

KONSTRUKTION AV
EN ENKEL FLYGPLANSSIMULATOR

ANDERS HANSON

RE -175 April 1976
Inst.för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola

KONSTRUKTION AV
EN ENKEL FLYGPLANSSIMULATOR

Examensarbete utfört av Anders Hanson
med handledning av Björn Wittenmark

Inst. för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola
April 1976

ABSTRACT

A simple flight simulator has been built up, using an analog computer to simulate the aircraft dynamics.

The dynamics model used, does not represent any particular aircraft. It is nevertheless representative of a large group of conventional aircraft. Simulations clearly show an increased ease in handling the flight simulator, if the pilot has flying experience. This indicates a similarity between real aircraft dynamics and the model dynamics.

The use of an analog computer to simulate the aircraft dynamics is sufficient for the elementary model, but is an obstacle to further improvement of the flight simulator. In future development, transfer of the dynamics model to a digital computer should have priority.

If the dynamics are computerized, quick changes of these can be made. The pilot will have interesting opportunities to compare the dynamics of different aircraft .

SAMMANFATTNING

En enkel flygplanssimulator är uppbyggd med en modell av flygplansdynamiken uppkopplad på en analogmaskin.

Den framtagna modellen representerar inget särskilt flygplan, utan är representativ för en stor grupp konventionella flygplan. Simuleringar visar klart att handhavandet av simulatoren underlättas avsevärt om föraren är flygutbildad. Det bekräftar författarens uppfattning om att dynamiken är korrekt.

Användandet av en analogmaskin för att simulera flygplansdynamiken är tillräckligt för den elementära modellen, men utgör ett hinder för vidareutveckling av simulatoren.

I det fortsatta arbetet med flygplanssimulatoren bör övergången till en datorstyrd dynamikmodell komma i främsta rummet.

Om dynamiken lägges på data, kan också snabba byten av dynamiken ske. Föraren kan få uppleva skillnader i egenskaper hos olika flygplan.

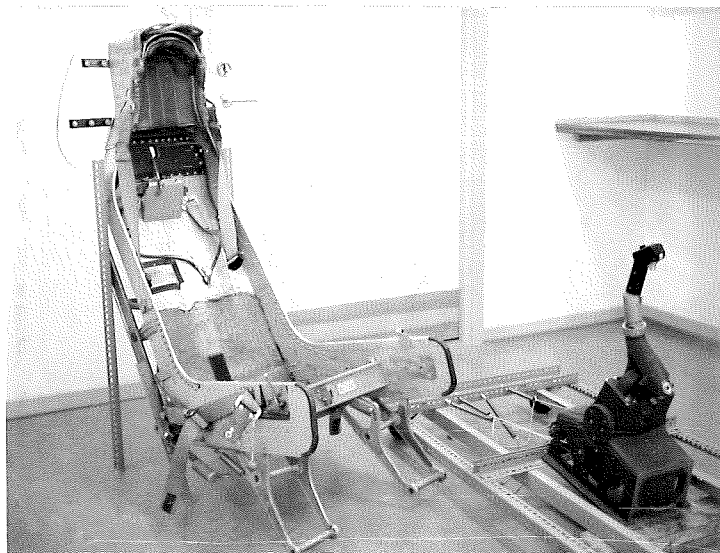
INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	sida
1 INLEDNING	1
2 PRINCIPEN	3
3 FLYGPLANET	5
4 KONSTRUKTIONEN	7
4.1 Mekanisk Uppbyggnad	7
4.2 Styrorgan	7
4.21 Styrspak	7
4.22 Pedaler	8
4.23 Gasreglage	9
4.3 Instrument	10
4.31 Instrumentpanel	10
4.32 Horisont	11
4.33 Kursgyro	13
4.34 Höjdmätare	14
4.35 Fartmätare och varvtalsindikator	15
4.36 Spänning-frekvensomvandlare	15
4.37 Stegmotorerna	17
5 FLYGPLANSMODELLEN	18
5.1 Flygplanekvationers värde och simulatorns uppgift	18
5.2 Den enkla flygplansmodellen, avsedd för analogimaskin	19
6 INSTRUKTION	22
6.1 Ingående delar	22
6.2 Sammansättning och uppkoppling	22
6.21 Oscilloskopet	22
6.22 Analogimaskinen	23
7 SIMULERINGAR	25
7.1 Uppläggning	25
7.2 Simulering I	25
7.21 Genomförande	25
7.22 Resultat	25
7.3 Simulering II	28
7.31 Genomförande	28
7.32 Resultat	28
8 SLUTSATSER	31
8.1 Den enkla flygplanssimulatorn	31
8.2 En mer avancerad flygplanssimulator	31

1 INLEDNING

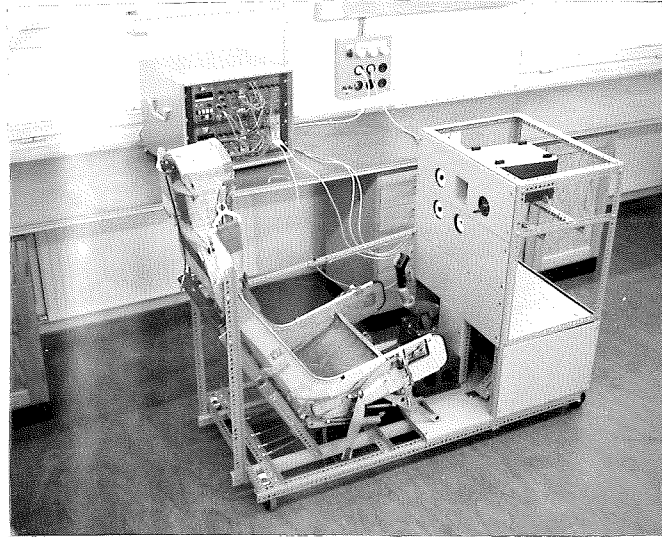
Syftet med detta arbete är att konstruera, bygga och förverkliga en enkel flygplanssimulator. Denna skall användas till att studera människan som del av ett regelsystem.

I utgångsläget fanns en katapultstol och en styrspek tillgängliga.



Utifrån dessa delar byggdes förarplatsen upp för att efterlikna en flygplanskabin. Förarplatsen är utrustad med de väsentligaste instrumenten för att ge information om flygplanets läge i rymden.

Flygplanets dynamik simuleras med analogi-
maskiner. Detta ger en god efterlikning trots
de grova förenklingar man måste göra.



2 PRINCIPEN

Föraren i en farkost måste förse med information om dess läge i och förhållande till omgivningen. Detta för att få en uppfattning om vilka åtgärder som bör vidtas för att i fortsättningen framföra farkosten på önskvärt sätt. Till sitt förfogande har föraren ett eller flera styrorgan, med vars hjälp farkostens rörelse kontrolleras.

I ett flygplan måste piloten informeras om:

- attityd
- lutning
- kurs
- fart
- höjd
- position
- motordata

Styrorganen utgöres av:

- spak - skev och höjdroder
- pedaler - sidroder
- gasreglage - varvtal

samt reglage för manövrering av:

- klaffar
- luftbromsar
- spoilers
- trimmar etc.

Den enkla flygplanssimulatorn förser piloten
med information om:

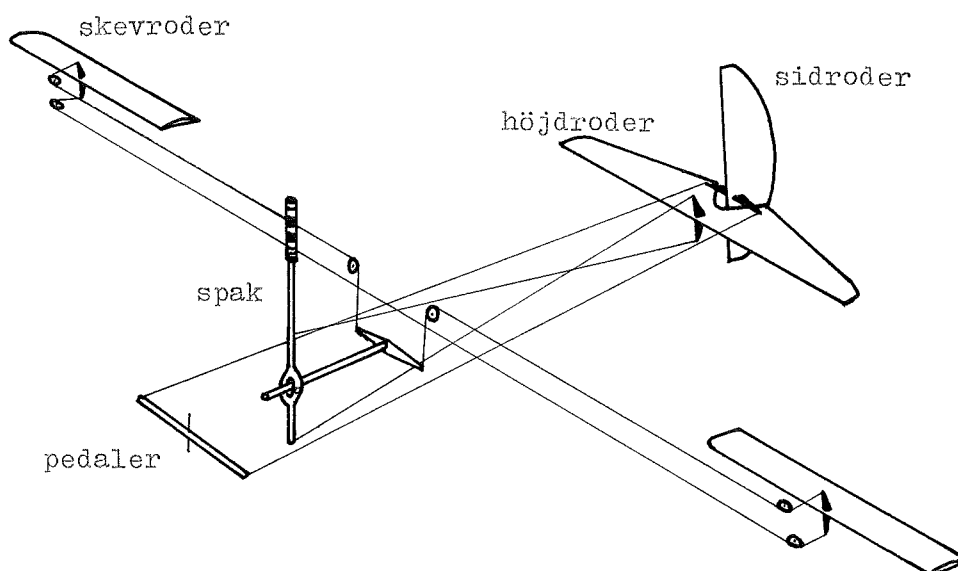
attityd
lutning
kurs
fart
höjd
motorvarvtal

Piloten i sin tur, påverkar simulatorn med:

spåk
pedaler
gasreglage

3 FLYGPLANET

Ett flygplan är en farkost med möjlighet att flyga trots att den är tyngre än luft. Den lyftande kraften genereras när luft strömmar kring vingarna. Luftströmningen ger också möjlighet att styra flygplanet med dess roder.



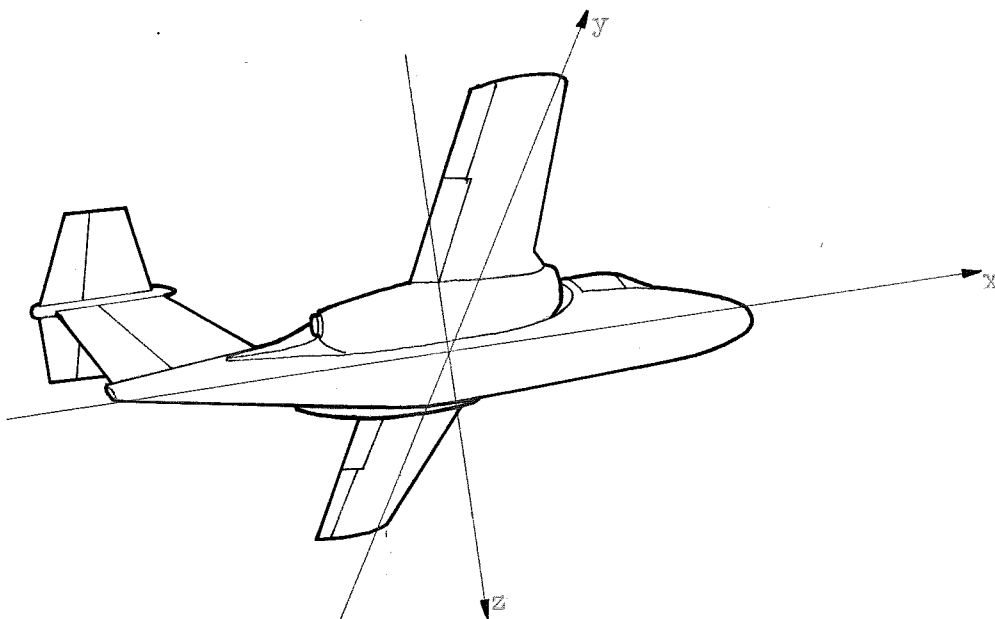
Sidrodret manövreras med pedalerna. Om höger pedäl förs fram, rör sig flygplanet's nos åt nöger. Ett tryck på vänster pedäl och nosen girar åt vänster.

Höjdrodret manövreras med spaken. Dras spaken bakåt går nosen upp, skjuts spaken fram tippar nosen neråt.

Skevrodret sköts också med spaken. När spaken förs åt höger kommer planet att börja luta åt samma håll, förs spaken åt vänster kommer planet att rolla åt vänster.

Gasreglaget, på vänster sida om piloten, reglerar motordragkraften. Framåt innebär ökad dragkraft och bakåt betyder minskad dragkraft.

Normalt konstrueras ett flygplan så att det är stabilt i ett så stort flygområde som möjligt. Det mest uppenbara fallet av stabiliserande anordning är fenan med sidroder. Den stabiliteten kallas vindflöjelstabilitet och verkar kring z-axeln. (Se figur för definition av koordinat-axlar).



Flygplanet görs också stabilt med avseende på x- och y-axlarna. Stabiliteten åstadkommes antingen aerodynamiskt eller med elektriska återkopplingar.

4 KONSTRUKTIONEN

4.1 Mekanisk Uppbyggnad

Flygplanssimulatorn består av två större enheter, förarplatsen och analogmaskinen. Förarplatsen är uppbyggd på ett hjulförsett chassi. Alla delar är monterade med skruv och mutter för att lätt kunna demonteras. De huvudsakliga uppbyggnadsdelarna är metallbalkar och träskivor. Metallbalkarna utgör de bärande elementen och träskivorna utgör de stadgande elementen.

4.2 Styrorgan

4.21 Styrspak

Styrspaken ger utsignal både i tipp- och rolled. Utsignalerna är potentialer som anger spakens läge. De åstadkommes med potentiometrar som är friktionskopplade till spakens fjäderlinor. De är placerade under stolen med tippotentiometern till höger.

Funktion:

spakläge	flygplansrörelse	tippotential	rollpotential
bak	nos upp	positiv	
fram	nos ner	negativ	
höger	roll höger		positiv
vänster	roll vänster		negativ

Spaken skall kunna släppas i nolläge utan att sedan ge utslag. Går inte detta kan fjädrarnas förspänning justeras med respektive fästskruv. Maximalt utslag kan justeras med skruvar som sitter på och i spaken. Dessa är lätt åtkomliga för rollfunktionen men svåråtkomliga för tippfunktionen. En ändring i utslag och/eller nolläget göres i det senare fallet lämpligast på elektrisk väg.

4.22 Pedaler

Sidroderpedalerna ger utsignal i girled. Utsignalen är en potential som anger pedalernas läge. Potentiometerna är friktionskopplad till pedalerna med en lina och är placerad längst fram under instrumentramen.

Funktion:

pedalläge	flygplanrörelse	potentialen
höger fram	nosen är höger	positiv
vänster fram	nosen åt vänster	negativ

Pedalerna skall kunna släppas i nolläget utan att sedan ge utslag. Skulle detta ändå ske kan fjädrarnas förspänning ändras med respektive fästskruv.

Maximalt utslag kan justeras med de stoppskruvar som sitter framför pedalerna.

4.23 Gasreglage

Gasreglaget ger dragkraft som utsignal. Utsignalen är en potential som anger gasreglagets läge. Reglaget består av en skjutpotentiometer placerad till vänster om föraren.

Funktion:

reglaget	flygplanet	potentialen
framåt	farten ökar	ökar
bakåt	farten minskar	minskar

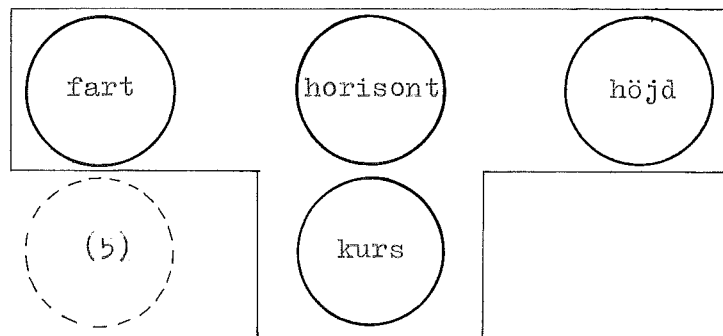
Minsta potential är noll. Reglaget ger således bara positiva utsignaler.

4.3 Instrument

4.31 Instrumentpanel

Instrumenten, som utgör pilotens hela referensram vid flygning i dåligt väder, måste ge en lätt överblickbar information om flygläget.

Det normala förfarandet är att placera de fyra viktigaste instrumenten i ett "T". Horisonten i mitten, kursgyro/kompass därunder, fartmätare till vänster och höjdmätare till höger.



Detta är också placeringen av dessa instrument i simulatorn.

Ett femte instrument (5) är inplacerat under fartmätaren. Detta är en milliampèremeter, graderad från 0 till 1 och representerar i den enkla simulatoruppkopplingen motorvarvtalet.

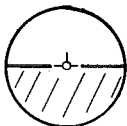
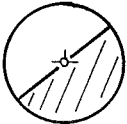
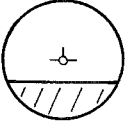
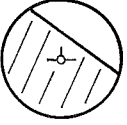
Detta instrument kan användas till att ge annan information om så önskas.

4.32 Horisont

Horisonten utgörs i denna simulatör av ett oscilloskop. Instrumentet är avsett att ge information om attityden, tippvinkeln och om lutningen, rollvinkeln. Tippvinkeln är den vinkel som uppfattas av föraren mellan flygplanssymbolen och horisontlinjen. Rollvinkeln ges direkt av horisontlinjens lutning.

Presentation:

Linjen i oscilloskopet representerar horisontlinjen och flygplanssymbolen det egna flygplanet.

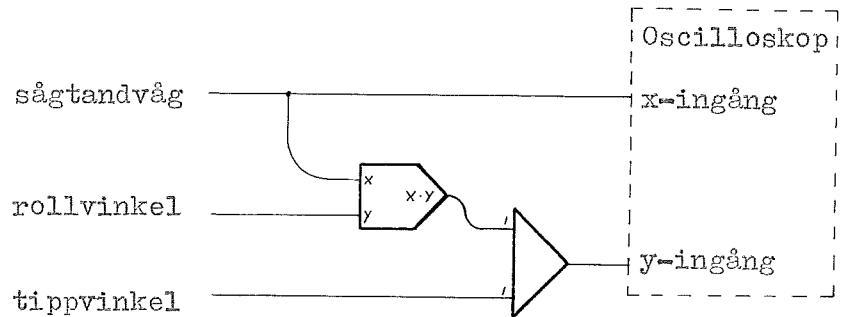
oscilloskopet	flygplanet	tippvinkeln	rollvinkeln
	flyger rakt fram	noll	noll
	svänger höger	noll	positiv
	stiger rakt fram	positiv	noll
	dyker i vänstersväng	negativ	negativ

Vinklarna är definierade enligt avsnitt 5.2 sid-20.

Insignalerna till oscilloskopet utgörs av roll-och tippvinklarna.

Vid stora rollvinklar ger detta en felaktig presentation, men detta är av mindre reell betydelse. Simulatorföraren märker ingen skillnad.

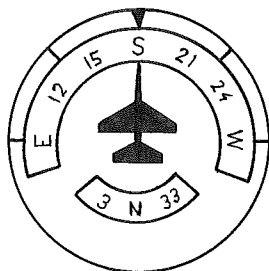
Kopplingsschema för presentation på horisonten.
(Del av analogiuppkopplingen)



Sågtandvågens frekvens ≈ 100 Hz. Lämplig förstärkning i y-led 0,5 V/div .

4.33 Kursgyro

Kursgyrot utgörs av en nedväxlad stegmotor och skall ge information om flygplanets nosriktning i förhållande till marken.

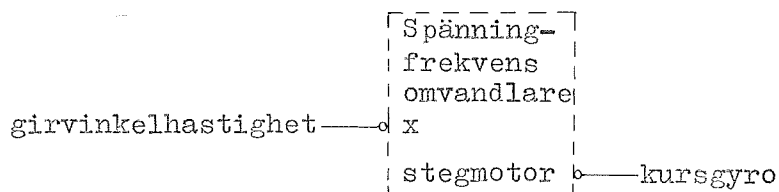


I det ovan illustrerade fallet pekar flygplanets nos rakt söderut, 180° . Om flygplanet svänger 90° åt höger, kommer nosen att peka rakt västerut. Siffrorna på instrumentet representerar tiotals grader. Var trettionde grad är utmärkt.

Stegmotorn roterar $7,5^{\circ}$ för varje erhållen puls. I kursgyrot växlas detta ut 20 ggr, så att det krävs 960 pulser för att rotera gradskivan ett varv. Stegmotorn har en maximal steghastighet på 230 pulser per sekund. Insignalerna ges i form av stegpulser samt en riktingspotential för att styra rotationsriktningen.

Kopplingsschema för styrning av kursgyrot.

(Del av analogiuppkopplingen)



Spännings-frekvens omvandlaren skall vara inställd så att vid ± 10 volt inpotential roterar kursgyrot ett varv på 10 s.

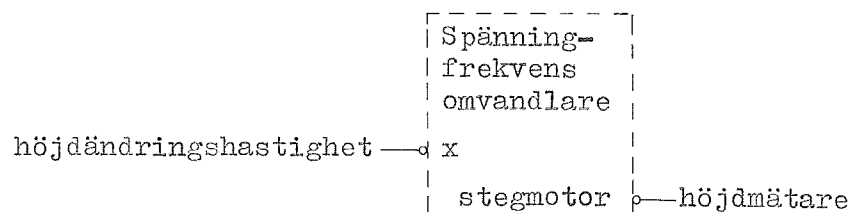
4.34 Höjdmätare

Höjden indikeras på ett modifierat klock-instrument där rotationen åstadkommes av en stegmotor. Höjden som simuleras är en tryckhöjd över en i förväg inställd referensisobar. Denna ställs in med hjälp av vredet på instrumentets framsida och indikeras i en glugg på instrumentets urtavla. Instrumentet visar höjden med två visare. Den långa visaren anger höjden i hundratal meter. Den korta visaren anger höjden i tusental meter.

Stegmotorn går ett $7,5^{\circ}$ steg för varje erhållen puls. I höjdmätaren utväxlas detta 25 ggr så att det krävs 1200 pulser för att indikera en höjändring på 1000 m, ett varv på stora visaren. Motorns högsta steghastighet är 350 pulser per sekund.

Insignaler ges i form av stegpulser samt av en riktningspotential för att styra rotationsriktningen.

Kopplingsschema för styrning av höjdmätaren.
(Del av analogiuppkopplingen)



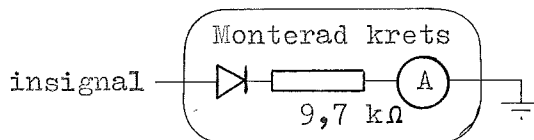
Spänning-frekvensomvandlaren skall vara inställd så att vid ± 10 volt inpotential roterar stora visaren ett varv på 15 sek.

4.35 Fartmätare och varvtalsindikator

Farten och varvtalet indikeras med ampèremetrar graderade mellan 0 och 1.

Insignalen utgörs av en positiv potential, högst 10 V.

Kopplingsschema för fartmätaren och varvtalsindikatorn.

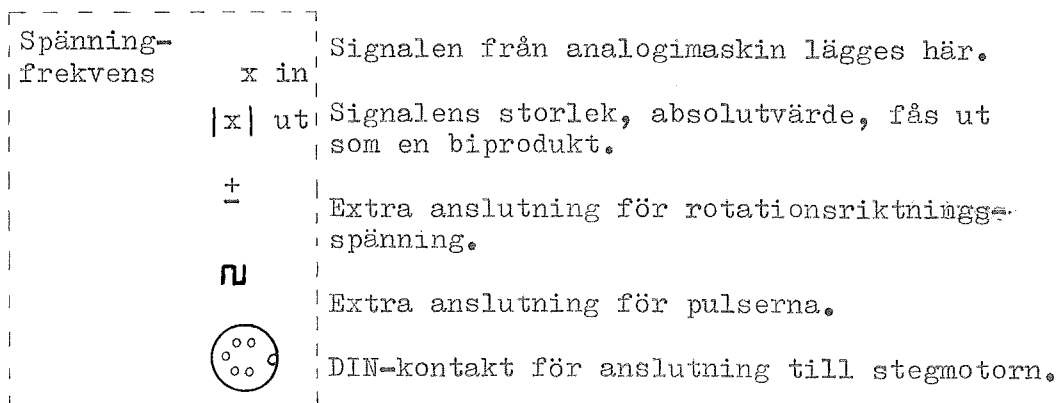


Ampèremetrarnas nominella inre resistans $300\ \Omega$

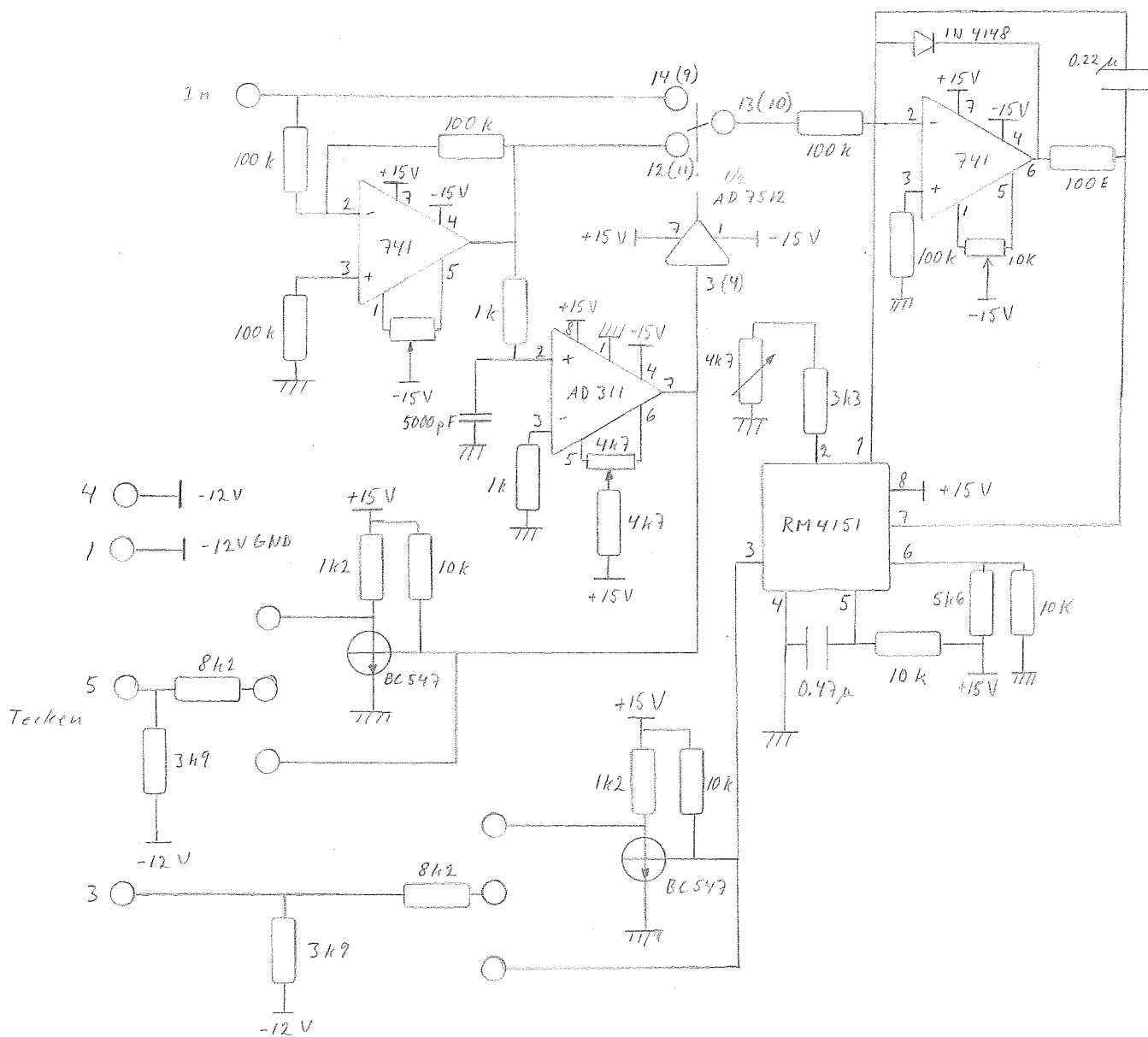
Insignalens maximala potential 10 V.

4.36 Spänning-frekvensomvandlare

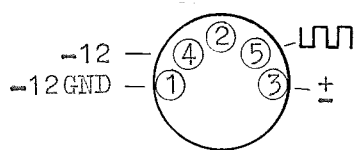
Spänning-frekvensomvandlaren är en anpassningsenhet mellan analogmaskinen och stegmotorn. Analogimaskinens utsignal utgörs av en potential. Stegmotorn kräver dels pulser för att rotera, dels en potential för att bestämma rotationsriktningen. Omvandlaren fungerar så att den anger rotationsriktningen ur tecknet på analogisignalen. Storleken på signalen bestämmer sedan pulshastigheten.



Kopplingsschema för spänning-frekvensomvandlaren.



DIN-anslutningens signaler



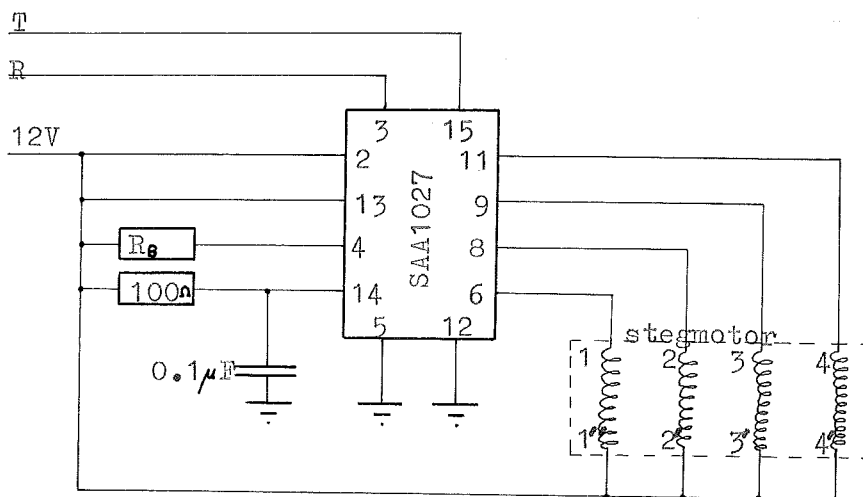
4.37 Stegmotorerna

Kursgyrot och höjdmätaren drivs av stegmotorer. Dessa båda 4-fas enpoliga motorer som styrs av en styrkrets SAA 1027.

Stegmotorn i kursgyrot är av typ 9904 112 04002 och i höjdmätaren av typ 9904 112 07005.

Motor 04002 har en maximal steghastighet på 230 steg/s jämfört med 350 steg/s för motor 07005.

Styrkretsens kopplingsschema.



Där R_B är 470Ω för -04002
resp. 620Ω för -07005

T är insignal i form av pulser

R är insignal i form av rotationsriktningspotential

Styrkretsen är monterad inuti instrumenthylsan, i omedelbar anslutning till motorn. En sladd med DIN-kontakt utgör den enda nödvändiga anslutningen och är avsedd för spänning-frekvensomvandlaren i analogimaskinen.

För närmare data om stegmotorer och styrkrets hänvisas till:

ELCOMA SC5 03-75 för SAA 1027

ELCOMA CM6 09-75 för 9904 112 04002/07005

5 FLYGPLANSMODELLEN

5.1 Flygplanekvationers värde och simulatorns uppgift

Flygplanekvationerna måste anpassas till simulatorm och dess syfte.

Simulatorm kan i stort sett användas till två saker. Att lära folk att flyga och att undersöka flygplanets uppförande och stabilitet i intressanta flygområden.

I det första fallet måste flygplanekvationerna vara giltiga i ett stort flygområde. Det innebär en omfattande uppsättning förhållande och villkor, som dock kan förenklas utan motsvarande förlust i funktion.

Om det är flygplanets och pilotens uppförande och stabilitet som skall undersökas kräver detta noggranna och detaljerade ekvationer i de aktuella flygfällen. Den begränsning som ligger i det valda flygfallet håller simulatorns omfattning nere.

En fullständig flygplanssimulator blir med nödvändighet mycket omfattande både i hårdvara och mjukvara. Kostnaderna blir med nödvändighet mycket stora. Orsaken till att de finns och används är att alternativkostnaden, verklig flygning, är ännu dyrare.

5.2 Den enkla flygplansmodellen, avsedd för analogmaskin

Förverkligandet av flygplanssimulatorn med analogmaskinen kräver drastiska förenklingar av flygplansekvationerna. Dessa enkla ekvationer representerar inget verkligt flygplan. De aerodynamiska egenskaperna ifråga om stabilitet, korskoppling, tröghet etc. återfinnes ej.

De principiella sambanden som modellen avser är:

$$\dot{\theta} = \delta_e \cos \varphi - \delta_r \sin \varphi$$

$$\dot{\varphi} = \delta_a$$

$$\dot{\chi} = \delta_r \cos \varphi + \delta_e \sin \varphi$$

$$\dot{v} = T - v - mg \sin \theta - k |\dot{\chi}|$$

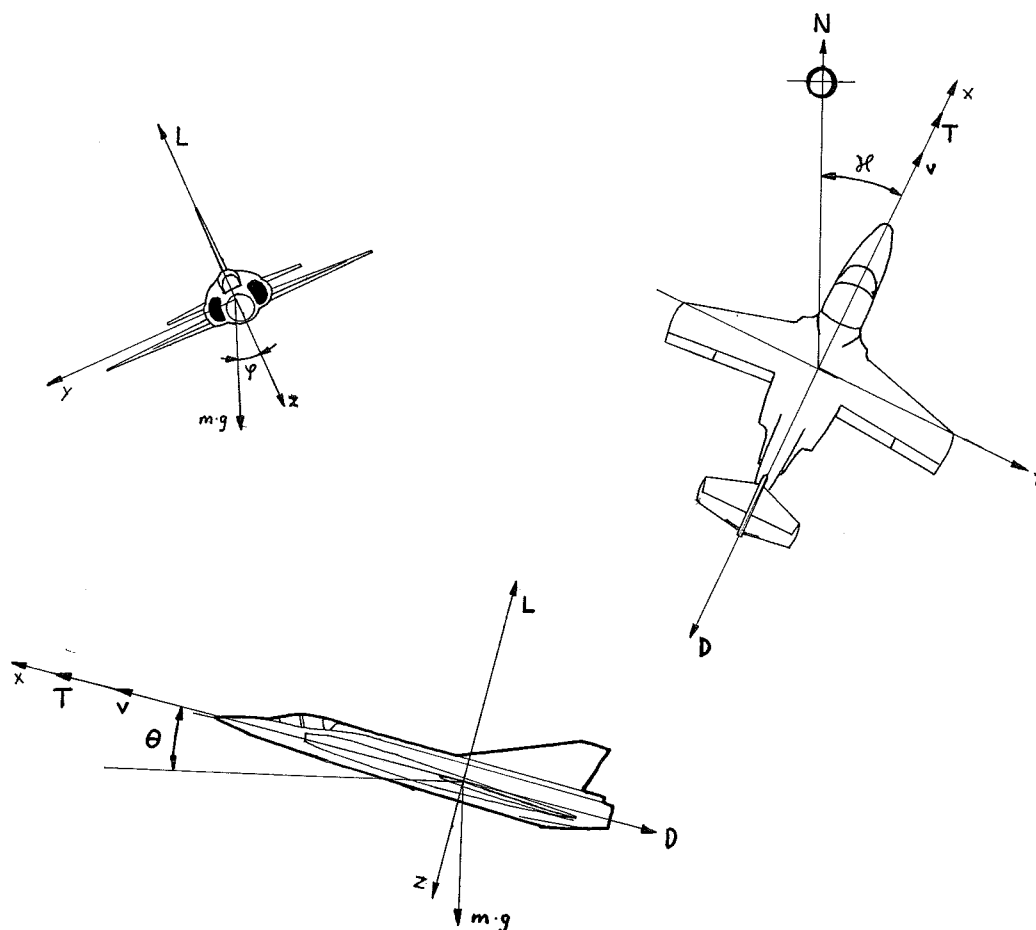
$$\dot{h} = v \sin \theta$$

där

- θ = stigvinkeln
- φ = rollvinkeln
- χ = färdvinkeln
- v = hastigheten
- h = höjden
- δ_e = höjdroderutslaget
- δ_a = skevroderutslaget
- δ_r = sidroderutslaget
- T = dragkraften
- mg = tyngdkraften

för studier av elementära samband hänvisas till:
 Etkin: Dynamics of flights, stability and control.
 John Wiley and Sons, New York 1959 chapt.4.

Miele: Flight Mechanics Theory of flight paths
 Addison-Wesley, Reading, Massachusetts 1962 chapt.8,12.



Insignaler

- u_1 = höjdroderutslag
- u_2 = skevroderutslag
- u_3 = sidroderutslag
- u_4 = dragkraft
- u_5 = trekantvåg ≥ 100 Hz

Tillståndsvariabler

- x_1 = stigvinkel
- x_2 = rollvinkel
- x_3 = färdvinkelhastighet
- x_4 = farten
- $x_5 = \dot{x}_1$ = stigvinkelhastighet
- $x_6 = \dot{x}_2$ = rollvinkelhastighet
- $x_7 = \dot{x}_4$ = acceleration
- x_8 = höjdändringshastigheten
- $x_9 = -0.3|x_3|$ = färdvinkeländringen

Utsignaler

y_1 = signal i y-led till oscilloskopet/horisonten

y_2 = signal i x-led till oscilloskopet/horisonten

y_3 = färdvinkelhastighet

y_4 = höjdändringshastighet

y_5 = fart

y_6 = varvtal

Ekvationerna

$$x_1 = \int x_5$$

$$x_2 = \int x_6$$

$$x_3 = 0.2 u_3 + 5 (0.2 u_1 x_2)$$

$$x_4 = \int 0.05 x_7$$

$$x_5 = 0.2 u_1 - 0.1 u_3 x_2$$

$$x_6 = u_2$$

$$x_7 = u_4 - x_4 - 0.5 x_1 + 0.3 x_9$$

$$x_8 = x_1 x_4$$

$$x_9 = - 0.3 |x_3|$$

$$y_1 = x_1 + x_2 u_5$$

$$y_2 = u_5$$

$$y_3 = - 0.3 x_3$$

$$y_4 = - 5 x_8$$

$$y_5 = x_4$$

$$y_6 = u_4$$

Anm. De införda konstanterna är framtagna empiriskt för att ge en rimlig modell. Vinklarna antages vara små.

6 INSTRUKTION

6.1 Ingående delar

Den enkla flygplanssimulatorn består av följande delar:

- Förarplats med oscilloskop (Philips PM 3200)
- Analogmaskin med åtta OP-moduler
 - två multiplikatormoduler
 - en signalgenerator
 - och en spänning-frekvensomvandlare

6.2 Sammansättning och uppkoppling

6.21 Oscilloskopet

- Oscilloskopet skall ligga uppochnervänt med skärmen inlagd i 'gluggen' på instrumentpanelen.
- Se till att signalen läggs mitt på skärmen i x-led. Förstärkningen i x-led är mindre intressant, signalens amplitud kan justeras på signalgeneratorn. Vit sladd till x-ingången.
- y-Ingången skall vara DC-kopplad. Nollan skall ligga mitt på skärmen. Förstärkningen i y-led skall vara 0.5 V/div . Violet sladd till y-ingången.
- Svart sladd till jorduttaget.
- En figur som representerar det egna flygplanet bör finnas i skärmens centrum.

6.22 Analogmaskinen

- Två analogienheter kopplas samman med en DIN-sladd mellan uttag märkta 'fjärrkontroll' på baksidan. Därmed kan man styra båda enheterna från den ena enhetens kontrolldel.
- Signalerna till och från förarplatsen överföres dels med två sexpoliga anslutningar till 'TP' på enheternas baksida, dels med två DIN-anslutningar för stegmotorerna som kopplas till analogmaskinens framsida. De sexpoliga anslutningarna är inte utbytbara mot varann. Här varnas för felkoppling!

Analogienheterna benämns i fortsättningen 'A' och 'B'. I och med anslutningen av de sexpoliga kontakterna finns följande signaler på kontakterna A-F på enheternas framsida.

AA	höjdroderutslag u_1
AB	skevroderutslag u_2
AC	sidroderutslag u_3
AD	positiv referensspänning +10V
AE	negativ referensspänning -10V
AF	y-ingång på oscilloskopet y_1
BA	varvtal, dragkraft y_6, u_4
BB	x-ingång på oscilloskopet y_2
BC	jord
BD	hastighet y_5
BE	ej ansluten
BF	ej ansluten

Modulpositionerna numreras m1-m12 på varje enhet. Position m1 är överst till vänster, numreringen löper åt höger med udda nummer överst och jämna underst.

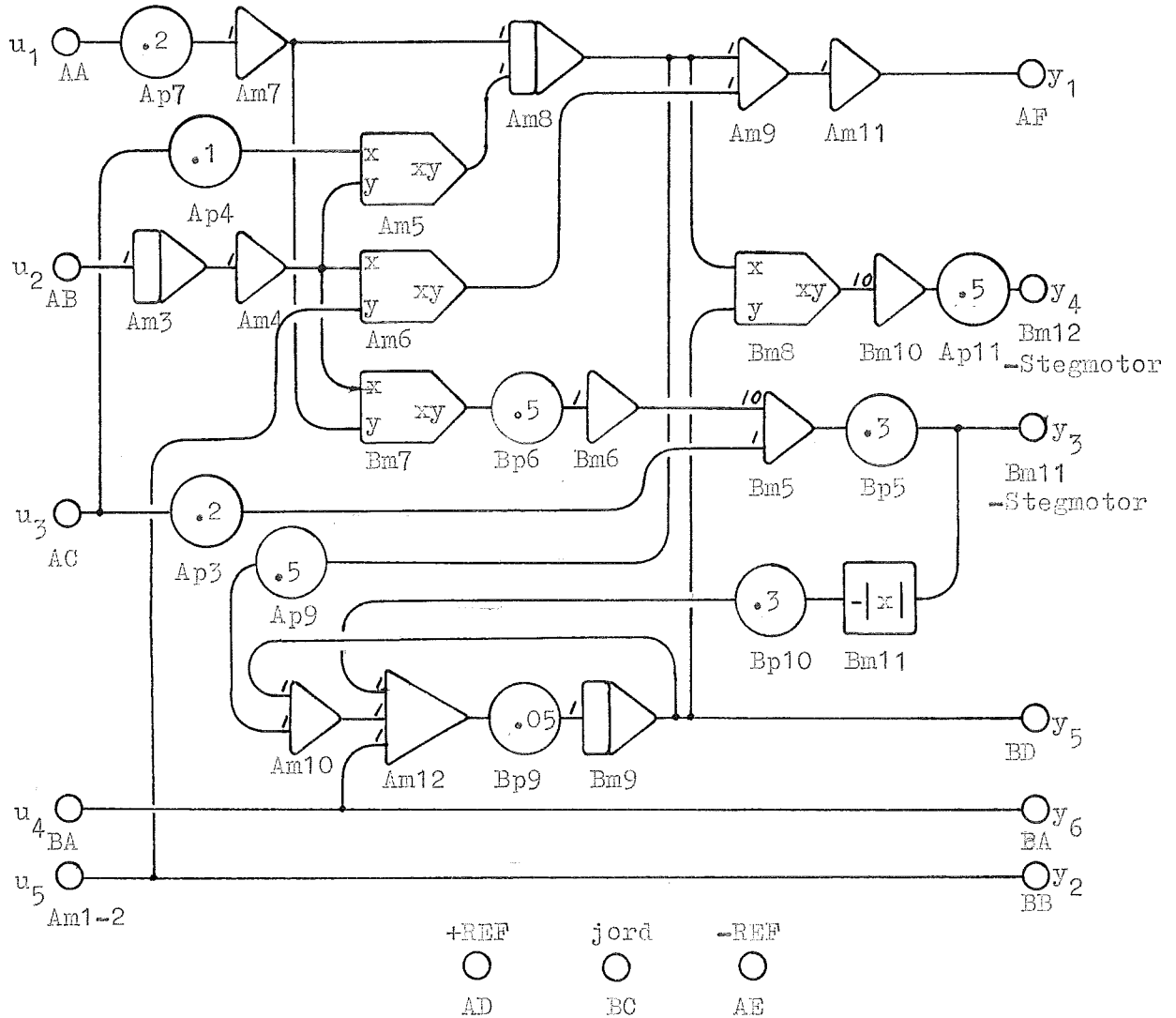
Potentiometrarna numreras också, p1-p12 stigande åt höger.

Här nedan följer ett förslag till uppkoppling av analogmaskinen.

Signalgeneratoren har här placerats i position Am1-2.

Spänning-frekvensomvandlaren har läget Bm11-12.

$-|x|$ är en specialfunktion på omvandlaren, se sid 15.



Efter uppkoppling, ställ in signalgenerators frekvens mellan 100-200Hz. Justera samtidigt amplituden så att svepet täcker oscilloskopskärmen i x-led.

Efter omslag till 'OP' på analogmaskinen är det klart att flyga. Glöm inte att ge gas, annars fungerar varken fart- eller höjdmätaren.

7 SIMULERINGAR

7.1 Uppläggnig

Simuleringarna lades upp som en jämförelse mellan två förare.

Den ena föraren var nybörjare, medan den andre var flygutbildad med flera års flygerfarenhet. Syftet var att utröna vari skillnaden ligger mellan en utbildad och en outbildad förare.

7.2 Simulering 1

7.21 Genomförande

Uppgiften för förarna var att endast ändra höjden från en nivå till en annan och tillbaka igen. Höjden och höjdroderutslaget registrerades.

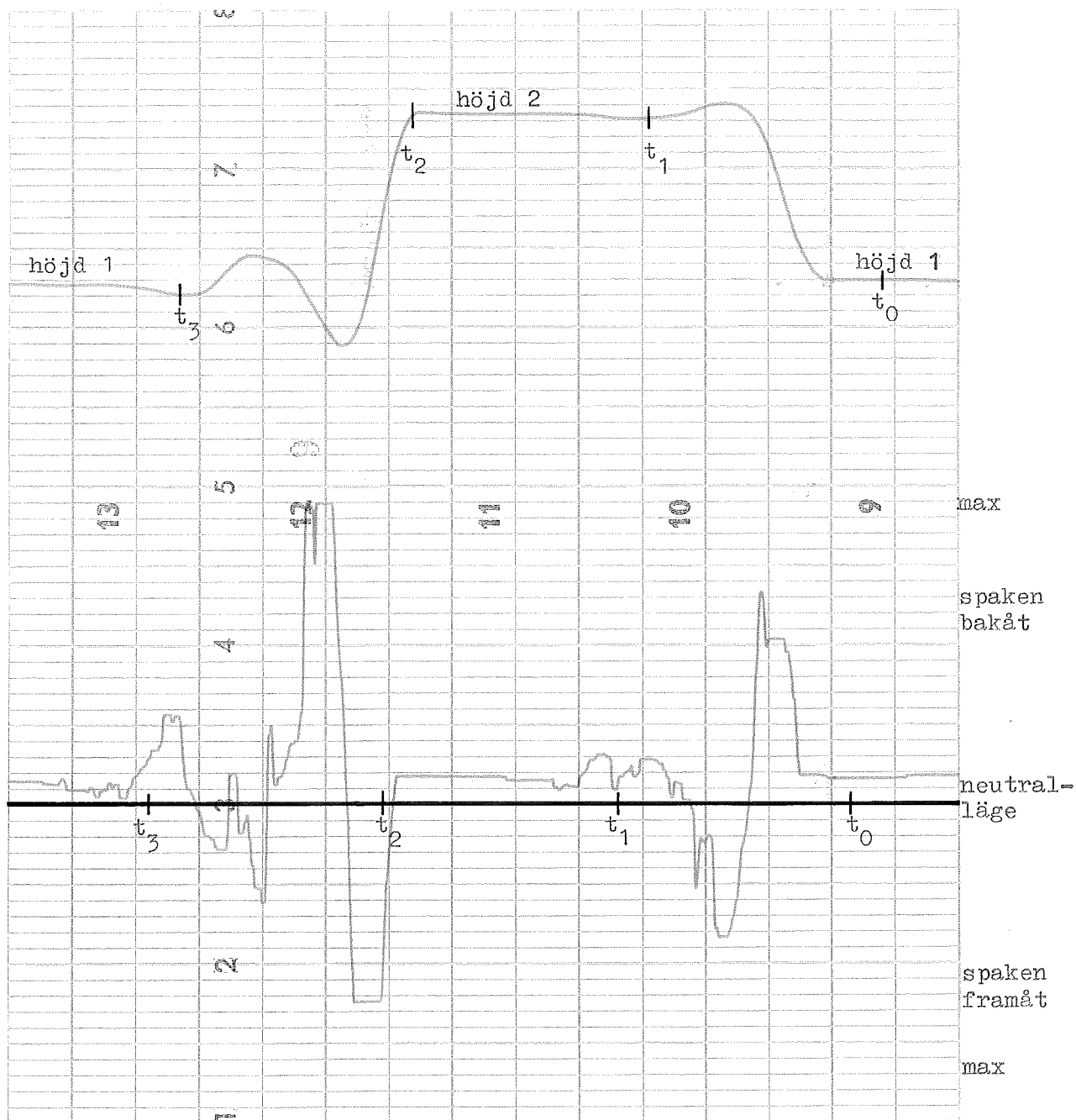
7.22 Resultat

Registreringarna (se sid 26-27) visar att skillnaden mellan förarna ligger i två olika egenskaper.

1. Den oerfarne behåller sina roderutslag under längre tid än den erfarne. Det resulterar i kraftigare flygplansrörelser som är svårare att häva.
2. Motsatt utslag, dvs. för att häva höjdändringen, kommer för sent, vilket resulterar i överslängar. Den erfarne föraren påbörjar hävningsrörelsen innan den avsedda höjden är nådd och använder korta, distinkta roderutslag.

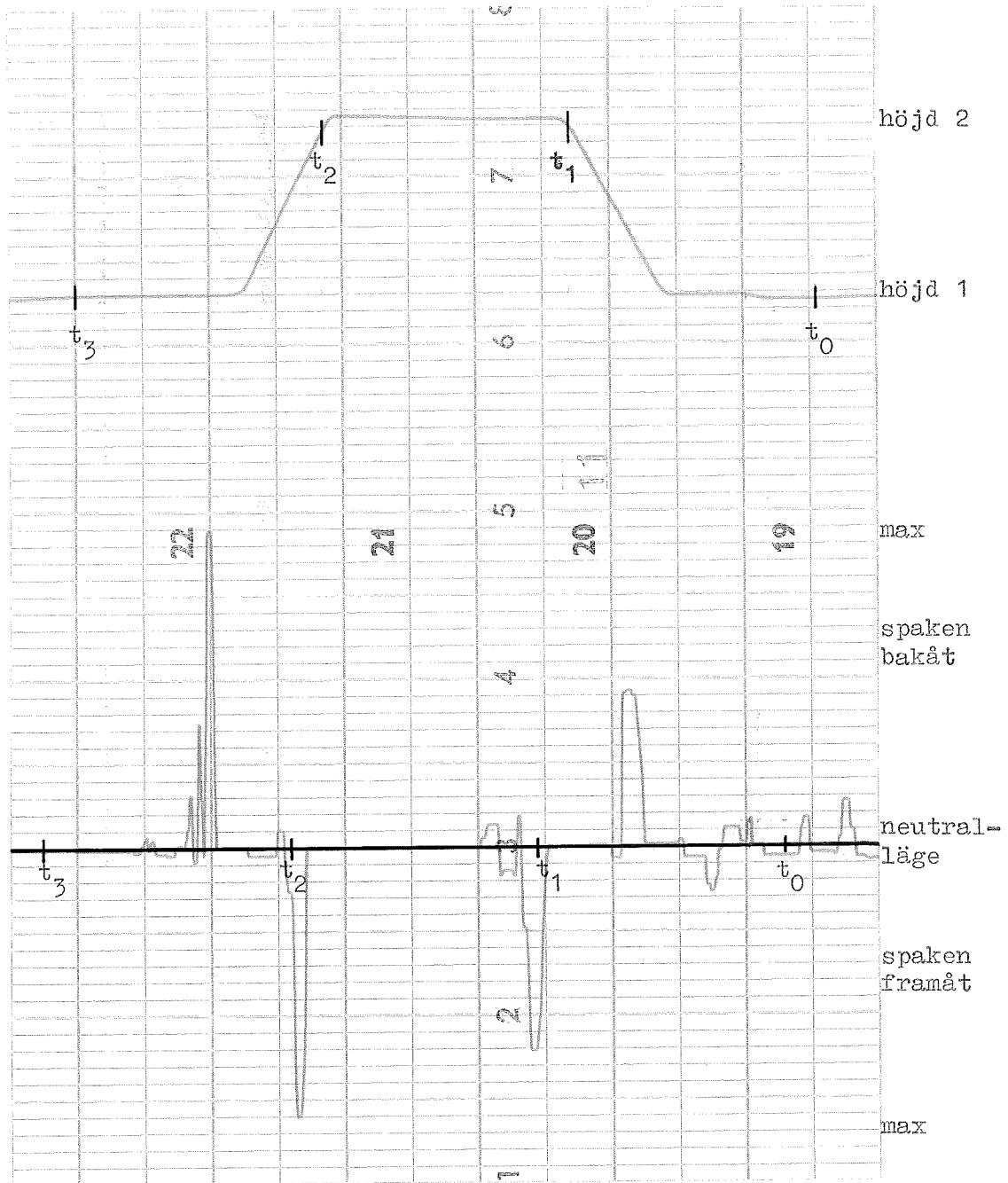
I denna första simulering ses en klar skillnad mellan förarna. Den ena har en kort stigtid med översläng, den andre har längre stigtid men helt utan översläng.

Höjdändringar - Oerfaren förare



Den oerfarne föraren behåller roderutslagen för länge (undre kurvan). Eftersom stigvinkeln integreras upp med roderutslaget blir den stor om utslaget behålles för länge. Den stora stigvinkeln ger snabba höjdändringar som tar lång tid att häva. Därav överslängarna. (övre kurvan).
Kurvorna är tidsförskjutna sinsemellan och är därför försedda med tidsmarkeringar.

Höjdändringar - Erfaren förare



Den erfarna föraren gör korta distinkta roder-
utslag (undre kurvan). Stigvinkeln är mindre,
höjdändringen långsammare. Det går lättare att
häva rörelsen och överslängar saknas helt (övre
kurvan).

7.3 Simulering 2

7.31 Genomförande

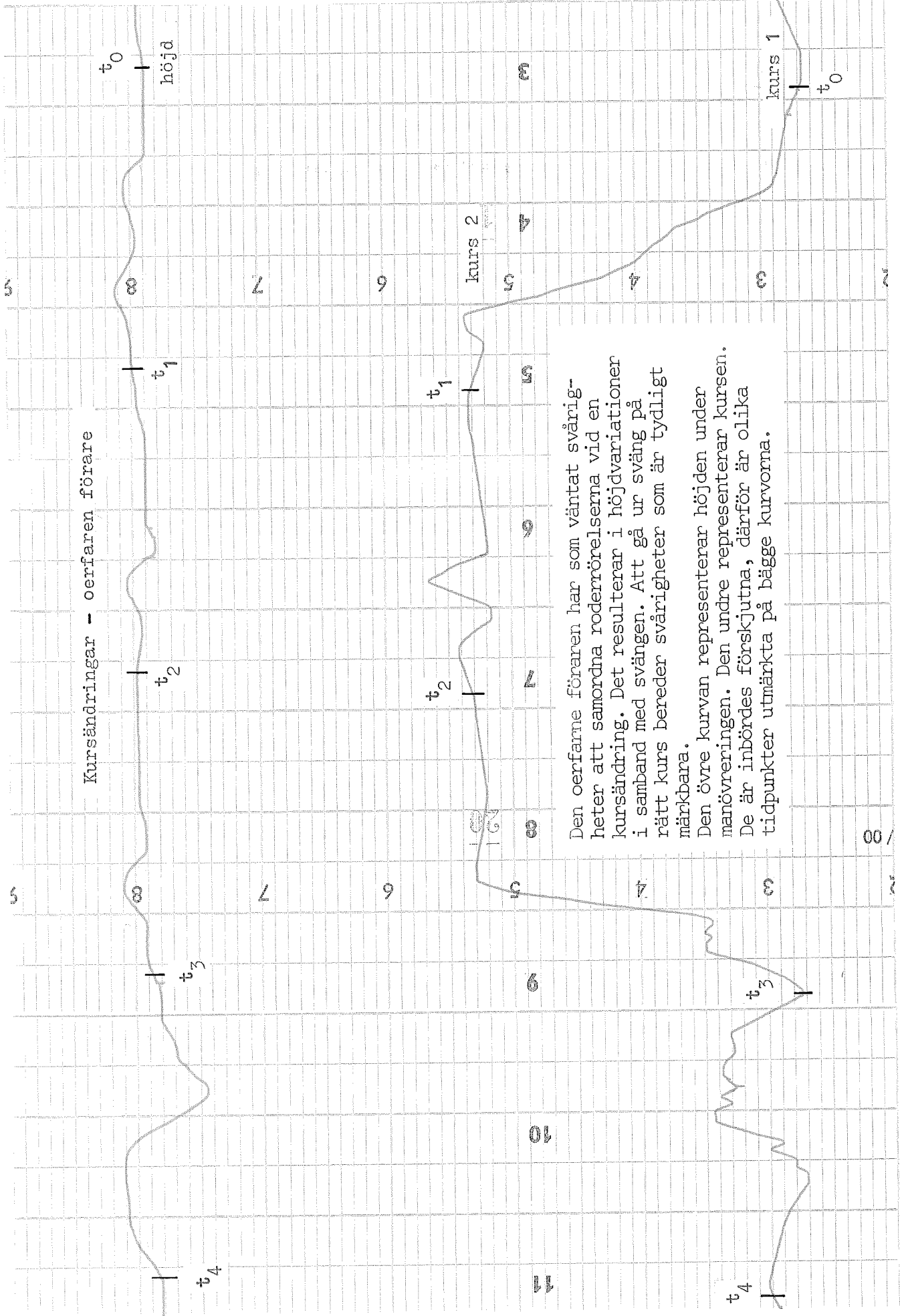
En sväng skall utföras. Nu kommer koordinationsförmågan in eftersom höjden skall hållas konstant. Höjden och kursen registreras.

7.32 Resultat

Ur denna andra simulering kan fås delvis samma resultat som i första simuleringen. I detta fallet skiljer sig dock inte stigtiderna nämnvärt från varandra, men nybörjaren har kvar sina överslängar.

Registreringarna (se sid 29-30) visar också att det är svårt för en nybörjare att sovra bland den information som föraren förses med. De stora kursvariationerna uppträder tillsammans med variationer i höjd.

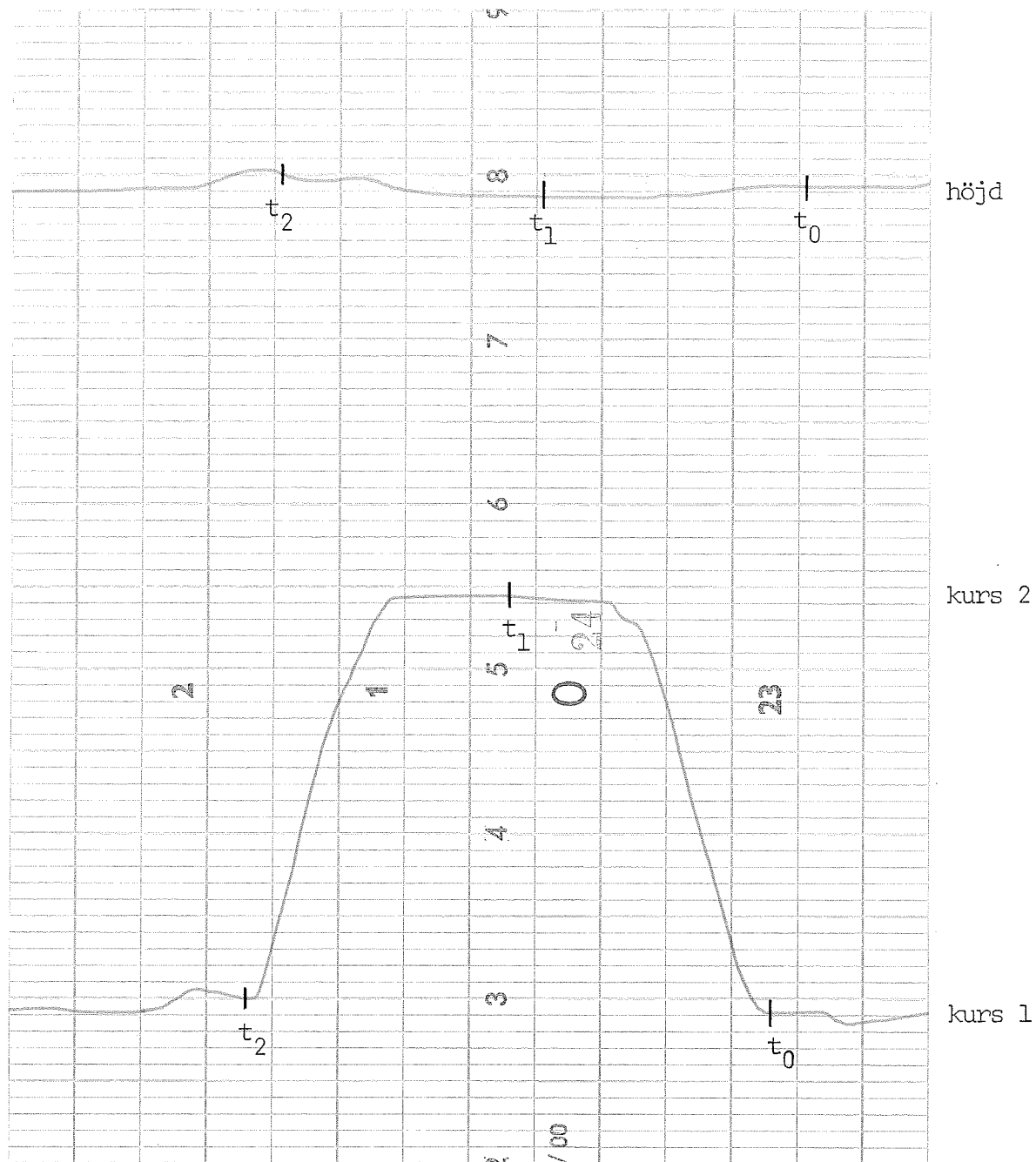
Kursändringar - oerfaren förare



Den oerfarne föraren har som väntat svårigheter att samordna roderörelserna vid en kursändring. Det resulterar i höjdvariationer i samband med svängen. Att gå ur sväng på rätt kurs bereder svårigheter som är tydligt märkbara.

Den övre kurvan representerar höjden under manövreringen. Den undre representerar kursen. De är inbördes förskjutna, därför är olika tidpunkter utmärkta på bägge kurvorna.

Kursändringar - Erfaren förare



Den erfarna föraren har jämn svänghastighet och stabil kurshållning på rakbana. Övergången från sväng till en förutbestämd kurs är mindre säker men saknar överslängar.
Kurvorna är förskjutna sinsemellan varför lika tidpunkter är utmärkta.

8 SLUTSATSER

8.1 Den enkla flygplanssimulatorn

Simuleringarna visade att en utbildad flygförare kan hantera simulatorn bättre än en icke-utbildad. Detta ger stöd åt uppfattningen att simulatorn kan fungera tillfredsställande i det allmänna flygfallet.

Men simulatorn representerar inte något speciellt flygplan och har ingen fullständig ekvationsuppsättning. Den kan därför inte användas till stabilitets- eller prestandaundersökningar.

Simuleringar liknande dem som presenterats i avsnitt 7 borde göras i det fortsatta användandet. Detta för att förarna skall känna större motivering för simulatorn vid flygningarna och spurras till bättre prestationer. Det ger dessutom en helt annan behållning av flygningarna. Förbättringar på modellen kan endast göras i begränsad omfattning pga bundenheten till analogmaskinen. Det som borde införas är manöverhastigheternas beroende av flygplanets hastighet.

8.2 En mer avancerad flygplanssimulator

En mer fullständig modell kan införas om den förverkligas på dator. Den kan då lätt göras upp till att efterlikna ett existerande flygplan. Troligen kan hela flygplansdynamiken simuleras, eftersom en dator har vida större kapacitet än den analogmaskin som används.