsvinkel som enda utsignal, är således krav 4. och 5. ej möjliga att tillgodose. Däremot kan de uppfyllas om vagnen utrustas med organ som känner vagnens läge och hastighet. Detta går dock utanför detta examensarbete.

2.3 Uppbyggnad av vagnen

Som nämndes i inledningen, är vagnen huvudsakligen uppbyggd av delar ur en FAC bygglåda. Undantag är pendeln med kula, fälgarna, däckerna och kåpan över elektroniken.

Pendel, kula och fälgar är tillverkade av lab.ing. Ågren, inst. för till. elektronik, kåpan av inst.tekniker Nils Jangmark vid inst. för hållfasthetslära. Däckerna är köpta hos F:a Clas Ohlsson.

Utförandet framgår av fig 2.1. Karossen har på långsidorna två ovanför varandra liggande balkar, mellan vilka kullagerfästena för hjulaxlarna är monterade.

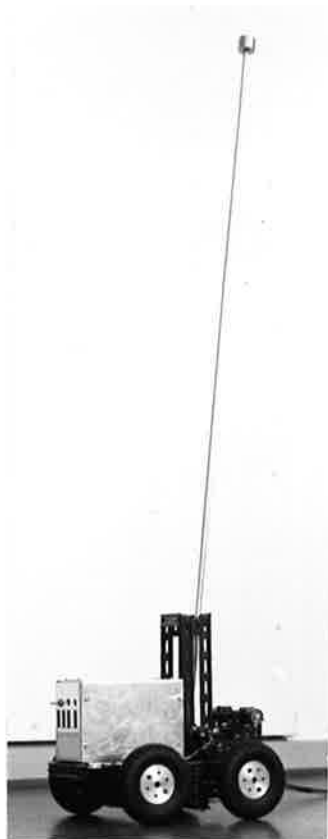


Fig 2.1 a
Vagnens utförande.



Fig 2.1 b

Beträffande kuggväxeln så var från början avsett att den till största delen skulle vara inbyggd i motorerna. Proven visade dock att de inbyggda växlarerna inte höll för påfrestningarna, varför en kraftig växel byggdes av FAC - komponenterna. Nackdelen är att den får ett icke försumbart tröghetsmoment. Jfr app. sid 6. Alla axlar i växeln utom motoraxlarna är kullagrade. Motorfästena är gjorda av kullagerfästen som är något uppsvarvade för att passa motorerna.

Kopplingen mellan motoraxlarna och växeln är utförd enl. fig 2.2. De gängade hylsorna har varit till hjälp vid justeringen till lämplig axellängd varefter de låsts med krympslang.

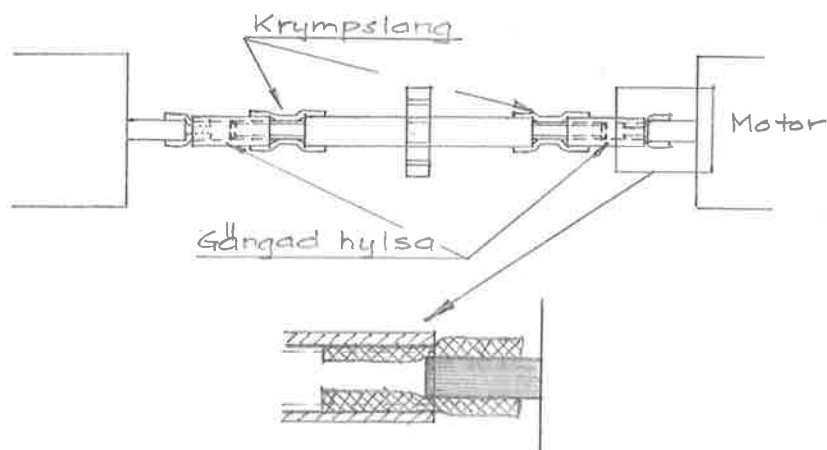


Fig 2.2 Kopplingen mellan motoraxlarna och växeln.

Pendelfästet sitter på en axel vars ena ände är kullagrad och den andra änden är fäst i vinkelgivaren, en Elliott A.C. Pick-off. Pendeln skjuts på en tapp och skruvas fast. Vid pendelfästningen är ett torn uppbyggt. Tornet har spärrar för att hindra pendeln att falla omkull då den inte används. På tornet finns även en utliggare för kabeln till spänningsaggregatet.

Effektförstärkaren är byggd i en aluminiumbox och placerad under vagnen. Övrig elektronik är byggd på kretskort i hållare ovanpå vagnen. Dessa är täckta av en aluminiumkåpa, på vilken strömbrytaren för start och stopp är placerad.

Kap. 3 Reglersystemet för vagnen

Inledning

I kap. 2 har överföringsfunktionen för pendeln och motorn med last var för sig beräknats. Nu skall dessa delar sättas samman med vinkelgivare, förstärkare och kompenseringslänk. Det öppna systemet återkopplas och kompenseringslänkens utseende skall bestämmas. Först visas ett blockschema över hela systemet, varefter de ingående delarna var för sig studeras. Systemets blockschema visas i fig 3.1.

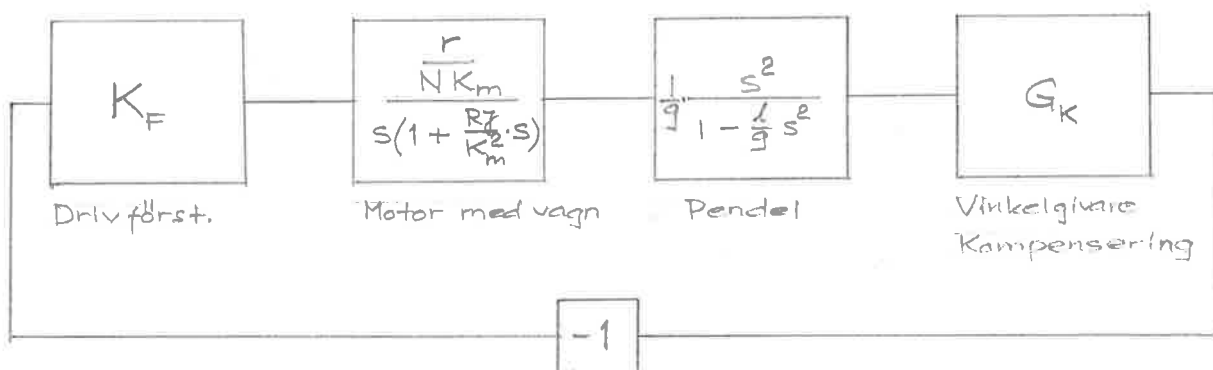


Fig 3.1 Blockschema för systemet.

Kretsöverföringen blir

$$G_o = K_o \cdot G_K \cdot \frac{s}{(1 + \frac{RJ}{K_m^2} \cdot s)(1 - \frac{1}{g} s^2)} ;$$

$$K_o = \frac{r}{N \cdot g \cdot K_m} \cdot K_F$$

G_K = kompenseringslänkens överf.fkn inkl. K_p

K_p = vinkelgivarens känslighet

K_F = förstärkningen i drivsteget

r = hjulens radie

N = reduktionsväxelns utväxling

K_m = motorkonstanten

3.1 Vinkelmätning

Det vinkelkännande organet utgörs av en "Elliott A.C. Pick-off", en typ av differentialtransformator. Denna matas med en bärfrekvens, ca 400 Hz, och ger ut en växelspanning vars amplitud är proportionell mot utslagsvinkeln. Beroende på om vinkeln är positiv eller negativ är utspänningen i fas eller i motfas med inspänningen.

För vinkelgivaren erforderlig elektronik, oscillator och demodulator, finns på kretskort nr 1 - 3.

Oscillatorn (se diagr. 8) består av en Amelco 811 operationsförstärkare återkopplad med ett Twin-Tee filter för frekvensen 400 Hz. Kontrollmätning visar $f = 415$ Hz.

Demodulatorn visas på diagram nr 9. Den ideala utsignalen från denna är en helvågslikriktad sinusspänning. P.g.a. viss obalans i transistorerna får man emellertid en sinusspänning överlagrad den likriktade sinusspänningen. Resultatet blir "ungefär" en sinusspänning vars likspänningskomponent ändras med pendelns vinkel. Denna signal filtreras med ett lågpasfilter innan signalen föres in på kompenseringsslänken.

En kalibreringskurva har upptagits för vinkelgivaren (se diagram 1). Spänningen mättes efter lågpasfiltret. Oscillatorspänningen var vid mätningen 2,2 V p - p.

3.2 Kompenseringslänken

Det öppna okompenserade systemet har med numeriska värden insatta (jfr sid 9)

$$G_o = 0,915 \cdot \frac{s}{(1 + 0,181s)(1 - 0,102s^2)}$$

eller i annan form

$$G_o = -49,6 \cdot \frac{s}{(s + 5,53)(s^2 - 9,81)}$$

Vid enkel återkoppling får man rotortdiagrammet:

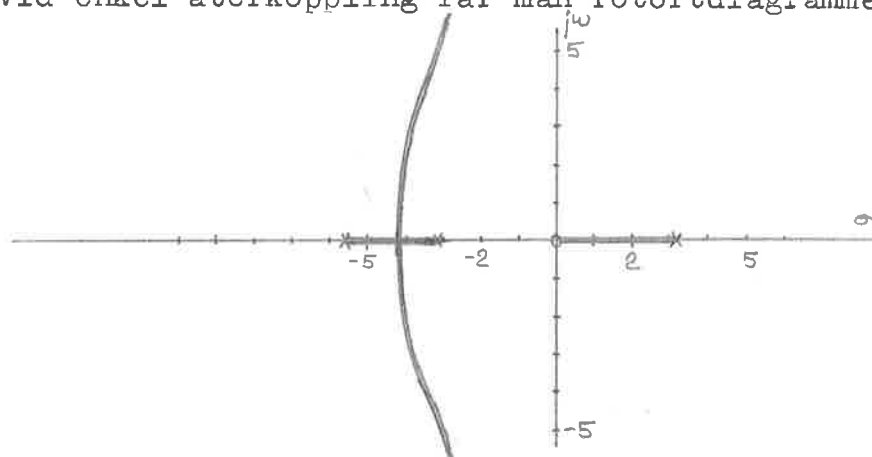


Fig 3.2 Rotort för det enkelt återkopplade systemet.

Man ser att systemet är instabilt för alla K. För att stabilisera systemet infördes en PI-regulator. Vid provkörningarna kopplades denna upp på lilla analogmaskinen.

Överföringsfunktion: $G_K = -K \cdot \frac{1 + as}{s}$

Bästa resultat erhöles för $K \approx 6$

$$a \approx 0,3$$

vilket motsvarar överföringsfunktionen

$$G = 89,2 \cdot \frac{s + 3,3}{(s + 5,53)(s^2 - 9,81)}$$

Rotortdiagram:

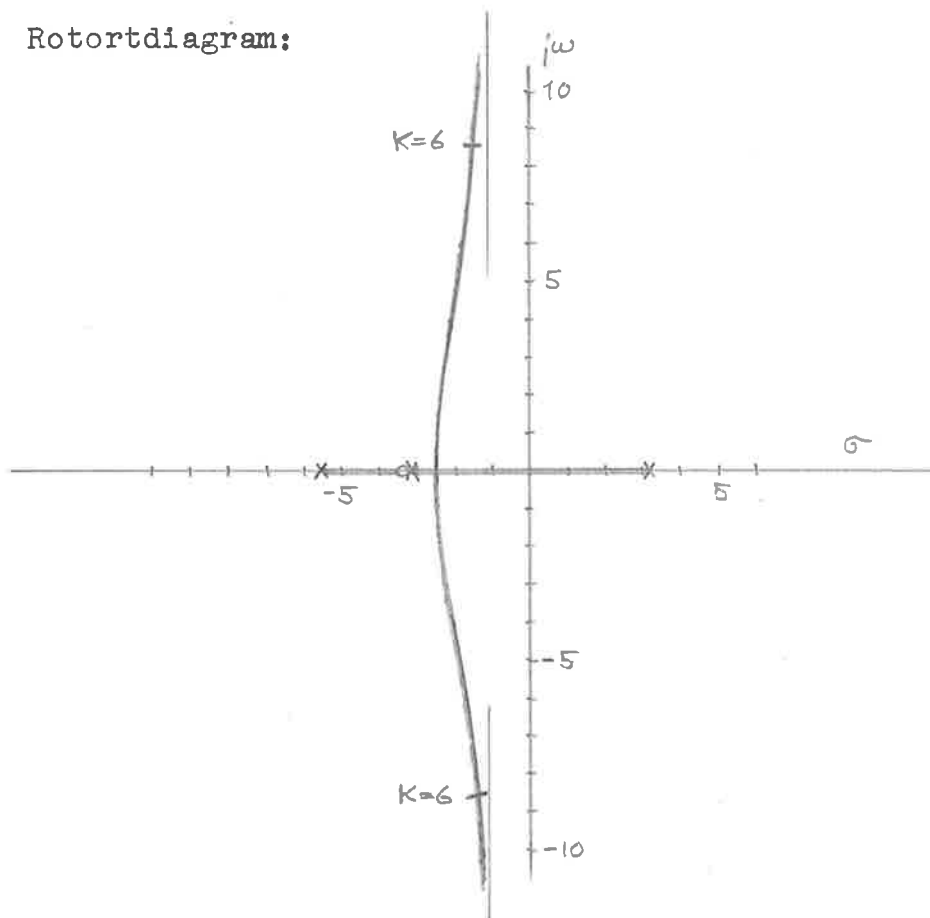


Fig 3.3 Rotortdiagram för det PI-reglerade systemet.

Som synes av rotortdiagrammet är systemet starkt oscillativt, vilket också framgick av proven.

Dessa prov gjordes innan elektroniken hade monterats på vagnen. När detta skett visade det sig att systemet överhuvudtaget inte gick att stabilisera tillfredsställande med denna typ av kompensering.

Fasavancering fick tillgripas.

Efter prov med olika parametrar visade det sig att kompenseringen enl. diagram 10 fungerade bäst.

Kompenseringslänkens ingångsimpedans är $\approx z_1$, där z_1 definieras enl fig 3.4.

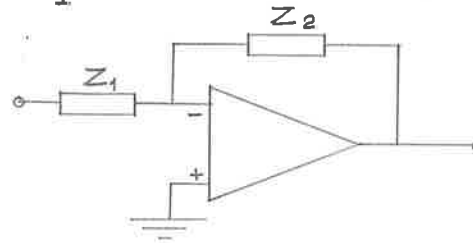


Fig 3.4 Kompenseringslänk

Denna belastning av filtret är ej försumbar, vilket medför att kompenseringslänkens överföringsfunktion ej bestäms enbart av z_1 och z_2 .

För beräkning av överföringsfunktionen har vinkelgivaren med demodulator antagits kunna beskrivas av en ekvivalent tvåpol med en viss emk per grad och en viss inre resistans.

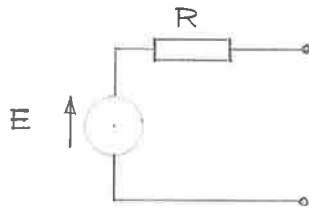


Fig 3.5 Ekvivalent tvåpol för vinkelgivaren.

Uppmätning av E och R gjordes genom att belasta demodulatorn med några olika resistanser och mäta spänningsskillnaden då pendeln fördes mellan sina ytterlägen.

Resultat:

$$R = 2,7 \text{ kohm}$$

$$E = 2,1 \text{ V/rad.}$$

Det ekvivalenta schemat för vinkelgivare, filter och kompenseringslänk blir alltså som fig 3.6 visar.

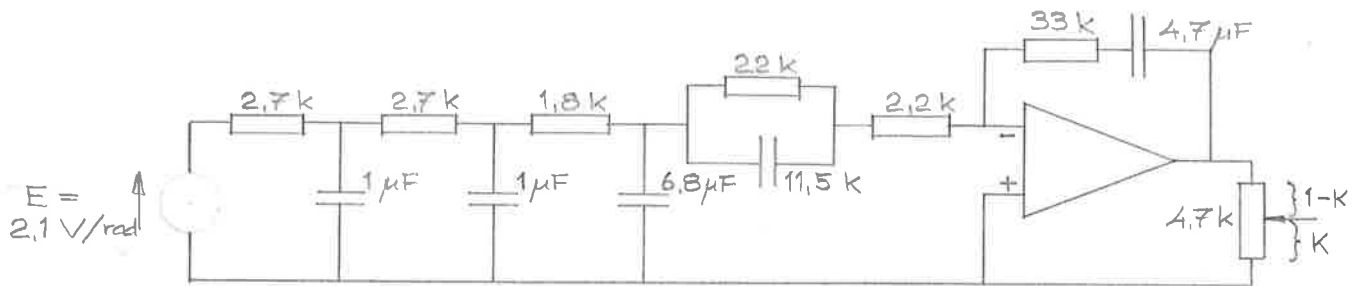


Fig 3.6 Ekv schema för vinkelgivare, filter och kompensering.

Beräkning av överföringsfunktionen finns i appendix sid. 10.

Resultatet blir

$$G_K = \frac{U(s)}{\theta(s)} =$$

$$= -14,2 \cdot \frac{(1 + 0,253s)(1 + 0,155s) \cdot K}{s(1 + 0,1082s)(1 + 8,96 \cdot 10^{-3}s)(1 + 1,9 \cdot 10^{-3}s) \cdot (1 + 0,8 \cdot 10^{-3}s)}$$

där förstärkningsparametern ställs in med potentiometern på op-förstärkarens utgång. Om de två längst bort belägna polernas inverkan försummas, får man det öppna kompenserade systemets överföringsfunktion:

$$G =$$

$$= -13K \cdot \frac{(1 + 0,253s)(1 + 0,153s)}{(1 + 0,181s)(1 - 0,102s^2)(1 + 0,1082s)(1 + 0,009s)}$$

Vid utprovningen av kompense ringslänken var $K = 0,45 - 0,5$ ett bra värde.

Bode-, rotort- och Nicholsdiagram är uppritade. Se diagram 5,6 och 7. Rotortdiagrammet gäller endast nära origo.

För $K = 0,46$ är enligt Bodediagrammet fasmarginalen 8° och förstärkningsmarginalen $2,8$ ggr.

Enl. rotortdiagrammet skulle bästa inställningen vara $K \approx 0,3$ då störst dämpning erhålles. Frekvensen skulle då vara $\omega \approx 7$ och relativa dämpningen $\xi = 0,21$.

I Nicholsdiagrammet ser man att systemet har en rel. hög resonanstopp.

3.3 Drivförstärkaren

Schema för förstärkaren i diagram 11.

Uppbyggnad

Förstärkaren är byggd på en laminatskiva placerad inuti en "ELFA" - box. Effekttransistorerna är monterade på kylflänsar utanpå boxen.

Funktionssätt

Signalen går in på $+$ - ingången på operationsförstärkaren. Utgången på denna styr transistorerna 2N3904 och 2N3906, vilka i sin tur styr transistorerna 2N4913 och 2N4904. Förstärkningen i effektdelen är ≈ 1 . I och med att effekttransistorerna sitter innanför återkopplingen fungerar förstärkaren som en operationsförstärkare med hög effekt. Förstärkningen bestäms helt av motstånden R_1 och R_2 .

$$K_F = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

1,2 ohms-motståndet på utgången tjänar som skydd för transistorerna.

Data

Utgångsspänning:	$\pm 12 \text{ V}$
Utström:	max 2,5 A
Inimpedans:	storleksordn. Mohm
Utimpedans:	försumbar

Förstärkaren är normalt inställd för maximal förstärkning (≈ 100 ggr).

Kommentarer

Förstärkaren är, p.g.a. de rel. stora strömmar den arbetar med, känslig för hur jordningen sker. När alla "jordar" i systemet samlades i en punkt, som anslöts omedelbart till förstärkarens utgång, visade sig risken för självsvängning vara minst.

3.4 Val av motor och utväxling

Valet av motor föregicks av en överslagsberäkning av erforderligt moment och erforderlig effekt.

Beräkningen grundades på följande antaganden:

$$\text{Max vinkel: } 0,1 \text{ rad} = 5,7^\circ$$

$$\text{Vagnens vikt: } 1 \text{ kg}$$

Erf. moment

Vagnens acc. måste minst vara lika stor som kulans acc.

$$J \ddot{\varphi} = mgl \sin \varphi$$

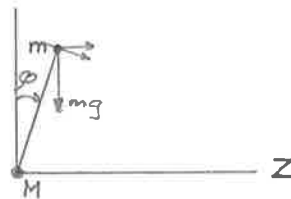
$$\ddot{\varphi} = \frac{mgl}{J} \cdot \varphi = \omega^2 \varphi \approx 9 \cdot 0,1 \approx 1 \text{ rad/s}^2$$

$$1 = 1 \text{ m} \quad \ddot{z} = 1 \text{ m/s}^2$$

$$F = M \cdot a = 1 \cdot 1 = 1 \text{ N}$$

$$\text{Hjulens radie } r = 5 \text{ cm}$$

$$T = F \cdot r = 1 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 5 \cdot 10^{-2}$$



En motor av fabrikat Faulhaber typ 230/017 har startmomentet 40 cnp = $4 \cdot 10^{-3}$ Nm.

Det bör alltså gå med en utväxling på minst

$$\frac{5 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-3}} = 12 \text{ ggr.}$$

Motortyp

Denna motor har en järnlös rotor och har därmed mycket lågt tröghetsmoment och liten tidskonstant. Datablad samt blad som visar motorns konstruktion är bifogade rapporten. Bladen är hämtade ur Faulhaberkatalogen. Se diagram 2 och diagram 13.

Erf. effekt

Antag att pendeln håller på att falla och har hunnit till vinkeln φ . Den har vinkelacc. $\ddot{\varphi}$ och vinkelhastigheten $\dot{\varphi}$. För att få sämsta belastningsfall antas pendeln ha fått falla fritt från vinkeln 0. Då har man att

$$\varphi = \varphi(\omega t)$$

$$\dot{\varphi} = \omega \cdot \varphi \quad (\text{Fås ur rörelseenergin})$$

$$\ddot{\varphi} = \omega^2 \varphi$$

För att balansera upp pendeln måste nu motorns kunna utveckla den effekt som motsvarar accelerationen $\ddot{\varphi}$ vid vinkelhast. $\dot{\varphi}$.

Motorns effekt:

$$P_m = T\omega_m = J\dot{\omega}_m\omega_m = \left(J_m + \frac{mr^2}{N^2}\right)\dot{\omega}_m\omega_m ;$$

$$\omega_m = \frac{1}{r}N\omega\varphi; \quad \omega = \text{pendelns vinkelfrekv.}$$

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{r}N\omega^2\dot{\varphi}; \quad \omega_m = \text{motorns vinkelfrekv.}$$

Erf. effekt

$$P_{\text{erf}} = \left(\frac{1}{r}N\right)^2 \omega^3 \varphi^2 \left(J_m + \frac{mr^2}{N^2}\right) =$$

$$= \left(\frac{1^2 N^2 \omega^3 J_m}{r^2} + 1^2 \omega^3 m\right) \varphi^2$$

Tillgängl
effekt

Motorns tillgängliga effekt för olika varvtal fås ur datablad.

Om man nu i samma diagram ritat upp erforderlig och tillgänglig effekt som funktion av utväxlingen N , kan man se inom vilka gränser N måste vara för att tillgängliga effekten skall vara större än den erforderliga.

Detta är gjort i diagram 3 för $\varphi = 4^\circ$.
Därför framgår att för $\varphi = 4^\circ$ skall gälla

$$46 \leq N \leq 138$$

Dock är skillnaden störst för $N = 100$.
Då syftet är att kunna balansera upp från så stor vinkel som möjligt väljes $N \approx 100$.

Val

Valet blir alltså:

Motor: Faulhaber typ 230/017
Utväxling: ~ 100 ggr

Den färdiga vagnen blev 3,2 kg i stället för den vid motorvalet uppskattade vikten 1 kg. Därför har ytterligare en likadan motor monterats. Motorerna är seriekopplade, varvid man bättre utnyttjar de ± 12 V som är tillgängliga från effektförstärkaren. Då motorerna är på 3 V vardera får man 6 V "märkspänning". De tål dock att korta stunder överbelastas med upp till 100 %.

Utväxlingen har inte ändrats. Diagram 4 visar erforderlig och tillgänglig effekt för $6,5^\circ$ då man har två motorer. Denna vinkel skulle alltså kunna klaras. P.g.a. begränsningar i strömaggregatet och överslängar p.g.a. det slutna systemets höga resonanstopp har dock ej mer än ca $2,5^\circ - 3^\circ$ uppnåtts. Se vidare provresultaten i kap. 4.

Denna vagn får anses vara en prototyp, som kan utvecklas vidare. Om vagnen senare skall byggas i en mera påkostad version, rekommenderas en motor med spänningen ca 12 V och en tillräckligt kraftig inbyggd växel. En sådan är t.ex. Vactric "Size 07 DC", 12 V tillsammans med en växel "Size 11".

3.5 Batteridrift

Det bästa vore naturligtvis om vagnen kunde köras med batterier. Man släpp då vidhängande sladdar och problem med nätaggregat, samtidigt som det hela skulle se "festligare" ut. Man behöver då ± 15 V, ca 2 A. D.v.s. $2(15 + 15) = 60$ W installerad effekt. För att få jämnaste spänningen skulle batteriet i så fall utgöras av kvicksilverceller. Dessa har en ungefärlig energitäthet av 110 Wh/kg eller 330 Wh/liter. (Se Radio och Television nr 6/1969 sid 18).

Om man antar genomsnittliga effektbehovet 15W, och vill att livslängden skall vara åtm. 1 timme blir batterivikten ca

$$\frac{15}{110} = 0,14 \text{ kg} \quad \text{och volymen}$$

$$\frac{15}{330} = 0,05 \text{ liter.}$$

Det borde kunna klaras. Det bör dock vara separata batterier för effekttransistorerna och den övriga elektroniken.

Problemet är den höga strömstyrkan. Förfrågan hos AB TUDOR i Ängelholm visade att den minsta vikt som fordras för att klara strömbehovet är ca 2 kg, vilket inte kan accepteras. Möjligen skulle mindre vikt kunna erhållas med militära specialbatterier av perborat-typ. Dessa finns troligen inte i Sverige, och torde f.ö. bli alltför dyra.

Några prov med batterier har därför inte gjorts.

Kap. 4. Prov med vagnen

De prov som utförts med vagnen är dels prov i samband med utformningen av kompenseringsslänken, dels prov med den färdiga vagnen.

Systemet är känsligt för inställningen av vinkelgivaren. Denna måste justeras varje gång vagnen används. Faktorer som påverkar inställningen är t.ex. golvet lutning på olika ställen i rummet samt driften i operationsförstärkarna.

När man kör med vagnen så åker den sakta fram och tillbaka med små överlagrade svängningar. De små svängningarna är knappt urskiljbara om förstärkningen är inställd på 0,45 - 0,5. Med nollställningen någotsånär bra inställd håller sig vagnen inom en sträcka av ca 5 - 6 dm.

4.1 Prov i samband med utformningen av kompenseringen

Vagnens beteende studerades för olika placeringar av nollställena i rotortdiagrammet. Det visade sig att om man placerade dem närmare origo än den nuvarande placeringen (jfr diagr. 6) fick man visserligen bättre dämpning men samtidigt blev systemet känsligare för nollställningen.

Den slutliga formen av kompenseringen är en kompromiss mellan kravet på dämpning och kravet att vagnen skall hålla sig inom ett begränsat område med rimlig noggrannhet på nollställningen.

4.2 Slutprov

Syfte

Syftet med proven var att utröna hur bra vagnen håller vinkeln 0 utan yttre störningar, hur stora störningar som kan kompenseras samt hur stort begynnelsevärde på vinkeln som vagnen kan klara.

Materiel

Mätningarna gjordes med institutionens skrivare "Ultralette". Det spänningsaggregat som användes var ett Oltronix dubbelaggregat med fjärravkänning av spänningen. Detta aggregat är strömbegränsat till 1 A.

Mätpunkter

Med skrivaren mättes pendelns vinkel samt motorspänningen. Vinkeln mättes efter lågpasfiltret på kompenseringkortet. Motorspänningen mättes direkt på den motor som har högsta spänningen (seriekopplade motorer).

Mätmetod

Proven bestod av följande moment:

1. Låt vagnen stå ostörd och balansera pendeln.
2. Ge pendeln en knuff.
3. Håll pendeln stilla i en viss vinkel när vagnen startas.
4. Släpp pendeln från ung. nolläge. Starta vagnen när pendeln hunnit en bit.

Dessa moment utfördes för två olika inställningar på förstärkningen, $K = 0,5$ och $K = 0,25$.

P.g.a. att K inställes på en trimpotentiometer är dessa värden endast ungefärliga.

Några moment utfördes även utan kula i toppen på pendeln.

Vidare uppmättes spänningsskillnaden för pendelns max-utslag. (Mätt efter filtret).

Beräkningar

Valda delar av de på skrivaren upptagna kurvorna redovisas på sidorna 26 - 31.

De övre kurvorna avser motorspänningen och de undre vinkeln. Tidsmarkering är gjord varje sekund.

Skillnaden i spänningen för pendelns ändlägen var 270 mV. Jämför man med den upptagna kalibreringskurvan för vinkelgivaren får man känsligheten i mätpunkten:

$$\frac{270}{163} \cdot 0,744 = 1,23 \text{ V/rad}$$

(Oscillatorspänningen har ändrats sedan kalibreringskurvan upptogs).

Skrivarens känslighet var för

Motorspänningen: 10 V/cm

Vinkeln: 10 mV/cm

I diagrammen blir alltså skalan för vinkeln

$$\frac{1,23}{57 \cdot 0,01} = 2,15 \text{ cm/grad.}$$

Dämpningen uppskattades genom att mäta amplituden på efter varandra följande maxpunkter hos vinkelkurvan. Då maxima avtar exponentiellt gäller att

$$\frac{A(t+T)}{A(t)} = e^{-\alpha T}; \quad \text{där}$$

A = amplituden på max.punkten

T = periodtiden

α = dämpningskoefficienten

Den relativa dämpningen ξ definieras genom de komplexa lösningarna till karakteristiska ekvationen

$$p = -\xi\omega \pm j\omega\sqrt{1-\xi^2}$$

Om man jämför med ekvationen överst ser man att

$$\alpha = \xi\omega;$$

men $\omega = \frac{2\pi}{T}$, varav

$$\xi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{\alpha T}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} .$$

Detta värde beräknades för några konsekutiva maxima, varefter medelvärdet användes som uppskattningen av relativa dämpningen.

Resultat

$$\underline{K = 0,25}$$

I fig 1 ser man att då pendeln är ostörd svänger den med rel. snabba svängningar av liten amplitud med plötsligt uppdykande större och långsammare svängningar. De små svängningarna har amplituden ung. 0,15 grader och vinkel-frekvensen $\omega \approx 10$ rad/s. För de större svängningarna är amplituden

$$A \approx 0,6^\circ$$

$$\omega \approx 3 \text{ rad/s}$$

I samband med de större svängningarna ändrar vagnen körriktning, vilket framgår av motor-spänningen.

I fig 4.2 ses motsvarande förlopp för pendeln utan kula. Här är det ej så klar distinktion mellan stora och små svängningar. Amplituden är överlag något större.

Fig 4.3 visar förloppet då pendeln fått en knuff, och fig 4.4 då pendeln fallit ca $1,3^\circ$ vid starten. Man ser att vagnen kan kompensera åtminstone en störning på $2,9^\circ$. $\omega = 3,7$ rad/s. En beräkning av den rel. dämpningen ger $\xi \approx 0,15$.

Resultat

K = 0,5

Moment 1. ses i fig 4.5. Nu är amplituden klart mindre än för $K = 0,25$. $A \approx 0,15^\circ$ och $A \approx 0,28^\circ$ för de mindre resp. större svängningarna. Här är en markerad topp då vagnen vänder. Vidare går vagnen långsammare än för $K = 0,25$. $\omega \approx 6$ rad/s för de små svängningarna.

Fig 4.6 visar visat moment 1. för $K \approx 0,45$ utan kula. Större amplitud och högre frekvens än med kula.

Fig 7 visar moment 2. $1,4^\circ$ störning klaras och förloppet svänger in med $\omega \approx 7$. Relativa dämpningen är ca 0,11.

Fig 4.8 slutligen visar några starter med begynnelsevinkel. Vagnen klarar åt ena hållet $0,75^\circ$ men inte $1,4^\circ$. Åt andra hållet klarar den 2° men inte $2,6^\circ$.

Sammanfattningsvis kan följande tabell uppställas.

K	Noggrannhet Mom. 1.	Max.störning			Rel. dämpn.
		Mom. 2	3	4	
0,25	$0,6^\circ$	$\geq 2,9^\circ$	$\approx 1,4^\circ$	$\geq 1,3^\circ$	0,15
0,5	$0,3^\circ$	$\geq 1,4^\circ$	$\geq 2^\circ$	---	0,11
			$\leq 2,6^\circ$		

Kommentarer

Det som vid dessa mätningar begränsar den vinkel som kan tas upp är det tillgängliga spänningsaggregatet. I och med att det begränsar strömmen vid 1 A råkar förstärkaren i självsvängning om styrningen fordrar större ström. Detta är fallet i fig 4.8.

Referenser:

- (1) Åström: "Reglerteori". Almqvist & Wiksell.
- (2) Ahrent - Savant: "Servomechanism Practice". McGraw-Hill, New York 1960.

Firmor:

- (3) F:a Leo Bab och
- (4) AB Elektronik Enheter.
Dessa för Faulhaber motorer. Motorerna kan dock med fördel köpas direkt från fabriken i
Böblingen, Württemberg, Väst-Tyskland.
- (5) FALICO AB. PIC kuggväxlar
- (6) Allhabo Vactric motorer och växlar.

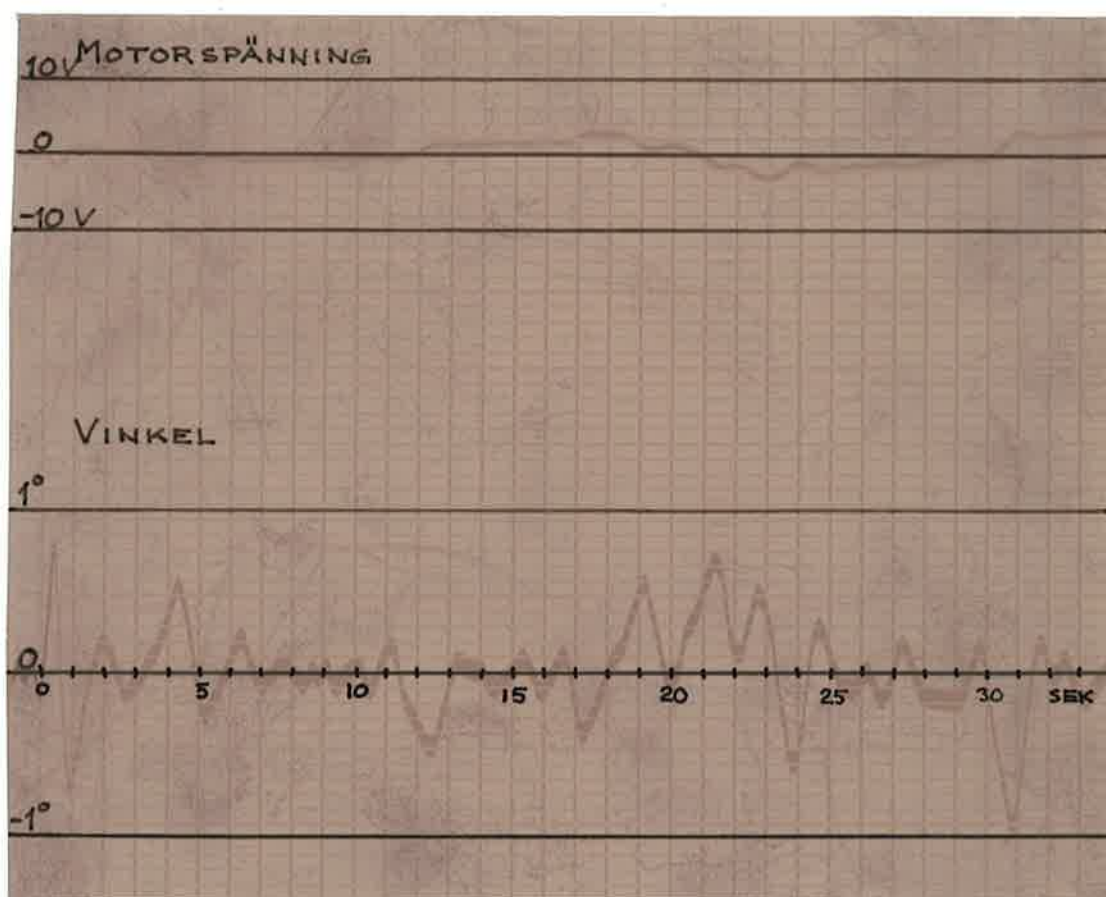


Fig. 4.1 Mom. 1 Störningsfritt
K = 0,25
Med Kula

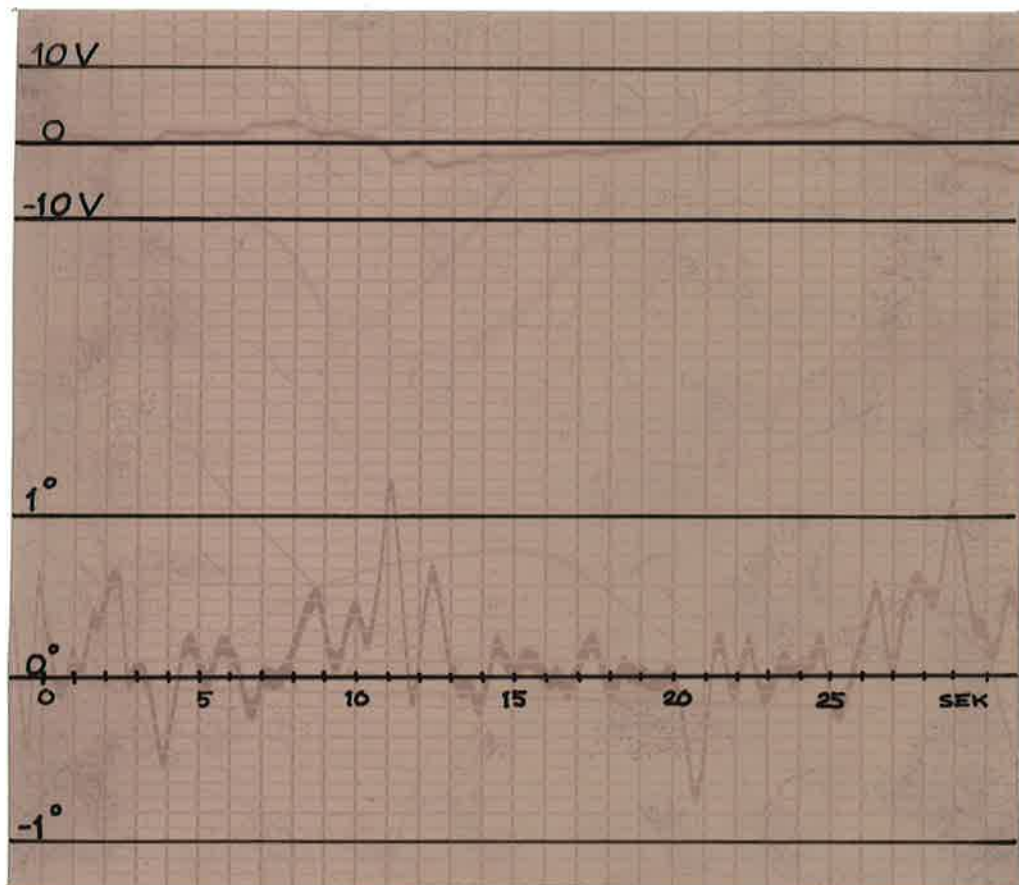


Fig. 4,2 Mom. 1 Störningsfritt
K = 0,25
Utan kula

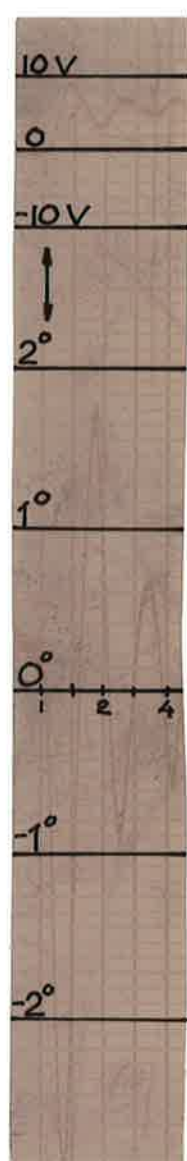


Fig. 4.3 Mom. 2
 $K = 0,25$
 Med kula
 Knuff vid den
 inritade pilen

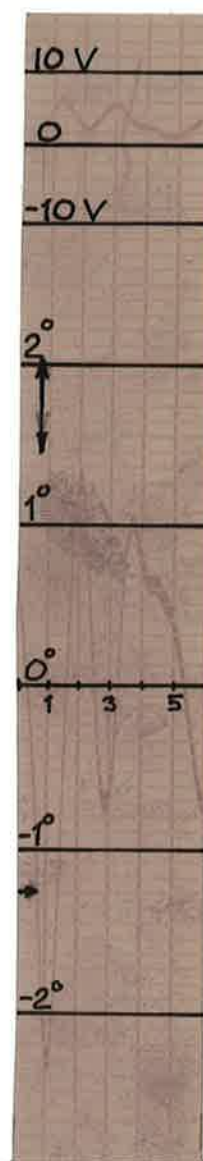


Fig. 4.4 Mom. 4
 $K = 0,25$
 Med kula
 Start med be-
 gynnelsevinkel
 och begynnelse-
 hastighet

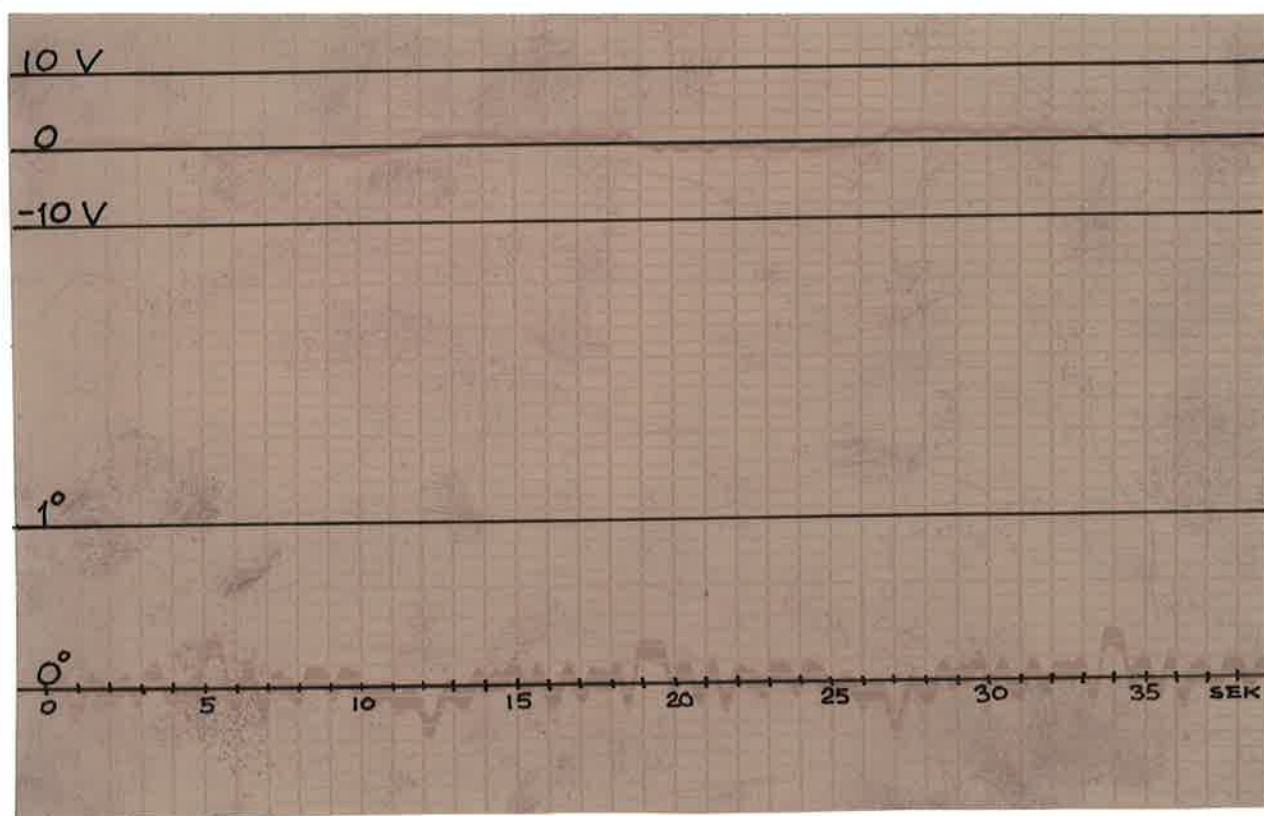


Fig. 4.5 Mom. 1 Störningsfritt
K = 0,5
Med kula

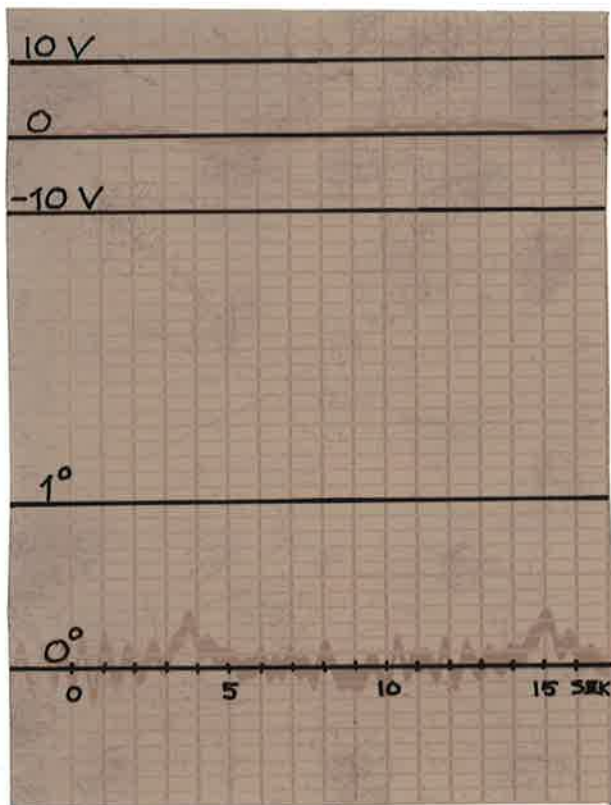


Fig. 4.6 Mom. 1
 $K = 0,45$
 Utan kula
 Störningsfritt

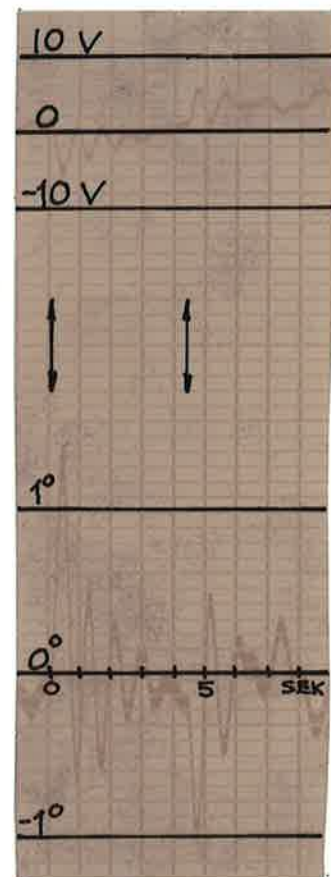


Fig. 4.7 Mom. 2
 $K = 0,5$
 Med kula
 Pendeln har fått en
 knuff vid pilarna.

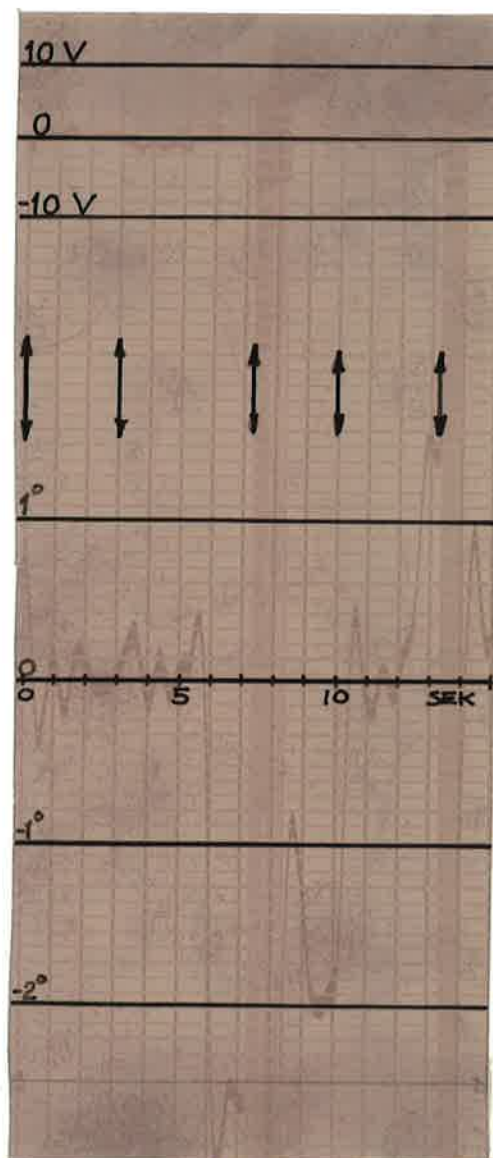
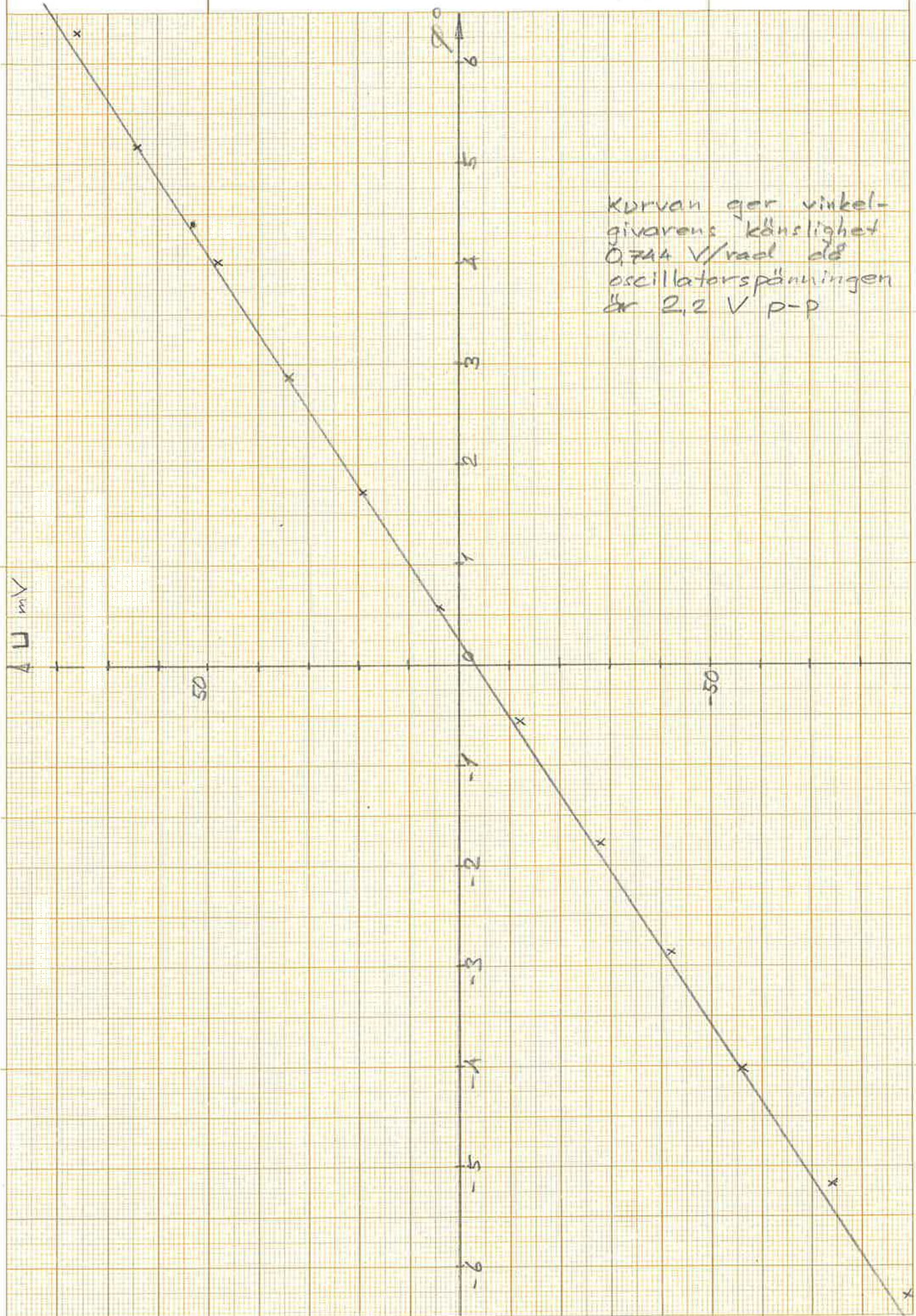


Fig. 4.8 Mom. 3
 $K = 0,5$
 Med kula
 Start med begynnelsevinkel.

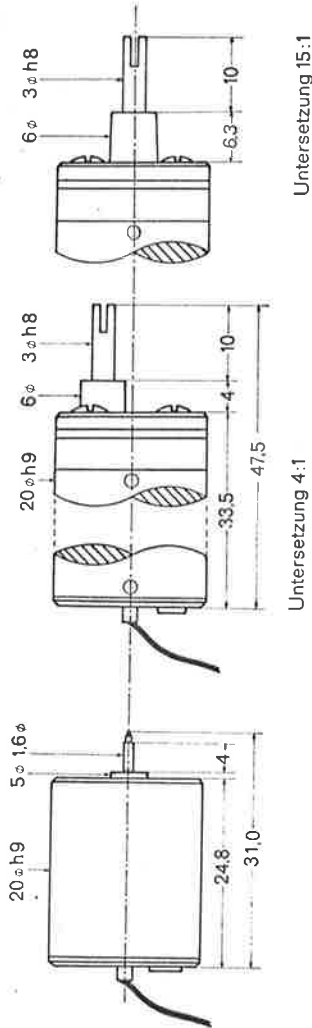
DIAGR. 1

Kalibreringskurva för vinkelgivaren
efter demodulering o. filtrering.

$U_{osc} = 1,1 \text{ V peak}$



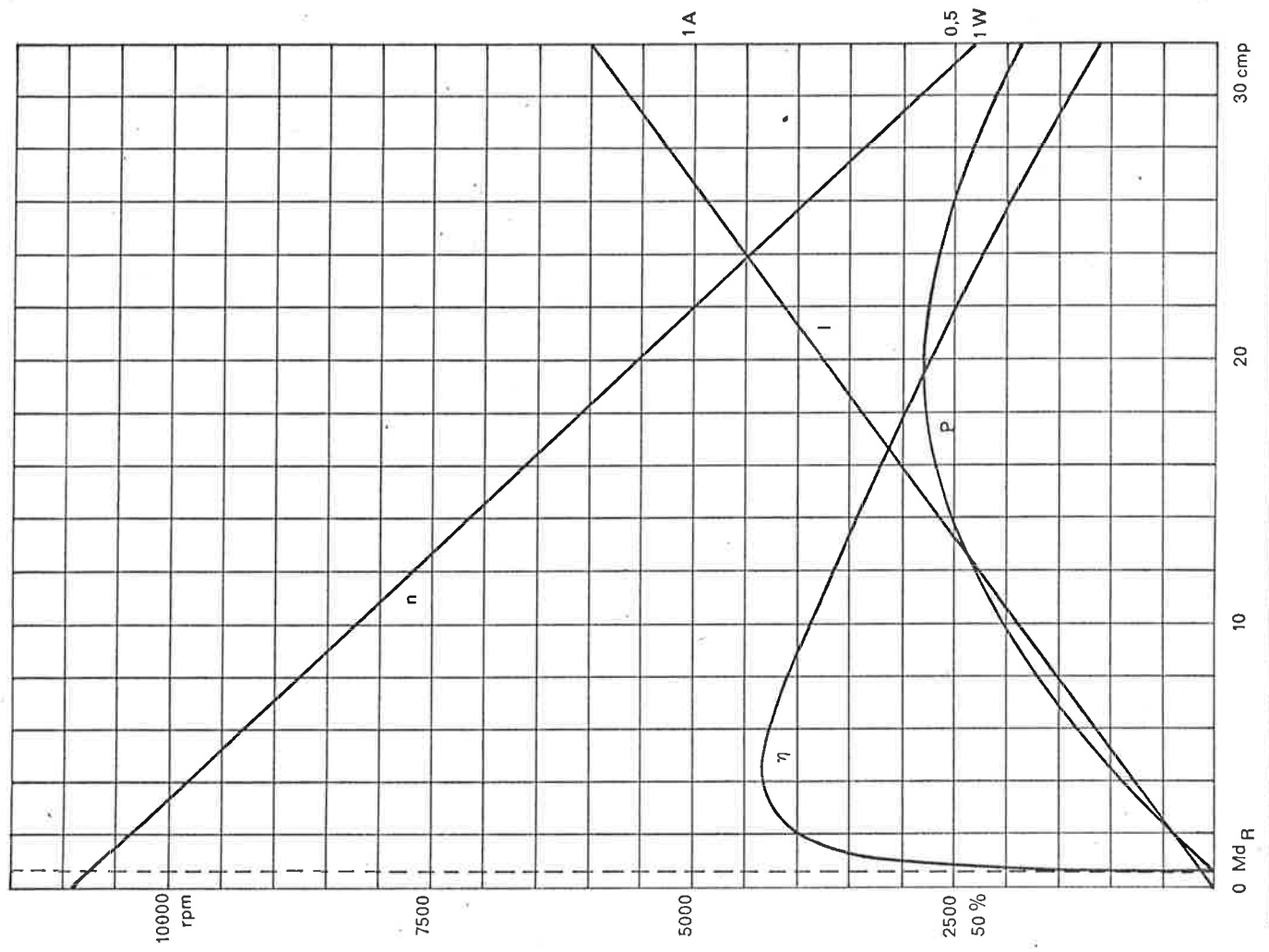
Type 230/017



Durchmesser 20 mm
 Gehäuselänge 25 mm
 Gewicht 35 g

Ankerwiderstand	R_0	2 Ohm
Meßspannung	U	3 V
Leerlaufdrehzahl	n_L	10700 rpm
spezifische Drehzahl	n_s	3610/V.min
Kurzschlußdrehmoment	M_{dk}	40 cmp
Reibungsdrehmoment	M_{dr}	0,46 cmp
spezifisches Drehmoment	M_{ds}	27 cmp/A
maximaler Wirkungsgrad	η	85%
Trägheitsmoment des Ankers	Θ	$13,9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$
Anlaufzeitkonstante	τ	$39 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

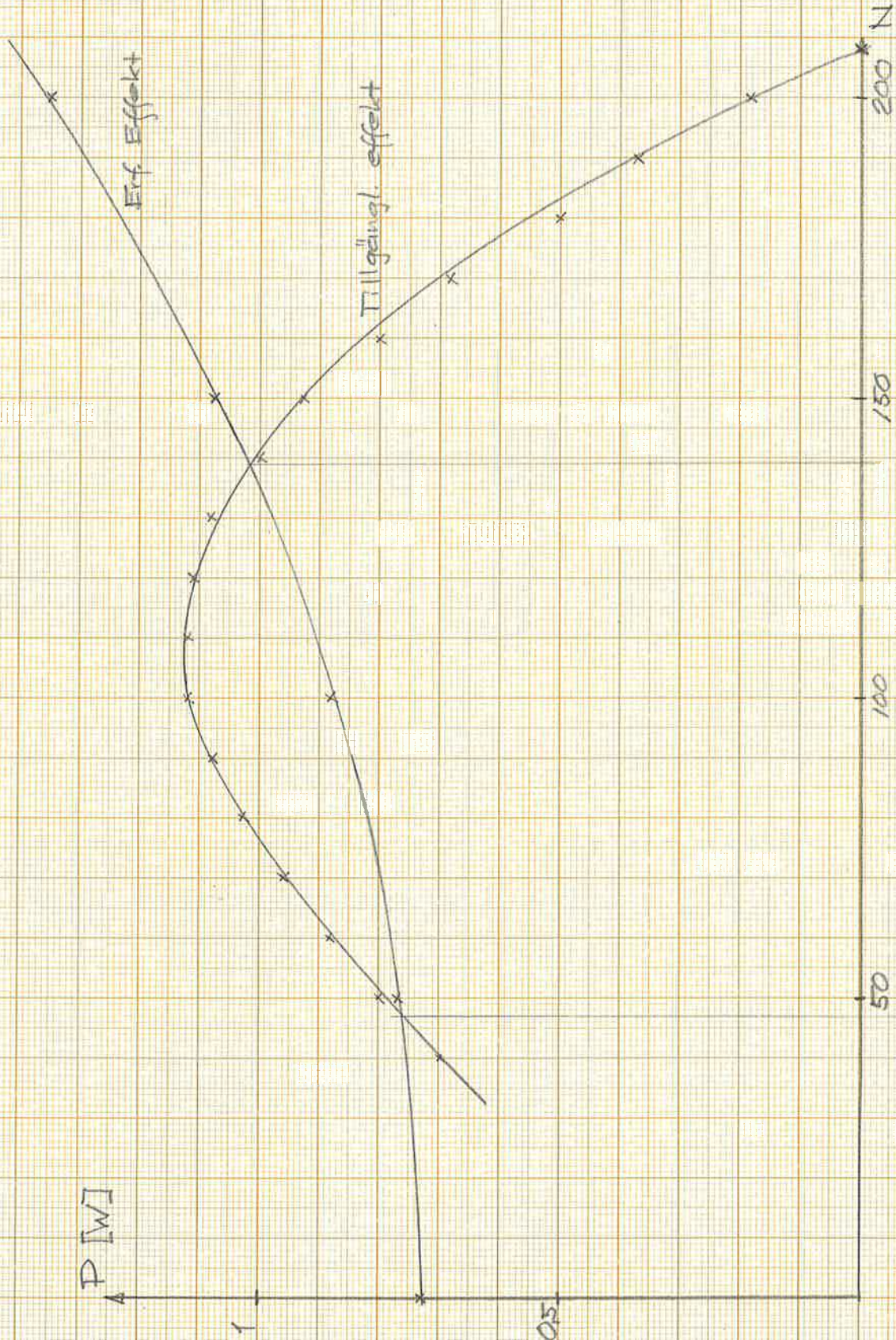
DIAGR. 2



$\varphi = 4^\circ$
 $m = 1 \text{ kg}$
1 motor

ERFORDERLIG OCH TILLGÄNGL.
MOTOREFF. SOM FKN AV UTVÄXL.

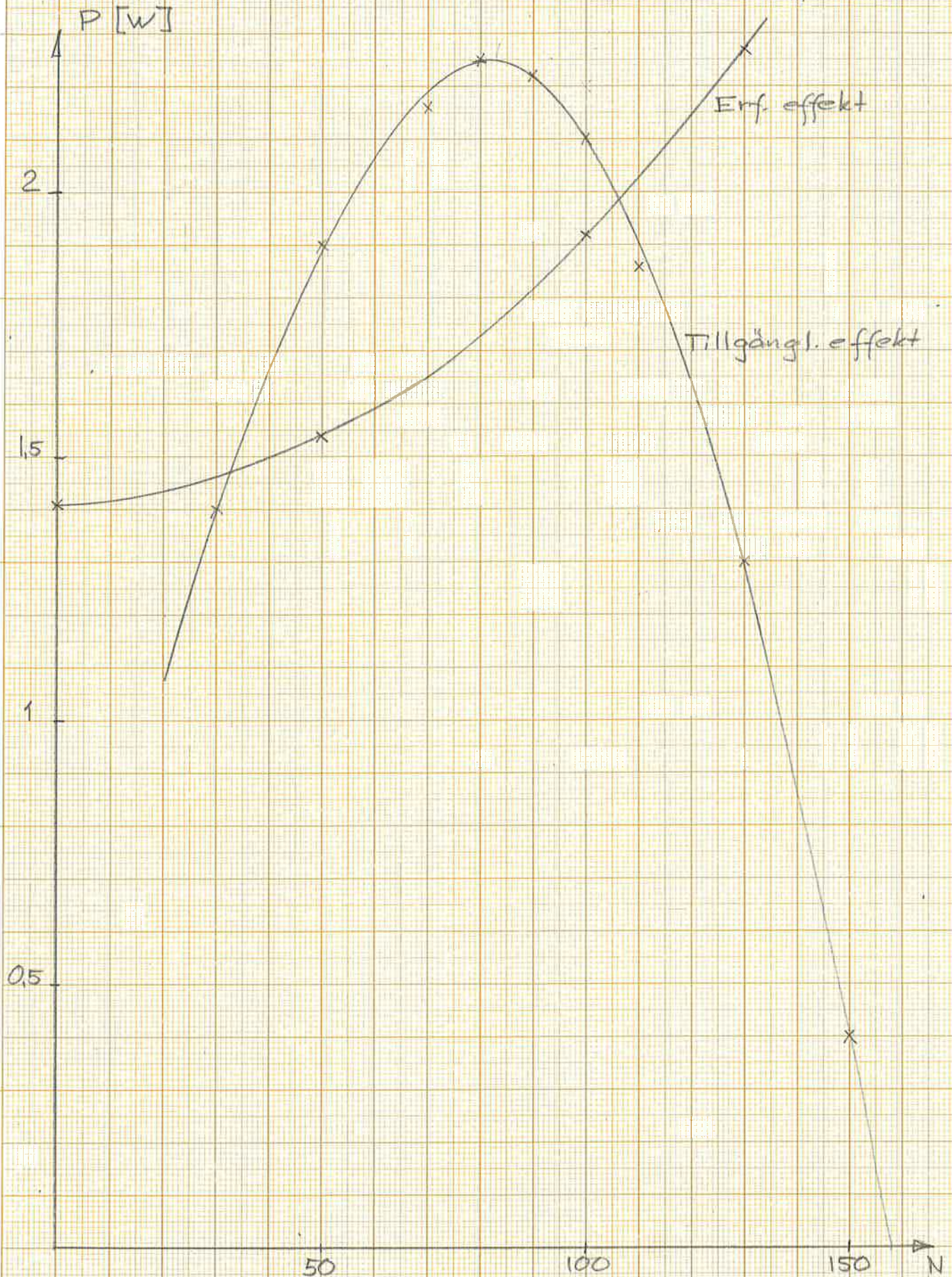
DIAGR. 3



$\varphi = 6,5^\circ$
 $m = 3 \text{ kg}$
2 motorer

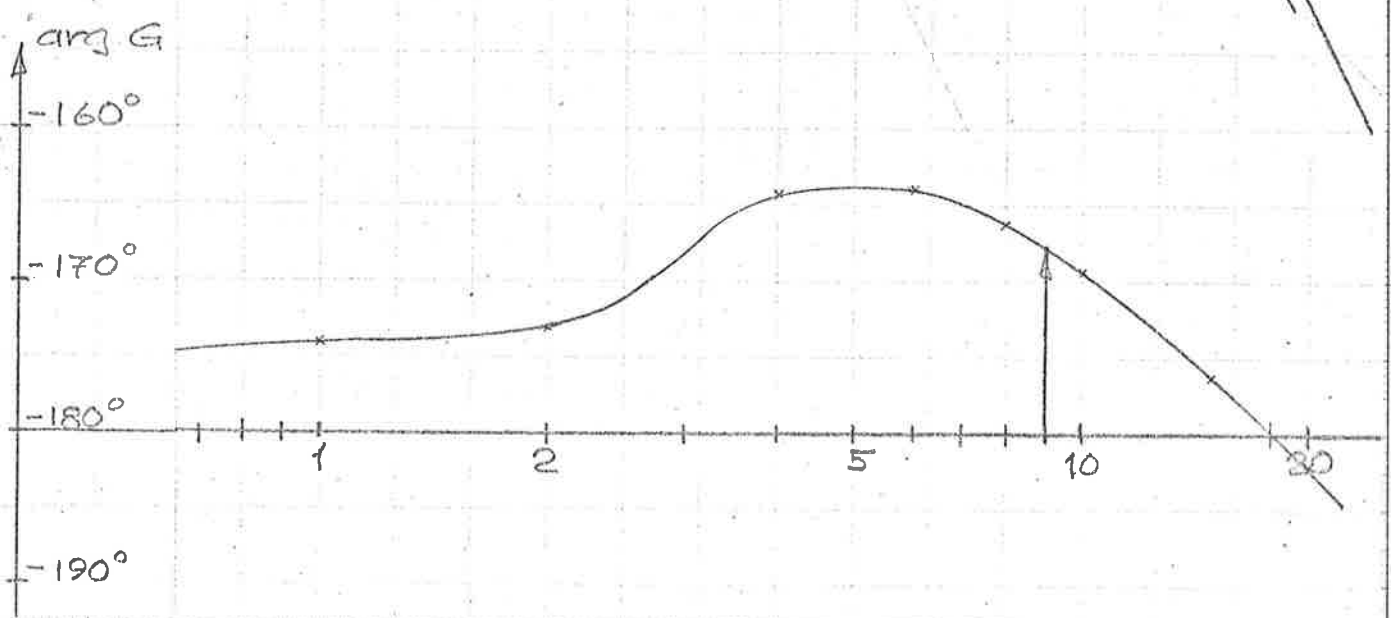
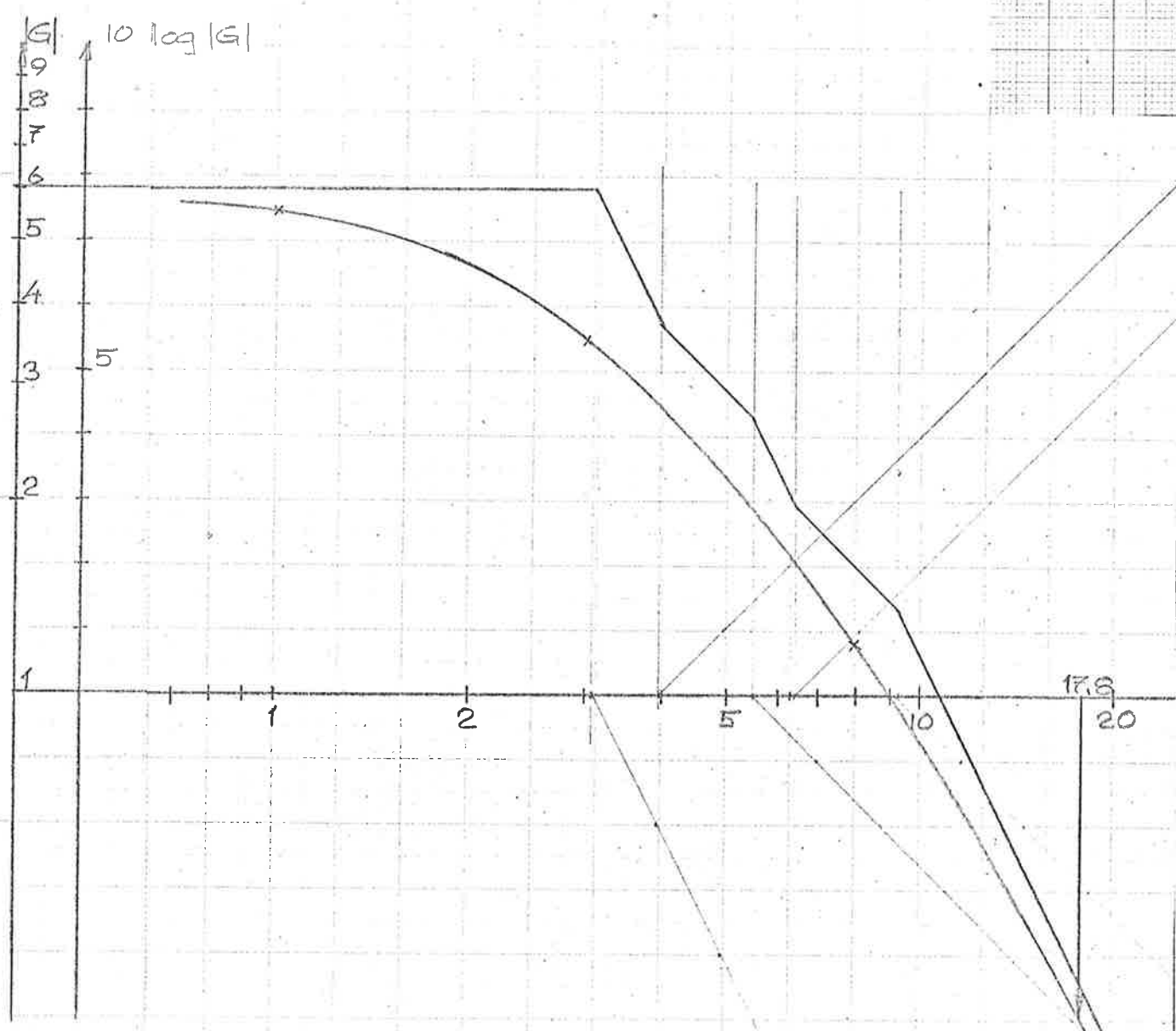
ERFORDERLIG OCH TILLGÄNGL.
EFFEKT SOM FKN AV LITVÄXL.

DIAGR. 4



BODEDIAGRAM FÖR $K=0,46$

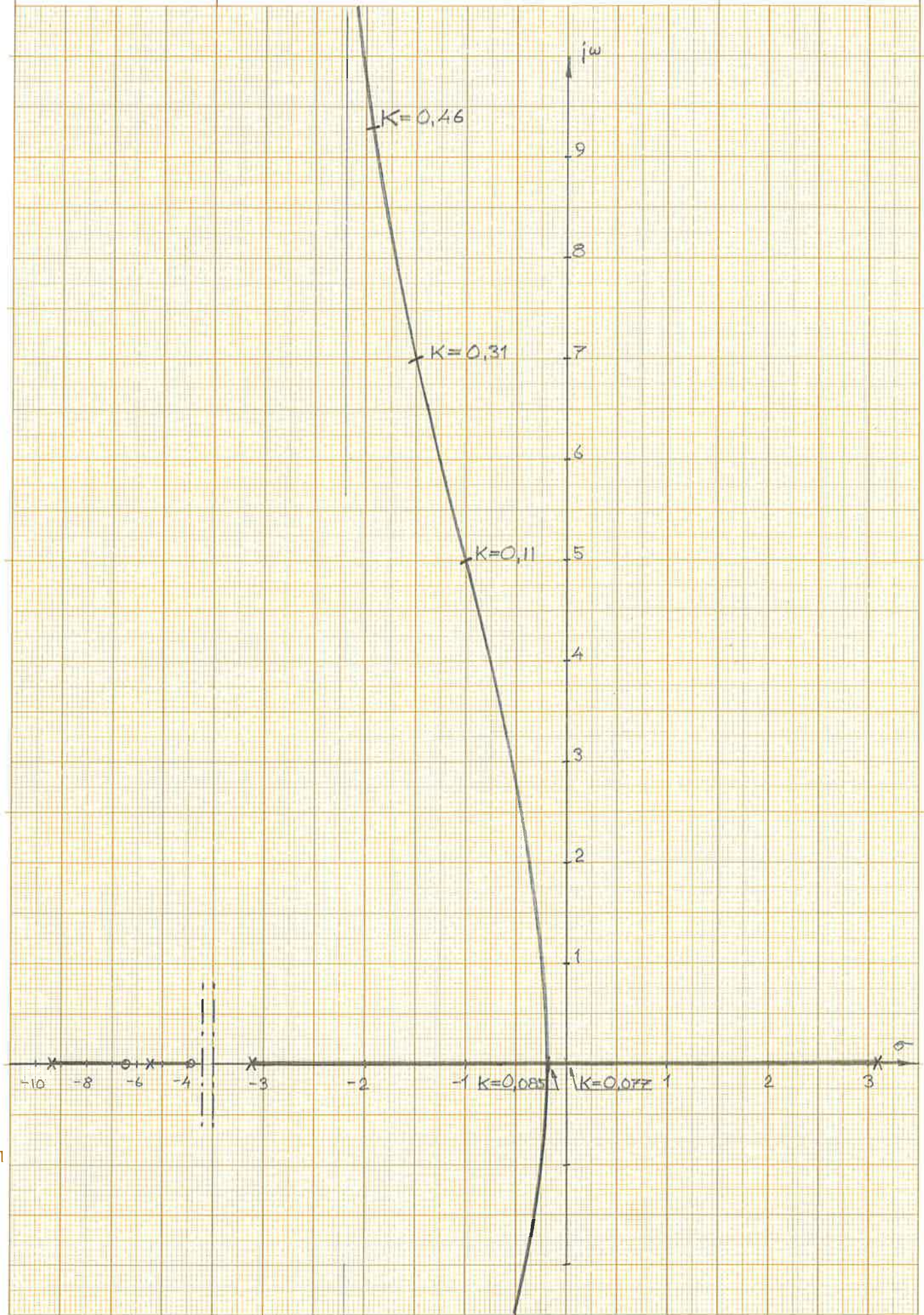
DIAGR. 5



ROTORTDIAGRAM FÖR

DIAGRAM 6.

$$G = -13K \frac{(1 + 0,253s)(1 + 0,155s)}{(1 + 0,181s)(1 - 0,102s)(1 + 0,108s)}$$

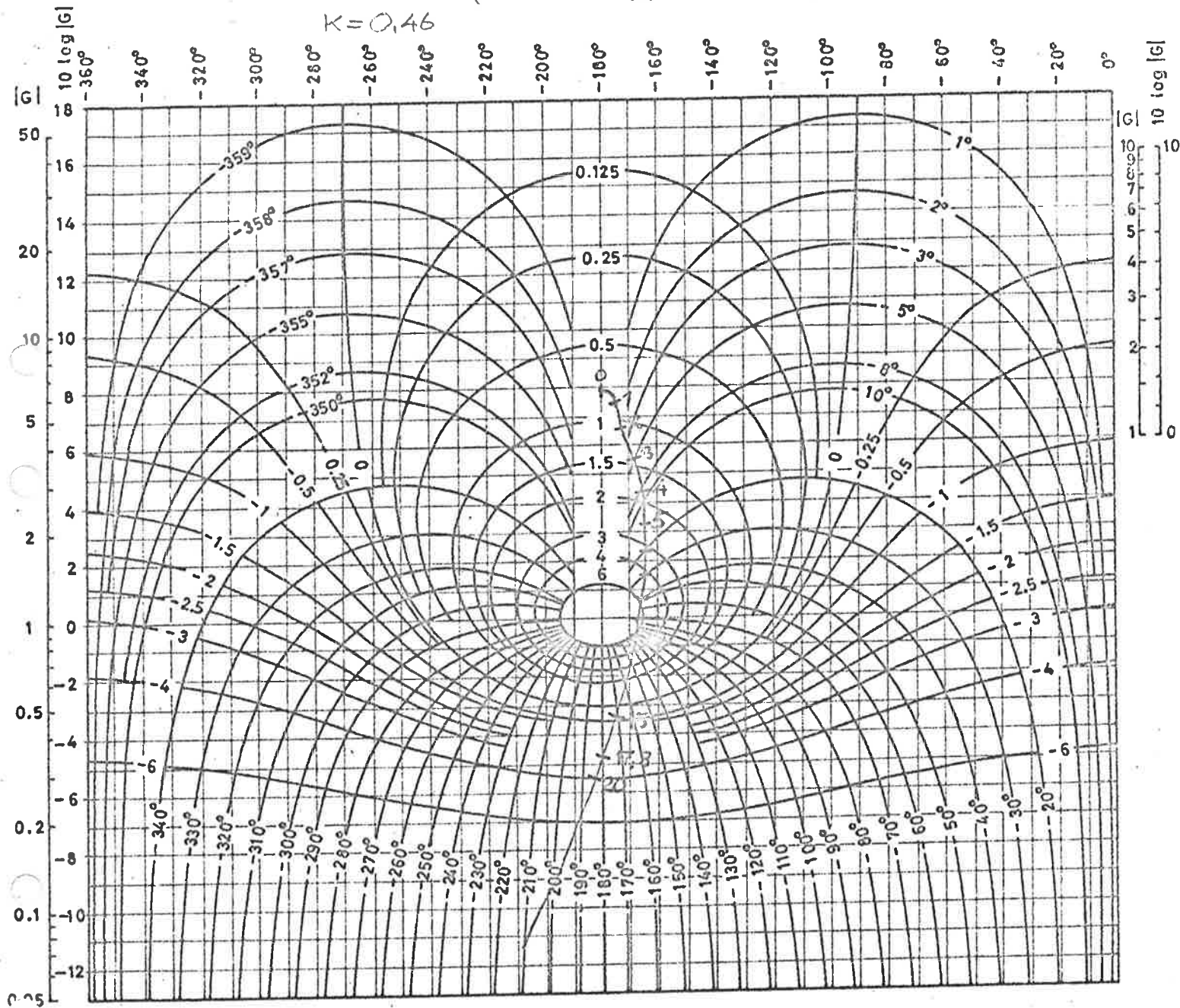


NICHOLS-DIAGRAM FÖR

DIAGR. 7

$$G = -13K \cdot \frac{(1 + 0,253s)(1 + 0,155s)}{(1 + 0,181s)(1 - 0,102s^2)(1 + 0,108s)(1 + 0,009s)}$$

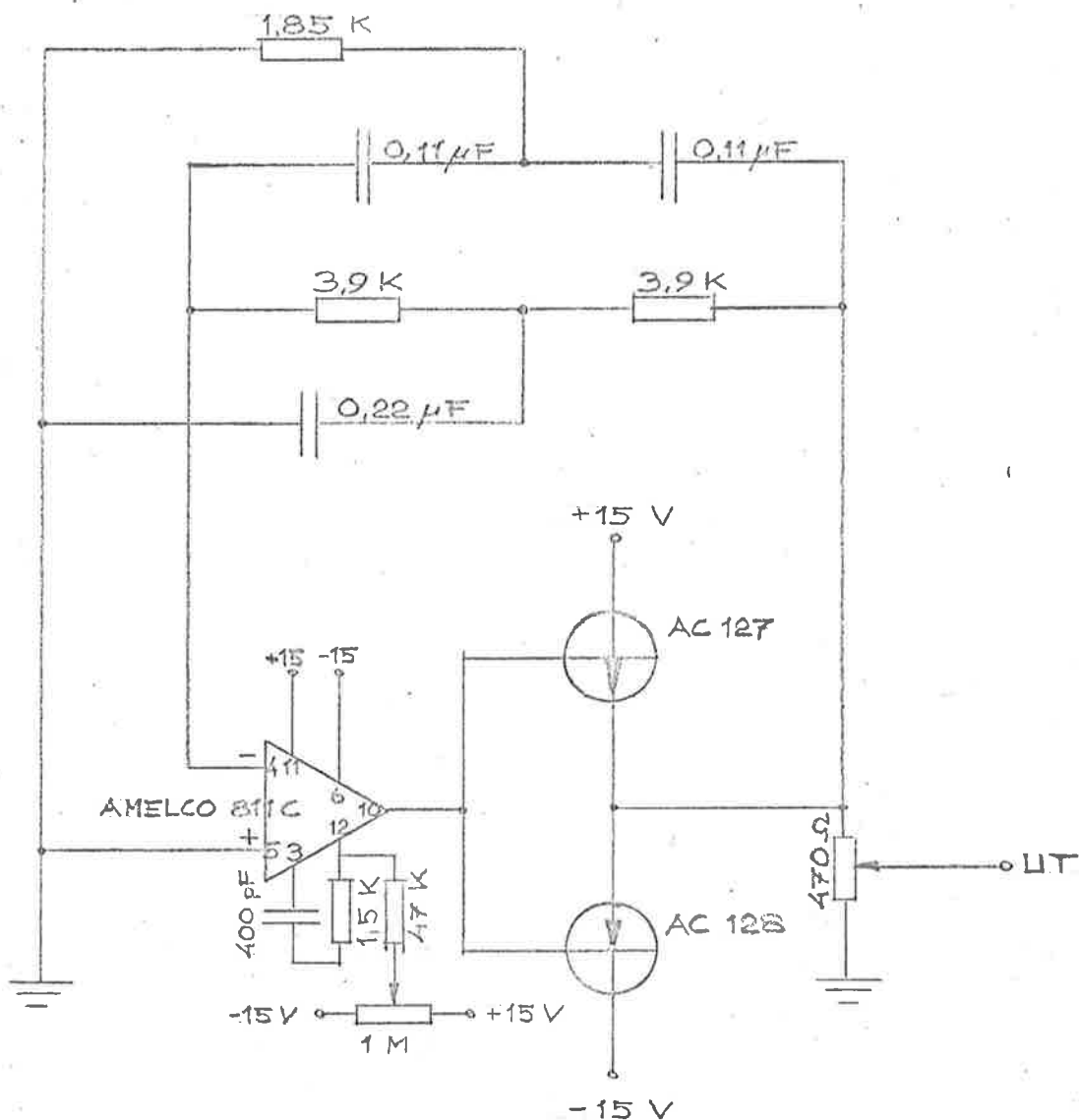
$$K = 0,46$$



Kurvskara för konstant $\left| \frac{G}{1+G} \right|$ graderad i $10^{10} \log \left| \frac{G}{1+G} \right|$

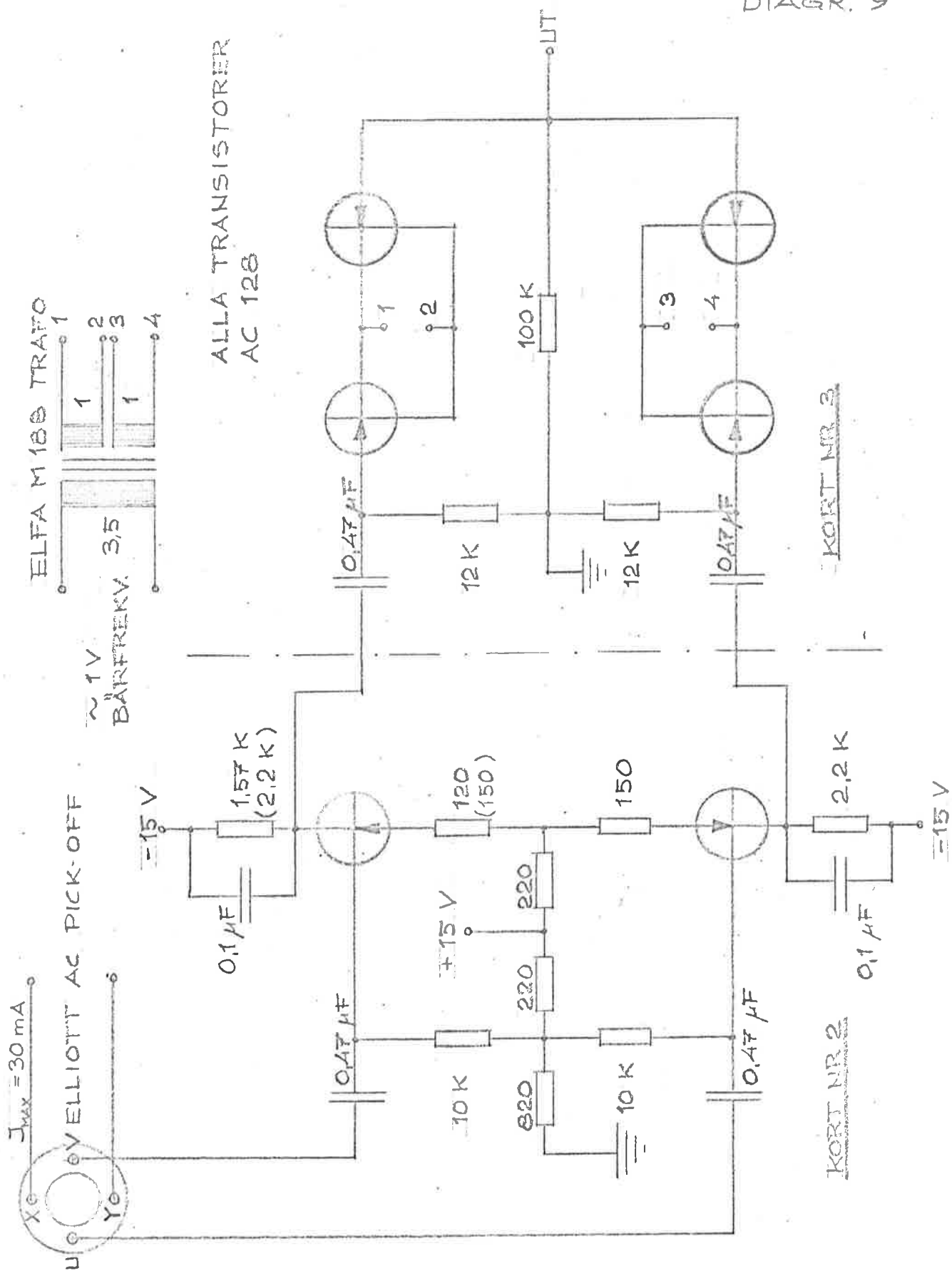
Kurvskara för konstant fas för $\frac{G}{1+G}$

DIAGR. 8



Det.-nr	Ant.	Benämning			Material	Mod.-nr Ämne Dimension	Anm.	
Konstr.	Ritad	Kop.	Kontr.	Stand.	Godk.	Skala	Ersätter	Ersatt av
MS	MS							
KRETSKORT NR 1		SERVO FÖR INV. MENDEL					Dat. 17.8 -69	
		OSCILLATOR ≈ 400 HZ					Ritn.-nr 1	

DIAGR. 9

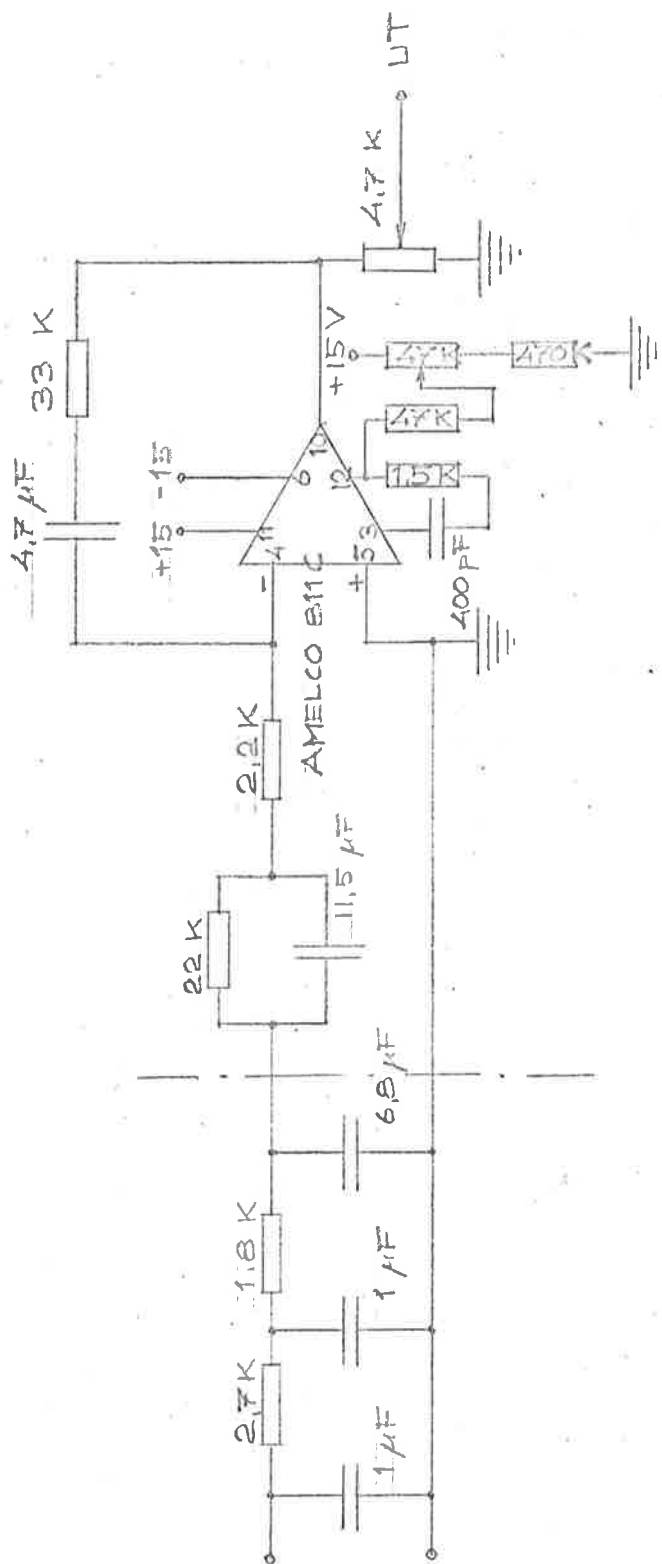


Det.-nr		Ant.		Benämning		Material		Mod.-nr Ämne Dimension		Anm.	
Konstr.	Ritad	Kop.	Kontr.	Stand.	Godk.	Skala	Ersätter	Ersatt av		Dat.	
	MS										17.8-69
KORT NR 2 o 3						SERVO FÖR INV. PENDEL DEMODULATOR					
										Ritn.-nr	2

A4-1.11
SMS 687
Import

Glama
Nr. 203 A4

DIAGR. 10

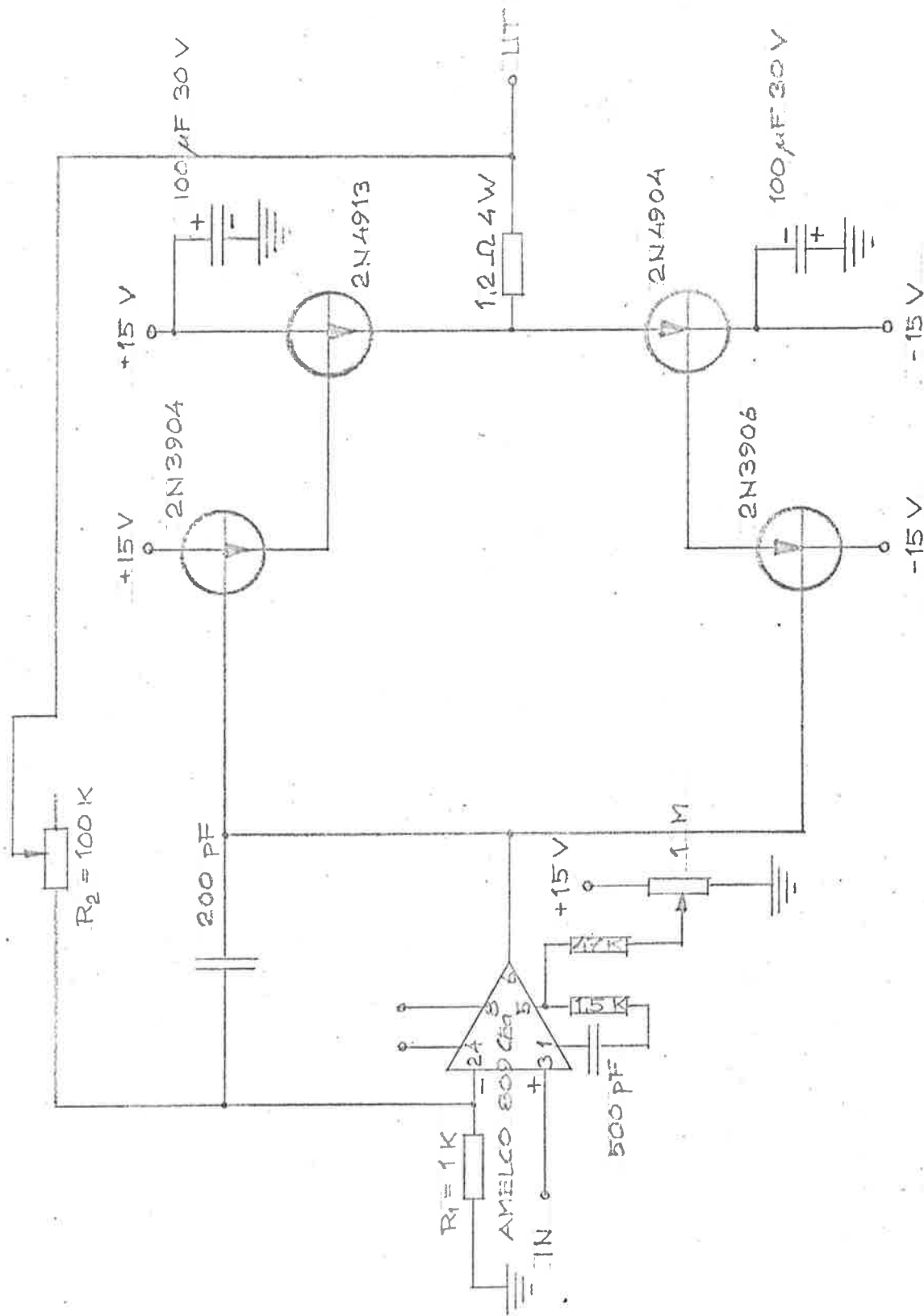


Det.-nr		Ant.		Benämning			Material		Mod.-nr Ämne Dimension		Anm.	
Konstr.	Ritad	Kop.	Kontr.	Stand.	Godk.	Skala	Ersätter	Ersatt av		Dat.		
	MS										17 5 -69	
KORT NR 4				SERVO FÖR INV. PENDEL				FILTER O KOMPENSERING		Ritn.-nr 3		

A 4-1.11
SMS 687
Import

Glama
Nr.203 A 4

DIAGR. 11



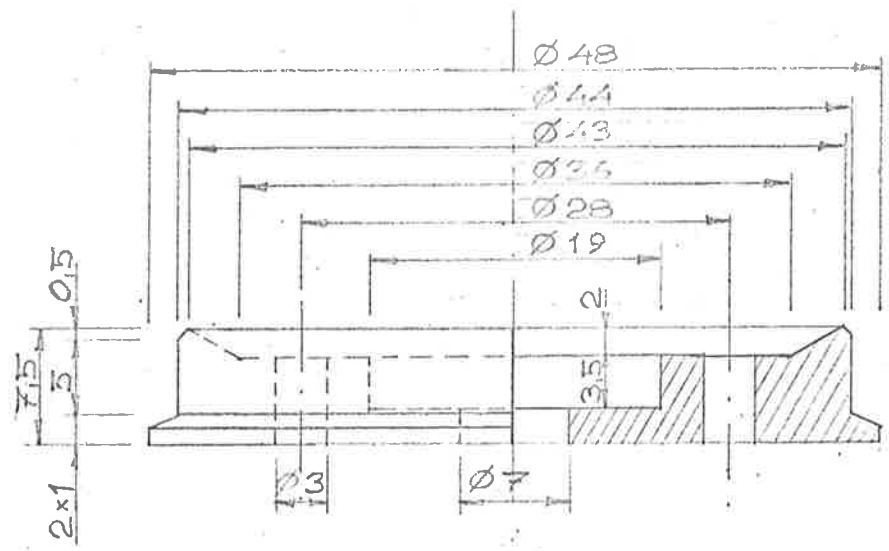
Det.-nr		Ant.		Benämning		Material		Mod.-nr Ämne Dimension		Anm.	
Konstr.	Ritad	Kop.	Kontr.	Stand.	Godk.	Skala	Ersätter	Ersatt av		Dat. 17.8-69	
Glama				SERVO FÖR INV. PENDIEL				Ritn.-nr		4	
Nr. 203 A4				DRIVFÖRSTÄRKARE							

A4-1.11
SMS 687
Import

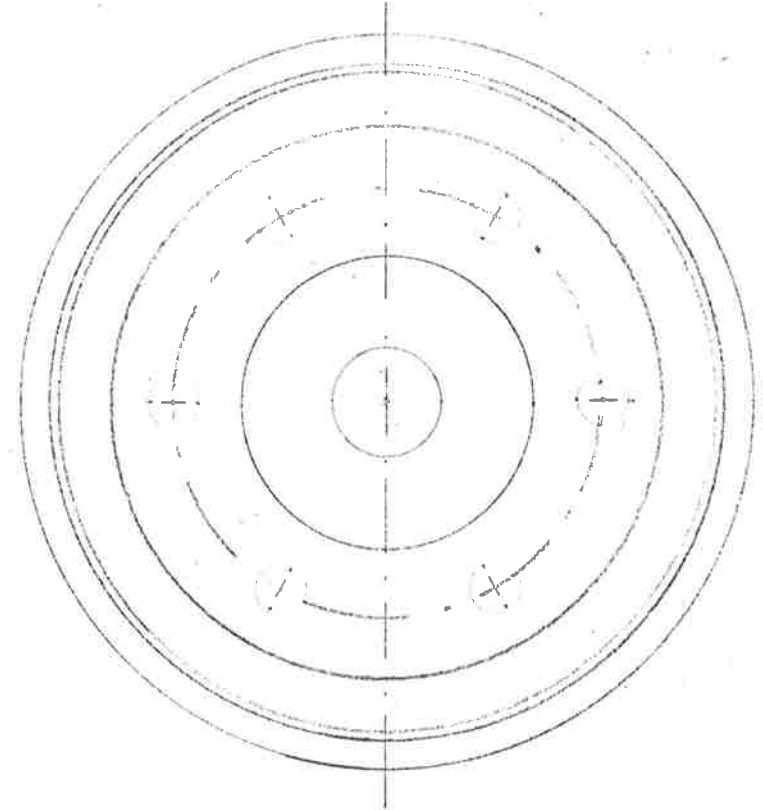
Glama

Nr. 203 A4

DIAGR. 12



MÅTT I MM



8		FÄLG			ALUM.			
Det.-nr	Ant.	Benämning			Material	Mod.-nr Ämne Dimension	Anm.	
Konstr.	Ritad MS	Kop.	Kontr.	Stand.	Godk.	Skala 2:1	Ersätter	Ersatt av
					SERVO FÖR INV. PENDING FÄLGAR		Dat 17.8-69	
							Ritn.-nr	5

Vorteile der Schrägwicklung

Vorteile der Schrägwicklung

Bild 7 zeigt einen Schnitt durch einen Motor mit Schrägwicklung. Beim Anlauf treten an den Ankerleitern große Kräfte auf. Durch die schräglaufenden Leiter werden diese Kräfte der Kollektorplatte a auf kürzestem Wege zugeführt. In Bild 7 ist auch zu erkennen, wie durch den Wegfall der Wickelköpfe die Höhe des Motors verringert wird. Da die Wicklung sehr leicht ist, läßt sich der Durchmesser der Welle klein halten. Dies ermöglicht einen Kollektor-Durchmesser von 1 bis 2 mm, obwohl 5 bis 9 Lamellen vorhanden sind. Es ergeben sich so geringe Gleitgeschwindigkeiten der Bürsten auf dem Kollektor; damit wird eine lange Lebensdauer des Motors erreicht. Auch die Leerlaufreibung wird klein und damit der Wirkungsgrad hoch. Bei den kleinsten Ausführungen lassen sich immerhin noch Wirkungsgrade von 70 bis 80 % erzielen.

Bei der erforderlichen Miniaturisierung aller Bauteile im Hinblick auf tragbare Geräte wird die übliche Rechteckwicklung immer ungünstiger. Für die Schrägwicklung gibt es in dieser Hinsicht keine Grenze. Der hohe Wirkungsgrad bleibt selbst bei kleinsten Ausführungen erhalten. Verwendet man Edelmetallbürsten und -kollektor, dann ist der Anlauf stets gesichert. Die Rundfunkstörungen lassen sich auf Grund des sich daraus ergebenden geringen Bürstenübergangswiderstandes leicht in kleinen Grenzen halten.

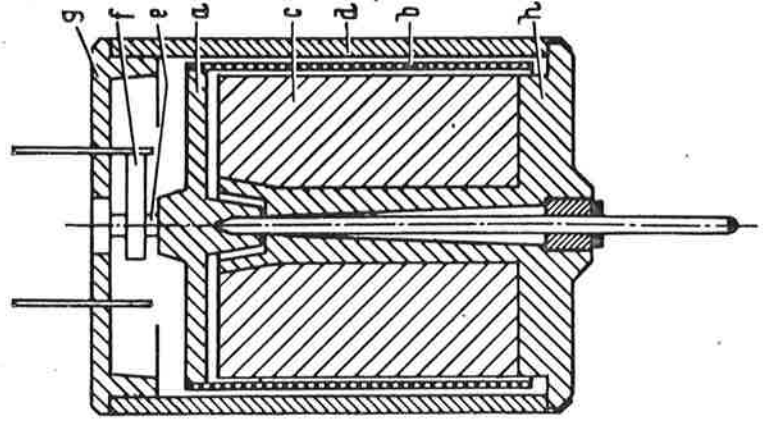


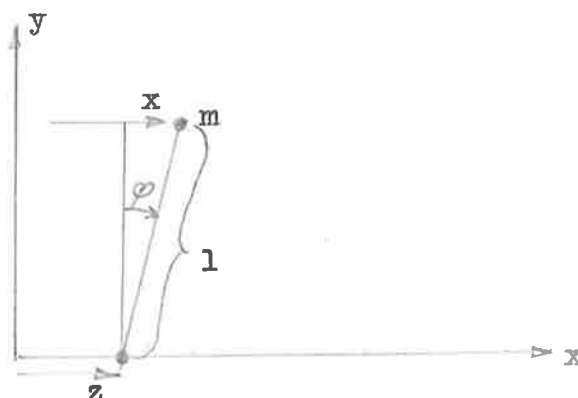
Bild 7
Schnitt durch einen Gleichstrom-Stellmotor
mit Schrägwicklung

- a Kollektorplatte
- b Wicklung
- c Kernmagnet
- d Eisenrückschluß
- e Kollektor
- f Bürsten
- g oberer Deckel
- h unterer Deckel

A P P E N D I X

1. Beräkning av pendelns överföringsfunktion.

Pendel med kula:



Låt kulans horisontella koordinat vara x och vagnens koordinat z .

Ur figuren fås:

$$\begin{aligned} x &= z + l \cdot \sin \varphi \\ y &= l \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \ddot{z} + l \cdot \ddot{\varphi} \cdot \cos \varphi - l \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi \\ \ddot{y} &= -l \cdot \ddot{\varphi} \cdot \sin \varphi - l \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot \cos \varphi \end{aligned} \quad (2)$$

Om F betecknar kraften som verkar på kulan, och stångens vikt försummas, får man

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x} &= F \cdot \sin \varphi \\ m \cdot \ddot{y} &= F \cdot \cos \varphi - m \cdot g \end{aligned}$$

Eliminering av F , \ddot{x} och \ddot{y} ger

$$\ddot{z} \cdot \cos \varphi + l \cdot \ddot{\varphi} = g \cdot \sin \varphi \quad ; \quad (3)$$

För små vinklar:

$$\ddot{z} + l \cdot \ddot{\varphi} = g \cdot \varphi \quad (4)$$

Eigenfrekvensen för pendeln är

$$\omega_p = \sqrt{\frac{g}{l}} = \sqrt{\frac{9,81}{1}} = 3,13 \quad \text{rad/s} .$$

För att få överföringsfunktionen Laplace-transformeras ekv. (4):

$$s^2 z + l s^2 \varphi = g \varphi$$

varav erhålles

$$\phi(s) = G(s) \cdot Z(s) = \frac{1}{g} \cdot \frac{s^2}{1 - (\tau_p s)^2} \cdot Z(s); \quad (5)$$

där

$$\tau_p = \frac{1}{\omega_p} = 0,32 \quad \text{sek}$$

2. Beräkning av motorvagnens överföringsfunktion.

En spänningsstyrd likströmsmotor har överföringsfunktionen

$$G_m = \frac{\phi_m(s)}{U_m(s)} = \frac{1}{K_m} \cdot \frac{1}{s(1+\tau s)} \quad \text{där}$$

$$\tau = \frac{RJ}{K_m^2} .$$

K_m = motorkonstanten Nm/A

R = rotorns resistans ohm

J = tröghetsmomentet m.a.p.
motoraxeln kgm²

Med utväxlingen N och hjulradien r fås vagnens läge Z som

$$Z(s) = \frac{r}{N} G_m(s) \cdot U_m(s) ;$$

således är vagnens överföringsfunktion:

$$G_v = \frac{r}{N \cdot K_m} \cdot \frac{1}{s(1 + \tau s)} ;$$

Här är

$$J = J_m + J_v + J_L \quad \text{där}$$

J_m = motorns tröghetsmoment

J_v = kuggväxels tröghetsmoment

J_L = tröghetsmomentet härrörande från vagnens vikt.

Alla tröghetsmoment räknas reducerade till motoraxeln.

För två seriekopplade motorer monterade på samma axel gäller att

$$J'_m = 2J_m$$

$$R' = 2R$$

$$K'_m = 2K_m$$

Med två motorer av typ Faulhaber 230/017 blir

$$J = 12,7 \cdot 10^{-7} \quad \text{kgm}^2 \quad \text{enl app. sid}$$

$$R' = 4 \quad \text{ohm}$$

$$K'_m = 2 \cdot 2,7 \text{ cnp/A} = 5,3 \cdot 10^{-3} \quad \text{Nm/A} \quad (\text{se diagr. 2})$$

Med $r = 5 \text{ cm}$ och

$$N = 105 \quad \text{blir}$$

$$G_v = \frac{Z(s)}{U_m(s)} = 0,101 \cdot \frac{1}{s(1 + 0,181s)}$$

=====

3. Beräkning av tröghetsmomenten

3.1 Motorernas tröghetsmoment tas direkt ur tillverkarens katalog. Två st. Faulhaber typ 230/017 används och enl. katalogen (diagr.2) är

$$J_m = 13,9 \cdot 10^{-4} \text{ cmps}^2 = 1,36 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2$$

∴ för två motorer

$$J'_m = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2$$

=====

3.2 Kuggväxeln

För en reduktionsväxel gäller att ett tröghetsmoment transformeras enl.

$$J_2 = \frac{1}{N^2} \cdot J_1 \quad (6)$$

där J_1 = tröghetsmom. vid utgående axeln

J_2 = " " " ingående axeln

N = växelns utväxlingsförhållande.

För att få en utväxling på $N \approx 100$ krävs med tillgängl. FAC-komponenter tre st. enkla utväxlingar.

Låt J'_i beteckna i:te axelns egna tröghetsmoment

" J_i " " " " " "

+ reducerade tröghetsmoment från alla "utanförhängande" axlar.

i räknas från utgående axeln. Således är

$J_1 = J'_1$ = utgående axelns tröghetsmoment

N_{ij} = utväxlingen mellan axlarna i och j .

Med 4 st. axlar (3 utväxlingar) blir tröghetsmomentet vid motoraxeln enl. (6)

$$\begin{aligned}
 J_4 &= J'_4 + \frac{J_3}{N_{34}^2} = \\
 &= J'_4 + \frac{J'_3}{N_{34}^2} + \frac{J'_2}{N_{23}^2 N_{34}^2} + \frac{J_1}{\underbrace{N_{12}^2 N_{23}^2 N_{34}^2}_{N^2}}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Hur skall man nu välja de olika kugghjulens diametrar för att hela växeln skall få minimalt tröghetsmoment?

På varje axel utom in- och utgångsaxeln sitter två kugghjul, ett större och ett mindre.

Sätt d_{1s} = stora hjulets diameter på i:te axeln
 d_{i1} = lilla " " " " "

Utväxlingen mellan varje axelpar bestäms av diametrarna på de kugghjul som är i kontakt med varandra. T.ex. är

$$N_{34} = \frac{d_3}{d_4}.$$

Tröghetsmomentet för ett kugghjul är prop. mot d^4

d.v.s. $J_i = k_i \cdot d_i^4$; där

k_i beror på hjulets tjocklek och densitet.

För denna växel erhålles enl. (7)

$$\begin{aligned}
 J_4 &= k_4 d_4^4 + \frac{k_{3s} d_{3s}^4 + k_{31} d_{31}^4}{\left(\frac{d_{3s}}{d_4}\right)^2} + \frac{k_{2s} d_{2s}^4 + k_{21} d_{21}^4}{\left(\frac{d_{2s}}{d_{31}}\right)^2 \left(\frac{d_{3s}}{d_4}\right)^2} + \\
 &+ \frac{k_1 d_1^4}{\left(\frac{d_1}{d_{21}}\right)^2 \left(\frac{d_{2s}}{d_{31}}\right)^2 \left(\frac{d_{3s}}{d_4}\right)^2} =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= k_4 d_4^4 + k_{3s} d_{3s}^2 d_4^2 + k_{31} \left(\frac{d_{31}}{d_{3s}}\right)^2 d_{31}^2 d_4^2 + \\
&+ k_{2s} \left(\frac{d_{31}}{d_{3s}}\right)^2 d_{2s}^2 d_4^2 + k_{21} \left(\frac{d_{21}}{d_{2s}}\right)^2 \left(\frac{d_{31}}{d_{3s}}\right)^2 d_{21}^2 d_4^2 + \\
&+ k_1 \left(\frac{d_{21}}{d_{2s}}\right)^2 \left(\frac{d_{31}}{d_{3s}}\right)^2 d_1^2 d_4^2 ;
\end{aligned}$$

Alla k_i lika utom k_4 .

$$k_4 = \varrho_{\text{bakelit}} \cdot \frac{\pi \cdot b}{32} \quad \text{för hjul 4.}$$

$$k_i = \varrho_{\text{stål}} \cdot \frac{\pi \cdot b}{32} \quad \text{för övrigt. } (=k)$$

b = hjulens bredd

$$\begin{aligned}
J_v &= (k_4 d_4^2 + k d_{3s}^2) d_4^2 + (d_{31}^2 + d_{2s}^2) \left(\frac{d_{31}}{d_{3s}}\right)^2 d_4^2 k + \\
&+ (d_{21}^2 + d_1^2) \left(\frac{d_{21}}{d_{2s}}\right)^2 \left(\frac{d_{31}}{d_{3s}}\right)^2 d_4^2 k \quad (8)
\end{aligned}$$

Den ojämförligt största termen är $k d_{3s}^2 d_4^2$, varav framgår att hjul 3s bör vara så litet som möjligt, liksom givetvis även hjul 4.

De tillgängliga kugghjulen har modulen 0,7 mm.

Minsta hjulen: 16 tänder

Största " : 96 " 1 st.

80 " 1 st.

Vidare finns hjul med 48 och 56 tänder.

Välj hjul 1 : 96 tänder

" 21: 16 "

" 2s: 80 "

" 31: 16 "

" 3s: 56 "

" 4 : 16 "

$$\text{Utväxlingen blir } \frac{96}{16} \cdot \frac{80}{16} \cdot \frac{56}{16} = 105 .$$

Tröghetsmomentet för växeln blir med $d = mz$ (z =ant.kugg)

$$J_v = 1,7 \cdot 10^{-7} \quad \text{kgm}^2$$

=====

3.3 Vagnen

Det tröghetsmoment som känns vid drivande hjulaxeln består av två delar. En del härrör från vagnens acceleration i Z - led och en del härrör från hjulens vinkelacceleration.

Om varje hjul har tröghetsmomentet J_{hjul} m.a.p. hjulaxeln, blir totala tröghetsmomentet från hjulen $4J_{\text{hjul}}$.

För att beräkna delen från vagnens acc. sättes rörelsekv. för vagnen upp:

$$F = m \cdot \ddot{z} ; \tag{9}$$

Vidare gäller

$$T = F \cdot r \tag{10}$$

$$\ddot{z} = r \cdot \ddot{\theta} \tag{11}$$

- där T = drivande mom. vid hjulaxeln
- r = hjulens radie
- $\ddot{\theta}$ = hjulens vinkelacc.
- m = vagnens totala vikt inkl. hjul

Kombinera ekv. (10) och (11) med (9) och man får

$$T = mr^2 \cdot \ddot{\theta} ;$$

varav man får totala tröghetsmomentet vid drivande hjulaxeln

$$J = 4J_{\text{hjul}} + mr^2 ;$$

eller efter reduktion till motobaxeln:

$$J_L = \frac{1}{N^2} (4J_{\text{hjul}} + mr^2)$$

=====

Vägning av vagnen har gett följande resultat:

Hela vagnen	
med elektronik	
med pendel	
utan kåpa	3200 g
Pendel utan kula	59 g
kula	77 g
Ett däck utan fälg	175 g

Med $r = 5$ cm får man

$$mr^2 = 3200 \cdot 5^2 = 80 \cdot 10^3 \text{ gcm}^2 = 80 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

Vid beräkningen av ett hjuls tröghetsmoment, antas däcket vara en toroid med medeldiametern 75 mm. Fälgarna förenklas till två st. hålcyllindrar enl. fig. 3. Jfr diagram 12.

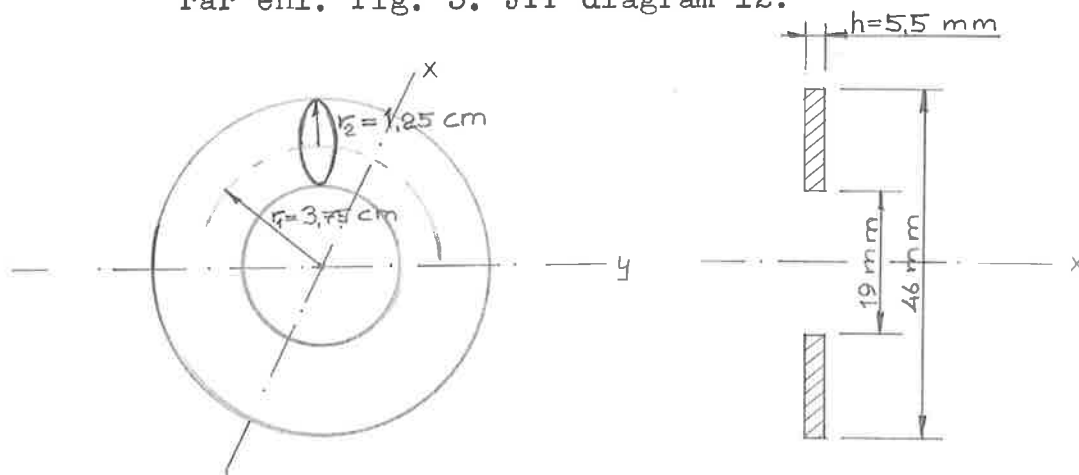


Fig 2. Förenklad bild av däck.

Fig 3. Förenklad bild av fälg.

För en toroid enl. fig 2 är tröghetsmomentet m.a.p. x - axeln

$$J = m \cdot \frac{4r_1^2 + 3r_2^2}{4} = 175 \cdot \frac{4 \cdot 3,75^2 + 3 \cdot 1,25^2}{4} = 2660 \text{ gcm}^2$$

Två st. hålcyllindrar av aluminium enl. fig 3
har tröghetsmomentet m.a.p. x = axeln

$$J = \rho \cdot \pi \cdot h \cdot \frac{R^4 - r^4}{2} \cdot 2 = 2,7 \cdot \pi \cdot 0,55(2,3^4 - 0,95^4) =$$

$$= 126 \text{ gcm}^2$$

$$\therefore J_{\text{hjul}} = 2660 + 126 = 2786 \text{ gcm}^2 \approx 2800 \text{ gcm}^2$$

Vid drivande hjulaxeln fås då

$$J = (4 \cdot 2,8 + 80) \cdot 10^3 = 91,2 \cdot 10^3 \text{ gcm}^2$$

och vid motoraxeln (N = 105)

$$J_{\text{L}} = \frac{91,2 \cdot 10^3}{105^2} = 8,3 \text{ gcm}^2 = \underline{\underline{8,3 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2}}$$

Totala tröghetsmomentet vid motoraxeln blir
således

$$J = J_{\text{m}} + J_{\text{v}} + J_{\text{L}} = (2,7 + 1,7 + 8,3) \cdot 10^{-7} =$$

$$= \underline{\underline{12,7 \cdot 10^{-7} \text{ kgm}^2}}$$

4. Operationsförstärkarna.

De operationsförstärkare som används är av
fabrikat Amelco. Dessa har följande typiska
värden på inresistans resp. förstärkning:

$$R_{\text{in}} = 200 \text{ kohm}$$

$$K = 92 \text{ dB}$$

5. Beräkning av kompenseringsslänkens överf.fkn.

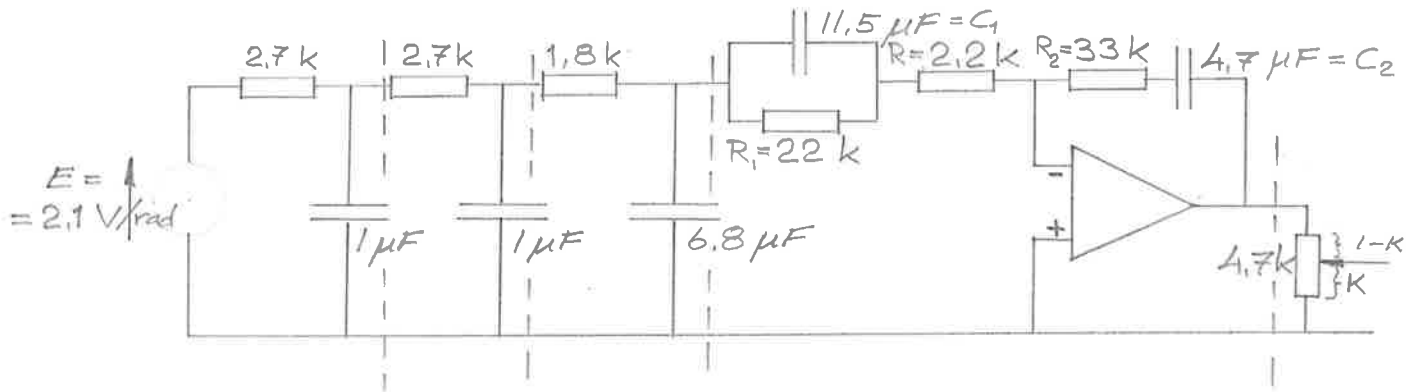


Fig. 4. Ekv. schema för vinkelgivare, filter och kompensering.

Dela upp nätet i kaskadkopplade fyrpoler enl. de streckade linjerna. Strömmar och spänningar räknas positiva enl. fig 5.

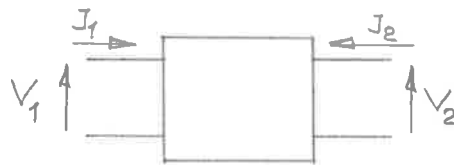


Fig. 5. Def. av pos. strömmar och spänn.

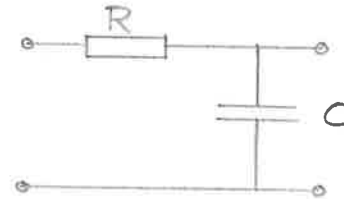


Fig 6. RC - länk

Räkna med kedjeparametrarna definierade så att

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix}$$

För en RC - länk (fig 6.) är

$$A = 1 + sRC$$

$$B = R$$

$$C = sC$$

$$D = 1$$

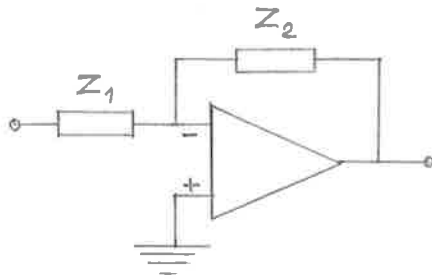


Fig. 7. OP - förstärkare

För operationsförstärkaren enl. fig 7 är

$$A = - \frac{Z_1}{Z_2} = - \frac{sC_2(R + R_1 + sRR_1C_1)}{(1 + sR_1C_1)(1 + sR_2C_2)}$$

$$B = 0$$

$$C = - \frac{1}{Z_2} = - \frac{sC_2}{1 + sR_2C_2}$$

$$D = 0$$

Vid kaskadkoppling erhålles hela nätets kedjematris genom att multiplicera ihop delnätens kedjematriser. Normera med $R_0 = 10 \text{ k}$

$$\omega_0 = 100 \text{ rad/s}$$

Man får då

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 + s0,27 & 0,27 \\ s & 1 \end{bmatrix}^2 \cdot \begin{bmatrix} 1 + s1,22 & 0,18 \\ 6,8s & 1 \end{bmatrix} \\ & \cdot \begin{bmatrix} -2,42 \frac{(1 + 2,3s)4,7s}{(1 + 25,3s)(1 + 15,5s)} & 0 \\ -\frac{4,7s}{1 + 15,5s} & 0 \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} -\frac{14,8s(1 + 12s + 13s^2 + 2,92s^3 + 0,157s^4)}{(1 + 25,3s)(1 + 15,5s)} & \dots \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Man får då överföringsfunktionen

$$G = \frac{U}{E} = \frac{1}{A} = \frac{(1 + 25,3s)(1 + 15,5s)}{14,8s(1 + 12s + 13s^2 + 2,92s^3 + 0,157s^4)} =$$

$$= - \frac{(1 + 25,3s)(1 + 15,3s)}{14,8s(1 + 1082s)(1 + 0,896s)(1 + 0,0844s)(1 + 0,191s)}$$

Med $E = 2,1$ V/rad fås (med onormerad frekvens)

$$G = \frac{U(s)}{\theta(s)} = - 14,2 \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{(1 + 0,253s)(1 + 0,155s)}{(1 + 0,1082s)(1 + 8,96 \cdot 10^{-3}s) \cdot (1 + 0,844 \cdot 10^{-3}s)(1 + 1,91 \cdot 10^{-3}s)}$$

Nollställen: -3,95 och -6,45;

Poler: -9,24; -111,7; -1186; -524.

SERVO FÖR INVERTERAD PENDEL

Bruksanvisning

Anslutning av spänningsaggregat.

Anslutning sker med strömbrytaren på skyddskåpans gavel i läge "STOPP". Lämpligt spänningsaggregat skall ha spänningarna $\pm 15V$ och 0 samt helst kunna ge ca 2 A. För säker drift fordras att aggregatet är stabiliserat och har fjärravkänning av spänningen, "remote control".

I kabeln från vagnen är de tunna trådarna avsedda för fjärravkänningen. Färgerna på banankontakterna betyder följande:

Grön: + 15 V

Blå : - 15 V

Svart: Jord

Start

Slå på spänningsaggregatet. Håll pendeln i ungefär nolläge och sätt strömbrytaren i läge "KÖR". Om vagnen börjar självsvänga (skaka) har pendeln hållits för snett, och starten görs om. Går det inte att starta hur pendeln än hålles, är förstärkningen för hög.

OBS. Alltid om vagnen av någon anledning börjar självsvänga, bör den stoppas så fort som möjligt eftersom motorerna blir kraftigt överbelastade.

Justering av nollställningen

Om vagnen alltför snabbt börjar driva iväg är nollställningen feljusterad. Den justeras enligt följande:

Starta vagnen och håll pendeln så att vagnen står stilla. När pendeln släppes observeras åt vilket håll den vill driva. Detta kompenseras med en trimpot. som sitter innanför hålet närmast strömbrytaren. Med fram och bak på vagnen definierat så att motorerna sitter bak medför vridning medurs på potentiometern att vagnen vill åka mera bakåt.

Klaras inte justeringen med enbart potentiometern måste pick-offen vridas. Ytterst små vridningar är tillräckliga.

Om spänningsaggregatet nyss slagits på, så vänta gärna ett par minuter innan justering företages, så att förstärkarna hinner bli varma.

Justering av förstärkning

Förstärkningen kan justeras med trimpotentiometern innanför hålet längst bort från strömbrytaren. Obs att nollställningen ändras något om man ändrar förstärkningen.

Enheterens placering

Om man numrerar kretskorten från 1 till 4 med nr 1 närmast "tornet" så finns på

kort nr 1: Oscillatorn

kort nr 2: Demodulatorns diff. förstärkare

kort nr 3: Demodulatorenheten

kort nr 4: Filter och kompensering

Effektförstärkaren är placerad under vagnen.

Övrigt

Utspänningen från oscillatorn kan justeras om kåpan tas av. Om sinusformen från oscillatorn inte är snygg kan detta justeras med op-förstärkarens offset-justering.