TILLÄMPNING AV LINJÄR-KVADRATISK TEORI PÅ KRAFTSYSTEM.

KARL-ERIK OLSSON

MATS ÅKERLUND

RAPPORT RE-94, april 1971

EXAMENSARBETE I REGLERTEKNIK

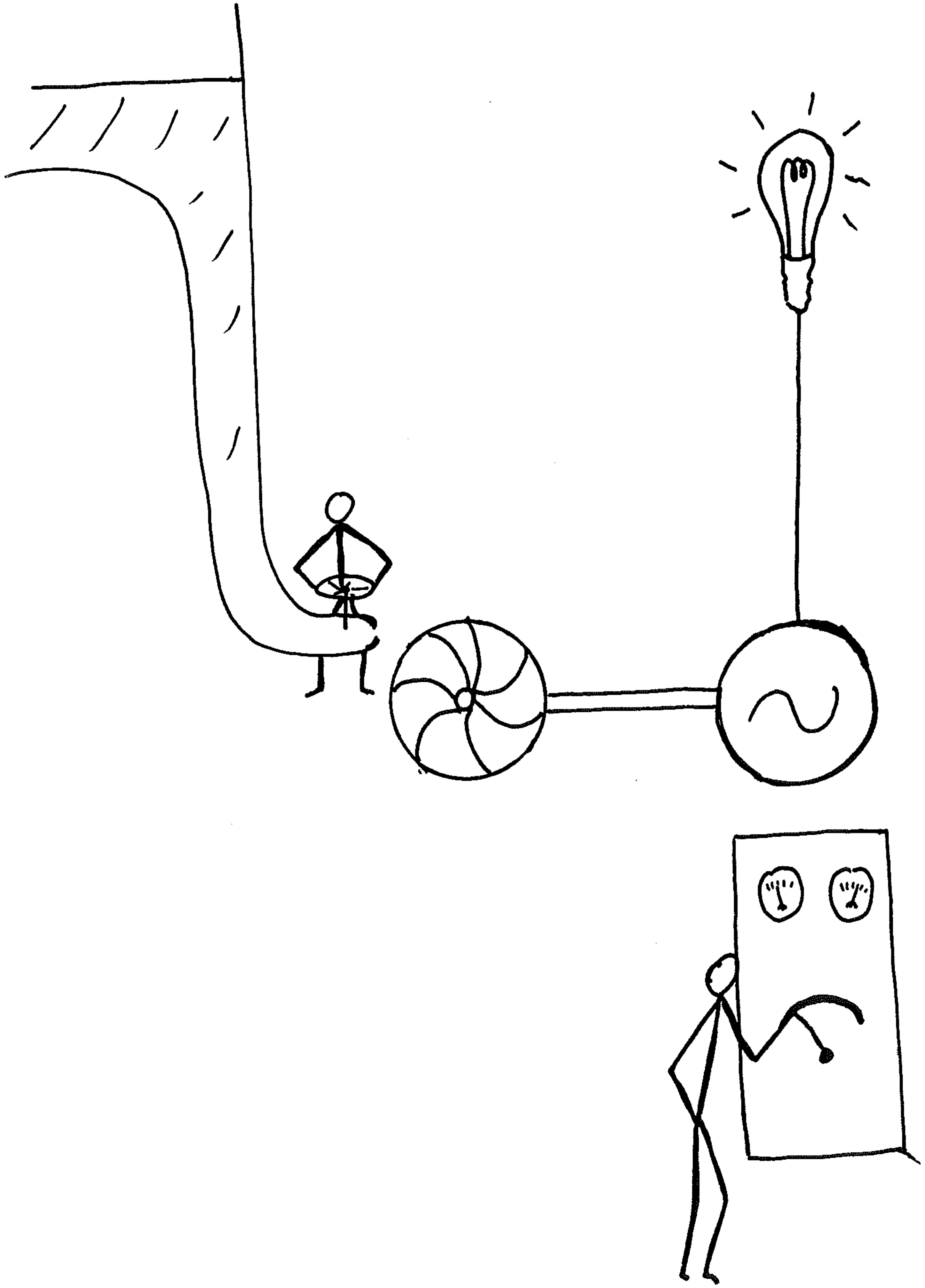
TILLÄMPNING AV LINJÄR-KVADRATISK TEORI PÅ KRAFTSYSTEM

av

KARL-ERIK OLSSON

MATS ÅKERLUND

HANDLEDARE: STURE LINDAHL



INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD

I denna raport förekommer referenser till av institutionen uppgjorda biblioteksprogram,vilka finns lagrade på magnetband.Dessa standard-routiner redovisas ej i detalj,utan ges endast en presentation i form av ett programhuvud,vari innebörden av förekommande parametrar framgår.Dessa programhuvuden står att finna i appendix sid 30-34.
Vi har genom att använda dessa routiner sparat mycket tid och kommit från mycket programmeringsarbete.
Vi vill tacka assistent Sture Lindahl för ett gott samarbete och utmärkt handledning.Utan hans benägna hjälp torde detta verk aldrig ha kommit i tryck.

Lund i mars 1971

Författarna

Abstract

A power-system consisting one synchronous machine with voltage and speed regulation, connected to an infinite bus through a transmission line, is studied.

The system is modeled by eight first order nonlinear differential equations. The equations are linearized and an optimal time-invariant control law is determined by using the linear model and a quadratic costfunction of the following form:

$$J = \frac{1}{2}\int_0^{\infty}((X^T Q_1 X) + (U^T Q_2 U))\, dt$$

The matrices Q_1 och Q_2 are adjusted heuristicly in order to obtain good transient response.

The control law is then applied to both the nonlinear and the linear systemmodel. The system responses are investigated when the generator power output is changed from one constant value to another. It is also investigated when the linearized model can be considered as a good approximation of the nonlinear system.

The results are also compared with the performance of a regulator which contains feedback from a few states only.

Sammandrag

Ett kraftsystem bestående av en synkronmaskin med spännings- och varvtalsreglering, ansluten till ett starkt nät via en överföringslinje, studeras.

Systemet beskrivs av åtta stycken olineära första ordningens differentialekvationer. Ekvationerna lineariseras och en optimal, tidsinvariant styrlag bestämmes genom att använda den lineära modellen och en kvadratisk förlustfunktion av följande form:

$$J = \frac{1}{2}\int_0^\infty ((X^T Q_1 X) + (U^T Q_2 U))\, dt$$

Matriserna Q_1 och Q_2 justeras heuristiskt, för att erhålla ett bra insvängningsförlopp.

Styrlagen provas sedan på både den olineära och den lineära modellen. Systemets reaktion undersökes då generatorns uteffekt ändras från ett konstant värde till ett annat. Här undersökes också när man kan betrakta den lineära modellen som en bra approximation av den olineära.

Resultaten jämföres också med uppförandet hos en regulator som innehåller återkoppling från endast några få tillstånd.

REFERENSER

YU, VONGSURIYA and WEDMAN:
Application of an Optimal Control Theory to a Power System.

BRYSON, HO:
Applied Optimal Control.

ATHANS FALLS:
Optimal Control.

MÅRTENSSON:
Linear quadratic control pacage. Part 1 - The continous problem.
Suboptimal linear regulators for linear system with known
initial-state statistics.

TILLÄMPNING AV LINEÄR-KVADRATISK TEORI PÅ KRAFTSYSTEM.

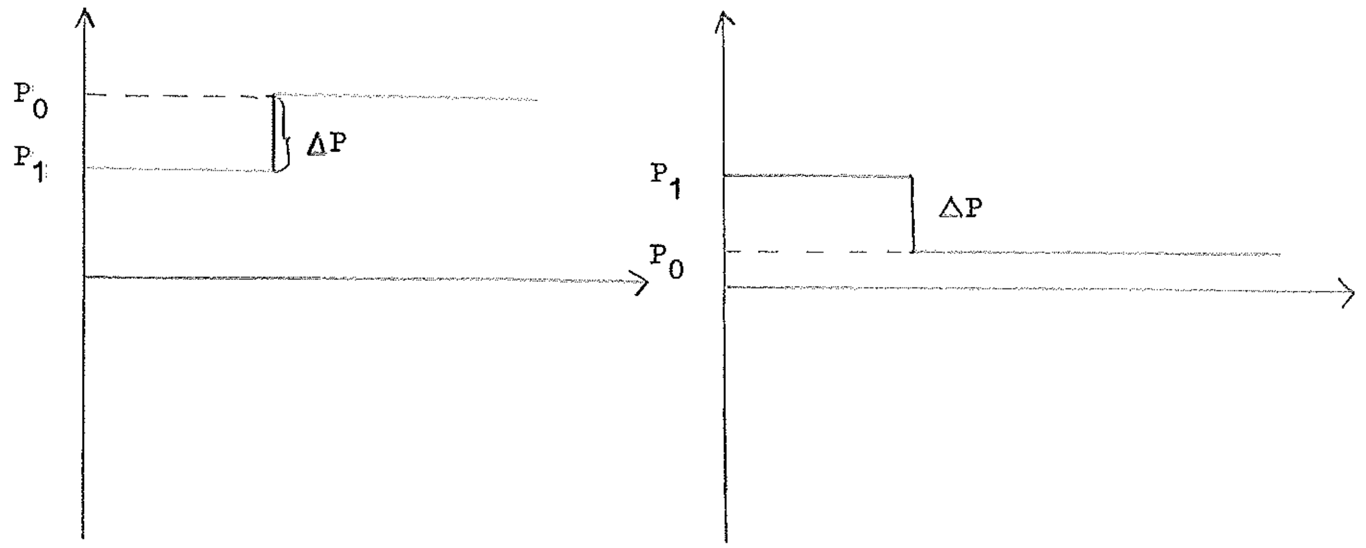
INLEDNING:

Vi har ett dynamiskt system bestående av en synkrongenerator driven av en vattenturbin,dvs ett kraftaggregat.I detta dynamiska system innefattar vi tillsvidare även aggregatets reglersystem.Aggregatet är via en transmissionsledning anslutet till ett starkt nät,varmed vi avser ett nät vars spänning och frekvens kan anses vara konstant.Praktiskt betydder detta att aggregatet samköres med andra aggregat,dvs ingår i ett större kraftsystem.

I detta större kraftsystem förekommer belastningsvariationer av olika karaktär. De stora och som regel även långsamma belastningsvariationerna följer en dags- eller årsrytm, som med ganska stor säkerhet kan förutsägas. Anpassningen till dessa stora förändringar sker genom att hela aggregat tages i eller ur drift. På dessa stora variationer finns emellertid mindre och snabbare belastningsändringar överlagrade. De av dessa belastningsändringar framkallade variationer i systemets inre tillstånd utregleras med hjälp av de olika aggregatens reglersystem. Dessa aggregat måste då utföra ett reglerarbete. Man försöker då ofta medvetet koncentrera reglerarbetet till vissa hörför lämpliga aggregat och försöker hålla andra helt utanför reglerförloppet.

Vi tänker oss följande situation;

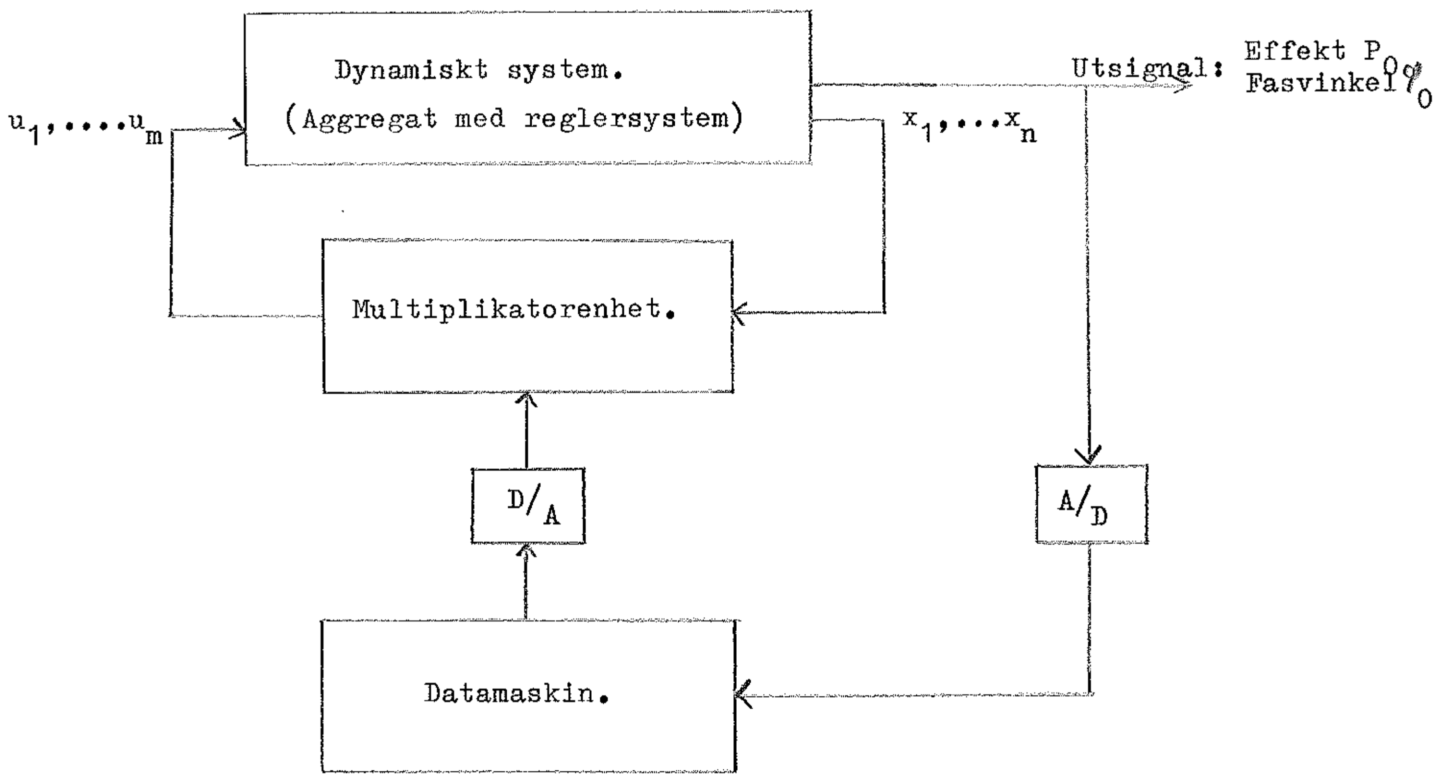
Vi har ett aggregat som i ett stationärt tillstånd lämnar en viss aktiv effekt P_1 till nätet vid en viss fasförskjutning φ_1 mellan spänning och ström på generatorns klämmor. Det antages nu föreligga behov för en ändring av den till nätet utmatade effekten, d v s vi ändrar uteffekten med ett språng till P_0 och fasvinkelen till φ_0 (Se fig)



$$\Delta P = P_0 - P_1$$

Mot dessa nya värden på utmatad effekt och fasvinkel svarar nu andra stationära jämviktsvärden på aggregatets inre tillstånd. Vid denna störning av den ursprungliga jämvikten i systemet startas således ett insvängningsförlopp, varvid alla tillståndsvariablerna börjar att svänga in sig mot nya stationära jämviktsvärden, bestämda av P_0 och φ_0.

Vår avsikt är nu att reglera detta insvängningsförlopp på så sätt att vi utgående från P_1, φ_1 och P_0, φ_0 skall bestämma en lämplig styrlag utifrån vissa kriterier. Styrlagen kommer att vara helt bestämd av värdena på P_0 och φ_0, d v s den effekt och fasvinkel som bestämmer systemets sluttillstånd, och dessa värden kommer således att vara utgångspunkt för beräkningarna. Vi tillämpar en datamaskinstyrd reglerprocedur enligt följande blockschema.



Vid inställningen av de nya värdena P_0 och φ_0 skickas dessa in i datamaskinen i digital form. Man kan sedan tänka sig två alternativa tillvägagångssätt för den fortsatta proceduren.

1. Utgående från P_0 och φ_0 beräknas en styrlag på kommando av ett i datamaskinen lagrat maskinkodat program.
2. Utgående från P_0 och φ_0 plockas en på förhand beräknad styrlag fram ur datamaskinens minne.

Ur snabbhetssynpunkt torde alternativ 2 vara fördelaktigast, och det är även detta vi tänker tillämpa.

Nu kan ju emellertid oändligt många kombinationer av P_0 och φ_0 göras, så vi får begränsa antalet styrlagar på så sätt att vi delar in effekt- och fasvinkelintervallet i ett antal intervall inom vilka en och samma styrlag får gälla. Vi kommer längre fram att diskutera hur vi skall göra denna intervallindelning. Styrlagen ligger lagrad i form av en matris L. Elementen i denna matris omvandlas till analoga signaler och skickas sedan till en multiplikationsenhet där styrlagen $u = -Lx$ bildas kontinuerligt. Man kan även tänka sig att datamaskinen utför multiplikationen. Vi får då ett samplat system, där mätningarna av tillstånden $x_1, x_2, \ldots\ldots, x_n$ och beräkningen av $u = -Lx$ sker i vissa punkter, d v s vi får ett samplingsintervall mellan två succesiva avläsningar och beräkningar.

Vi skall välja styrlagen enligt linjär- kvadratisk teori. Vi vill alltså ha en styrlag på den lineära formen $u = -Lx$, som medför en minimering av en kvadratisk form med utseendet $\int_0^T ((x^T Q_1\ x) + (u^T Q_2\ u))dt$ där Q_1 och Q_2 är symmetriska matriser.

Vi kan redan nu avslöja att vi kommer att arbeta med en 8-dimensionell tillståndsvektor och en 2-dimensionell styrvektor. Vi får alltså två styrsignaler på formen:

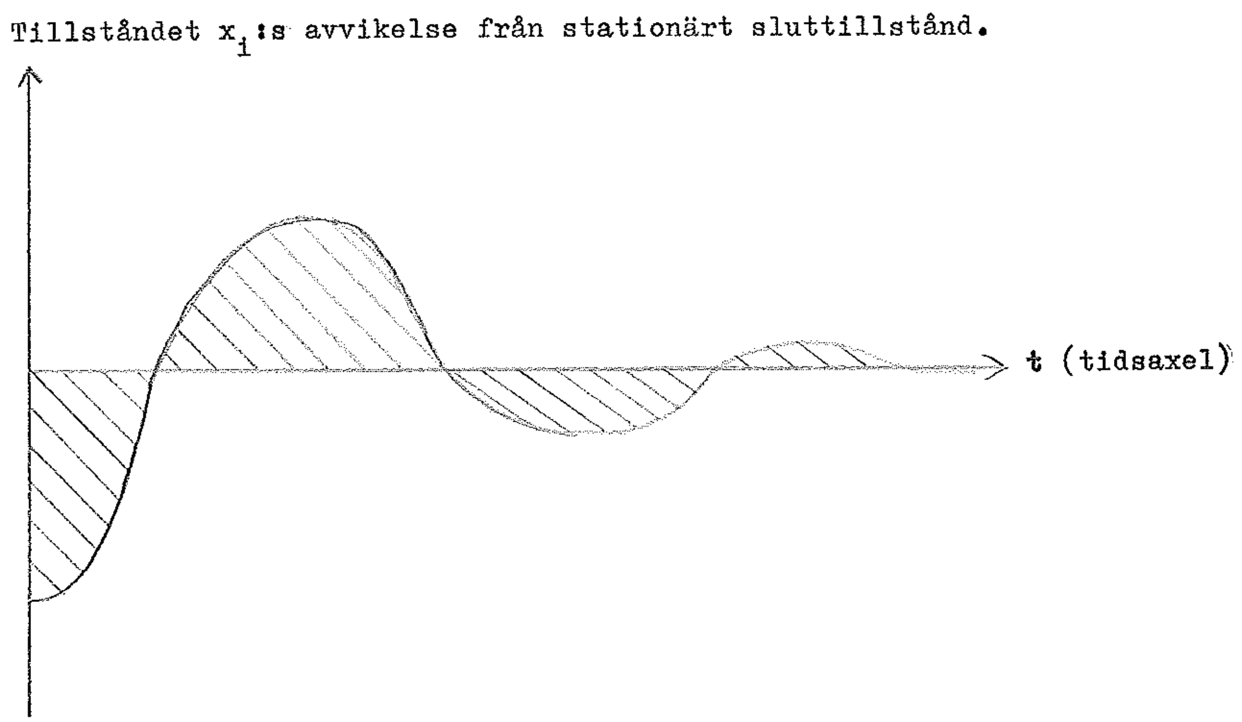
$$u_1 = -(l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots + l_{18}x_8)$$

$$u_2 = -(l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \ldots\ldots\ldots\ldots + l_{28}x_8)$$

Dessa styrsignaler skall påverka dels generatorns fältspänning och dels turbinens pådrag via de i systemet ingående reglersystemen (servosystem och stegmotorer).

Vad innebär nu detta val av styrlagen?

Vi betraktar ett av de inre tillståndens insvängningsförlopp, varvid detta antages förlöpa enligt figuren nedan.



Alla tillståndsvariabler väljes som avvikelser från de stationära sluttillstånden, till vilka insvängningen skall ske. Ordinatan i origo, d v s det begynnelsevärde från vilket insvängningen startar motsvarar alltså skillnaden mellan tillståndet x_i:s stationära värden vid de båda jämviktsfall då aggregatet lämnar effekten P_1 (φ_1) respektive P_0 (φ_0). Vi ser att integralen $J = \int_0^T ((x^TQ_1x) + (u^TQ_2u))dt$ blir ett mått på alla tillstånds samt styrsignalers sammanlagda "summerade" avvikelser från de slutliga stationära jämviktslägena, d v s ett mått på summan av den i figuren ovan sträckade ytan för alla tillstånd och styrsignaler. Vi ser att vi genom att minimera denna integral dels kan förhindra förstora amplituder på svängningen samt dels att förhindra att svängningen pågår under långa tidsintervall.
Man kan säga att minimeringen av J är det sammas som att minimera systemets energi eller reglerarbete.
Det idealiska vore att få ett insvängningsförlopp liknande det i figuren nedan för alla tillstånden,

men detta torde vara ganska svårt att uppnå eftersom minimeringen sker "kollektivt" för alla tillstånden och ej för ett och ett. Vi kan emellertid genom lämpligt val av matrisen Q_1 "bestraffa" vissa tillståndsavvikelser mer än andra. Mer om detta val längre fram.

Ur systemekvationerna kommer att framgå att systemet är olinjärt. Vi skall sedan styrlagen är bestämd simulera dels det olinjära systemet samt dels en linjär approximation till detta. Vi skall också jämföra resultatet med en konventionell styrning.

TEORI

Givet ett system, som beskrives av ett antal differentialekvationer:

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1(x_1,x_2,\dots\dots\dots,x_n,u_1,u_2,\dots\dots\dots,u_m,t)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1,x_2,\dots\dots\dots,x_n,u_1,u_2,\dots\dots\dots,u_m,t)$$

$$\vdots$$

$$\frac{dx_n}{dt} = f_n(x_1,x_2,\dots\dots\dots,x_n,u_1,u_2,\dots\dots\dots,u_m,t)$$

eller i kompakt form

$$\frac{dx}{dt} = f(x,u,t)$$

där tillstånden beskrives av den n-dimensionella storheten $x=(x_1,x_2,\dots\dots,x_n)$ och styrvariablerna av den m-dimensionella storheten $u=(u_1,u_2,\dots\dots,u_m)$.
Vid införandet av tillståndsvariabler och uppställandet av tillståndsekvationerna ur de fysikaliska lagar, som gäller för systemet, kommer man oftast fram till olinjära funktioner $f_1,f_2,\dots\dots,f_n$.
För att kunna tillämpa den väl utvecklade teorin om linjära system brukar man använda sig av en approximativ modell, på så sätt att man linjäriserar de olinjära funktionerna kring en stabil jämviktslösning, $x_0(t),u_0(t)$ och betraktar små störningar kring detta jämviktsläge. Vid linjäriseringen Taylorutvecklas funktionerna $f_1,f_2,\dots\dots,f_n$ kring jämviktslösningen, varvid termer av andra och högre ordningen försummas.
Då erhålles:

$$\frac{d}{dt}(x-x_0) = f_x(x_0,u_0,t)(x-x_0) + f_u(x_0,u_0,t)(u-u_0)$$

där

$$f_x(x_0,u_0,t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots\dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots\dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots\dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} = A$$

$$f_u(x_0,u_0,t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \cdots\cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \cdots\cdots & \frac{\partial f_2}{\partial u_m} \\ \vdots & & & \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \frac{\partial f_n}{\partial u_2} & \cdots\cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \end{bmatrix} = B$$

De linjäriserade ekvationerna kan då skrivas på formen:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$$

där nu tillståndsvektorn x beskriver avvikelserna från de stationära jämviktstillstånden.

Vi vill nu bestämma en styrlag för systemet. Denna styrlag bestämmes ur den linjära modellen och appliceras sedan på det olinjära systemet. Styrlagen bestämmes så att den minimerar en förlustfunktion av formen:

$$J = \frac{1}{2}\int_0^T ((x^T Q\ x) + (u^T R\ u))dt$$

Denna förlustfunktion väljes genom att välja matriserna Q och R. Genom detta val bestämmes hur de olika tillståndens avvikelser från den stationära jämviktslösningen skall påverka styrlagen. Man kan med andra ord "bestraffa" olika tillstånds avvikelser olika genom valet av Q och R.

Det matematiska problemet att minimera J finns beskrivet i reglerteknisk litteratur och skall här endast i korta ordalag beskrivas:
Först införes en vektor p och en matris H enligt

$$H = \tfrac{1}{2}(x^T Q\ x) + \tfrac{1}{2}(u^T R\ u) + p^T(Ax + Bu)$$

För optimal styrning skall p och x vara lösning till

$$\dot{x} = \frac{\partial H}{\partial x} \quad , \quad \dot{p}^T = -\frac{\partial H}{\partial x}$$

vilket leder till:

$$\dot{p} = -Qx - A^T p$$

Även $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ skall gälla vilket ger

$$u = -R^{-1}B^T p$$

Genom att ansätta:

$$p = Kx$$

blir den optimala styrningen

$$u = R^{-1}B^{T}Kx$$

där K satisfierar

$$\dot{K} = -A^{T}K - KA + K^{T}BR^{-1}B^{T}K - Q$$

den s k Ricoati-ekvationen.
Vi skall syssla med ett tidsinvariant system, dvs A,B och K är konstanta och vi får:

$$-A^{T}K - KA + K^{T}BR^{-1}B^{T}K - Q = 0$$

Systemekvationerna med den optimala styrningen blir:

$$\frac{dx}{dt} = (A - BR^{-1}B^{T}K)x$$

där alltså K är lösning till Ricatti-ekvationen.

Vi kan definiera arbetet i stort genom följande poster.

1. Ur de olinjära differentialekvationerna

   $$\frac{dx}{dt} = f(x,u)$$

   bestämmes en linjär modell

   $$\dot{x} = Ax + Bu$$

   varvid linjäriseringen sker kring olika stationära jämviktslösningar.

2. Matrisen A:s egenvärden bestämmes, varav slutsatser kan dragas angående systemets stabilitet och snabbhet.

3. Förlustfunktionen bestämmes genom val av matriserna Q och R.

4. Ricatti-ekvationen löses.

5. Den framtagna styrlagen appliceras på det olinjära systemet

   $$\frac{dx}{dt} = f(x,u)$$

   och systemet simuleras.

6. Den framtagna styrlagen appliceras på den linjära,approximerade modellen $\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$, och detta system simuleras.Jämförelse göres med punkt 5,varvid approximationens giltlighet undersökes.

7. Jämförelse göres även med konventionell reglering.

Systemekvationerna för kraftsystemet.

Det system, som skall undetsökas består av en synkronmaskin med utpräglade poler, driven av en turbin. Synkronmaskinen är kopplad till ett starkt nät (konstant spänning och frekvens) via en transmissionslinje.

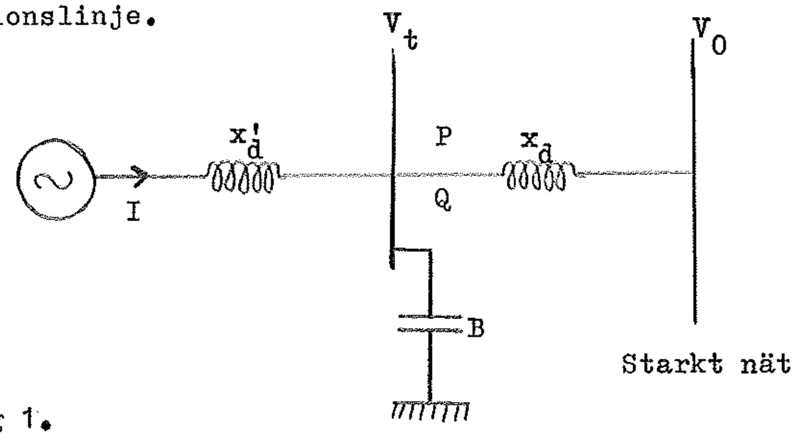


Fig 1.

Vi gör först en förteckning över använda storheter:

0 efter beteckningen betecknar initialtillstånd (stationärt tillstånd)

' " " " avvikelse från initialtillstånd.

Systemparametrar:

Beteckn. i formler	Beteckn. i program	Storhet
B	B	Linjens susceptans
x	XL	Linjens impedans
D	D	Dämpningskoefficient
M	H	Systemets tröghetskonstant
x_d	XD2	Synkron reaktans i d-riktning
x_q	XQ0	Synkron reaktans i q-riktning
x'_d	XD0	Transient reaktans i d-riktning
X_d	XD	$X_d = (1-xB)x_d + x$
X'_d	XD1	$X'_d = (1-xB)x'_d + x$
X_q	XQ1	$X_q = (1-xB)x_q + x$
τ'_{d0}	TDO	Fältets tomgångstidskonstant
τ_e	TE	Fältlindningens tidskonstant
τ_s	TS	Spänningsregulatorns tidskonstant
τ_g	TG	Tidskonstant hos turbinens ledskenor
τ_w	TW	Vattnets tidskonstant
τ_a	TA	Mekanisk tidskonstant hos regulatorn till turbinen
μ_e	YE	Magnetisk förstärkning (se fig 2)
μ_s	YS	Se fig 2
μ_a	YA	Se fig 3
σ	SIGMA	Ledskenornas lutning

Variabla storheter:

Beteckn. i formler	BetecKn i program	Storhet
P_i		Inmatad mekanisk effekt
P_e		Elektromekanisk effekt
P	P (PO)	Utmatad aktiv effekt
Q	Q (QO)	Utmatad reaktiv effekt
V_0	U	Nätspänning
V_t	VT (VTO)	Generatorns klämspänning
V_d	VD (VDO)	d-komponent av generatorns klämspänning
V_q	VQ (VQO)	q-komponent av generatorns klämspänning
V_F	VF (VFO)	Fältspänning
ψ_F	PSIF (PSIFO)	Sammanlänkat flöde
	DELTA (DELTAO)	Lastvinkeln (radianer)
ω	W (WO)	Synkrona vinkelhastigheten (radianer/sek)
n	HAST	ω'/β (se nedan)
g	G	Turbinpådrag
g_f	GF	Se fig 3
h	HE	Vattentryck
β	BETA	Tidsskalningsfaktor
τ	TAU	Skalad tid ($\tau = \beta t$)

Storheterna är angivna i per-unit dvs normerade till en viss basstorhet.

Som tillståndsvektorn användes $x = (\delta', n, \psi'_F, V'_F, V'_s, g, g_f, h)^T$
Systemekvationerna som framtages ur de elektriska och mekaniska vill-koren för systemet blir då:

$$\frac{d\delta'}{d\tau} = n$$

$$\frac{dn}{d\tau} = \frac{1}{\beta^2 M}\left(((g + 1.5h) - D\beta n) - \left(\frac{V_0 \sin\delta \ \psi_F}{X'_d \tau'_{d0}} + \frac{(x'_d - x'_q)V_0^2}{2\ X'_d\ X_q}\sin 2\delta - P_0\right)\right)$$

$$\frac{d\psi_F}{d\tau} = \frac{V_F}{\beta} - \frac{X_d \psi_F}{\beta\ X'_d \tau'_{d0}} + \frac{(x_d - x'_d)V_0 \cos\delta}{X'_d\ \beta}$$

$$\frac{dV_F}{d\tau} = -\frac{V_F}{\beta\tau_e} + \frac{\mu_e}{\beta\tau_e}(-V'_t - V_s)$$

$$\frac{dV_s}{d\tau} = -\frac{V_s}{\beta\tau_s} + \frac{\mu_s}{\beta\tau_s}\cdot u_1 \qquad \text{(Se fig 2)}$$

$$\frac{dg}{d\tau} = - \frac{\sigma g}{\beta \tau_g} + \frac{1}{\beta \tau_g} \left(- \frac{\beta n}{\omega_0} - g_f \right)$$

$$\frac{dg_f}{d\tau} = - \frac{g_f}{\beta \tau_a} + \frac{\mu_a}{\beta \tau_a} u_2 \qquad \text{(Se fig 3)}$$

$$\frac{dh}{d\tau} = - 2 \frac{dg}{d\tau} - \frac{2}{\beta \tau_w} h$$

Vi har således ett system med en 8-dimensionell tillståndsvektor och en två-dimensionell styrvektor. Styrsignalerna påverkar tillstånden V_s och g_f dvs vi påverkar fältspänning och turbinpådrag med vår styrning.

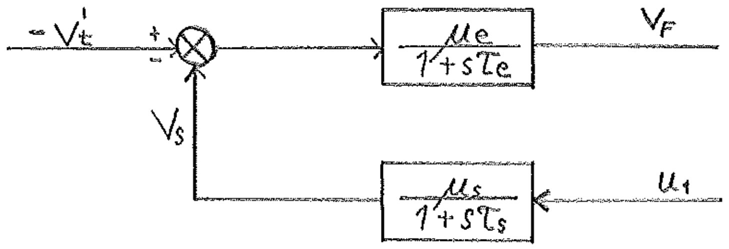


Fig 2: Spänningsregulatorsystemet

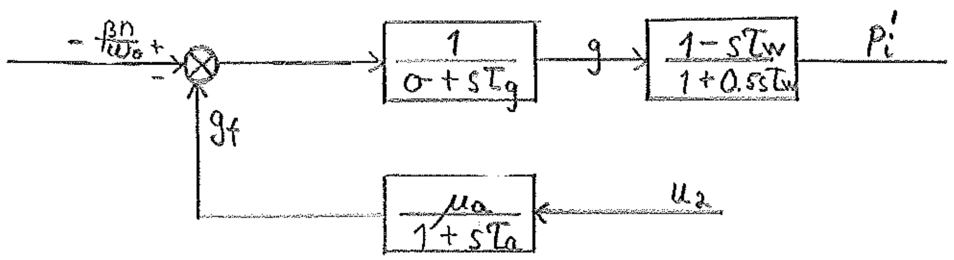


Fig 3: Turbinregulatorsystemet
(s betecknar argumentet vid Laplacetransformering)

1. Linjärisering

Vid linjäriseringen utgår vi från att systemet lämnar en viss aktiv effekt P till linjen vid en viss effektfaktor. Sedan söker vi de stationära tillstånd, som svarar mot detta belastningsfall och mot vilka systemet skall svänga in sig efter en störning.

Det gäller:

$$P_0 = \frac{V_0 \sin \delta_0 \, \psi_{F0}}{x_d' \, \tau_{d0}'} + \frac{(x_d - x_q) V_0^2}{2 \, x_d' \, x_q} \sin 2\delta_0 \qquad (1)$$

$$Q_0 = \frac{V_0 \, \psi_{F0}}{x_d' \, \tau_{d0}'} \cos \delta_0 - V_0^2 \left(\frac{x_d' \sin^2 \delta_0 + x_q \cos^2 \delta_0}{x_d \, x_q} + \frac{x}{x_d x_q (1-Bx)} - \frac{B}{1-Bx} \right) \qquad (2)$$

Vi har givet en viss effektfaktor $\quad \cos\varphi_0 = \dfrac{P_0}{\sqrt{P_0^2 + Q_0^2}}$

dvs $\quad Q_0 = \pm \dfrac{P_0 \sqrt{1-\cos^2\delta_0}}{\cos\delta_0}$

Multiplicera (1) med $\cos\delta_0$ och (2) med $\sin\delta_0$

$$P_0 \cos\delta_0 = \frac{V_0\,\psi_{F0}}{X_d'\,T_{d0}'}\sin\delta_0\cos\delta_0 + V_0^2\,\frac{X_d' - X_q}{2X_d' X_q}\sin 2\delta_0 \cos\delta_0 \qquad (3)$$

$$Q_0 \sin\delta_0 = \frac{V_0\,\psi_{F0}}{X_d'\,T_{d0}'}\sin\delta_0\cos\delta_0 - V_0^2\left(\frac{X_d'\sin^2\delta_0 + X_q\cos^2\delta_0}{X_d' X_q} + \frac{X}{X_d' X_q(1-BX)} - \frac{B}{1-BX}\right)\sin\delta_0 \qquad (4)$$

Subtrahera (3) och (4)

$$P_0\cos\delta_0 - Q_0\sin\delta_0 = V_0^2(1-BX_q)\sin\delta_0 / X_q$$

$$P_0 - Q_0 \operatorname{tg}\delta_0 = V_0^2(1-BX_q)\operatorname{tg}\delta_0 / X_q$$

$$P_0 = (V_0^2(1-BX_q)/X_q + Q_0)\operatorname{tg}\delta_0$$

Alltså:

$$\boxed{\delta_0 = \operatorname{arctg}\left(\frac{P_0}{V_0^2(1-BX_q)/X_q + Q_0}\right)}$$

Vidare gäller:

$$P_e' = \frac{V_0\sin\delta\cdot\psi_F}{X_d'\,T_{d0}'} + \frac{(X_d' - X_q)\,V_0^2}{2X_d' X_q}\sin 2\delta - P_0$$

dvs

$$\boxed{\psi_{F0} = \left(\frac{P_0}{V_0\sin\delta_0} - \frac{V_0(X_d' - X_q)\cos\delta_0}{X_d' X_q}\right) X_d' \cdot T_{d0}'}$$

Vidare är

$$\frac{X_d\,\psi_F}{X_d'\,T_{d0}'} - \frac{(X_d - X_d')\,V_0\cos\delta_0}{X_d'} = \frac{V_F + sT_{d0}'(X_d - X_d')\,i_d}{1 + sT_{d0}'}$$

dvs

$$\boxed{V_{F0} = \frac{X_d\,\psi_{F0}}{X_d'\,T_{d0}'} - \frac{(X_d - X_d')\,V_0\cos\delta_0}{X_d'}}$$

I stationärt tillstånd gäller även: $\boxed{V_{S0} = \dfrac{V_{F0}}{\mu_e}}$ (se fig 2,sid 10)

Vi har nu fått de tillstånd som är skilda från noll i det stationära sluttillståndet,och kan då skriva en subroutine för beräkningen av de värden på dessa tillstånd till vilka insvängningen skall ske vid en belastningsändring hos systemet. De övriga tillstånden (n, g, g_f, h) är redan linjäriserade och således noll i det stationära sluttillståndet.

```
      SUBROUTINE STAT(DELTA0,PSI0,VF0,VS0,P0,FI0,Q0,EFF,U,B,XQ0,
     *TD0,XD0,XD2,YE,XL)
C     BEREKNING AV DE STATIONERA TILLSTANDEN
      XQ1=(1.-XL*B)*XQ0+XL
      XD1=(1.-XL*B)*XD0+XL
      XD=(1.-XL*B)*XD2+XL
      Q0=P0*SIN(FI0)/COS(FI0)
      DELTA0=ATAN(P0/(U**2*(1.-B*XQ0)/XQ1+Q0))
      PSI0=(P0/U/SIN(DELTA0)-U*(XD0-XQ0)*COS(DELTA0)/XD1/XQ1)*XD1*TD0
      VF0=XD*PSI0/XD1/TD0-(XD2-XD0)*U*COS(DELTA0)/XD1
      VS0=VF0/YE
      EFF=COS(FI0)
      RETURN
      END
```

Elementen i matrisen A beräknas nu genom Taylor-utveckling enligt ovan, varvid följande matris erhålles:

$$
\begin{bmatrix}
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{21} & -\frac{D}{\beta M} & a_{23} & 0 & 0 & \frac{1}{\beta^2 M} & 0 & \frac{1.5}{\beta^2 M} \\
a_{31} & 0 & a_{33} & \frac{1}{\beta} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{41} & 0 & a_{43} & -\frac{1}{\beta \tau_e} & -\frac{\mu_e}{\beta \tau_e} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\beta \tau_s} & 0 & 0 & 0 \\
0 & -\frac{1}{\omega_0 \tau_g} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sigma}{\beta \tau_g} & -\frac{1}{\beta \tau_g} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\beta \tau_a} & 0 \\
0 & \frac{2}{\omega_0 \tau_g} & 0 & 0 & 0 & \frac{2\sigma}{\beta \tau_g} & \frac{2}{\beta \tau_g} & -\frac{2}{\beta \tau_w}
\end{bmatrix}
$$

där

$$a_{21} = -\frac{1}{\beta^2 M}\left(\frac{V_0 \cos\delta_0 \psi_{F0}}{x_d' \tau_{d0}'} + \frac{(x_d' - x_q)V_0^2}{x_d' x_q} \cos 2\delta_0 \right)$$

$$a_{23} = -\frac{V_0 \sin\delta_0}{\beta^2 M x_d' \tau_{d0}'}$$

$$a_{31} = -\frac{(x_d - x_d')V_0 \sin\delta_0}{\beta x_d'}$$

$$a_{33} = -\frac{x_d}{\beta x_d' \tau_{d0}'}$$

$$a_{41} = -\frac{\mu_e}{\beta \tau_e V_{t0}}\left(\frac{x_q V_{d0} \cos\delta_0}{x_q} - \frac{x_d' V_{q0} \sin\delta_0}{x_d'} \right)$$

där $V_d = \frac{V_0 \sin\delta_0}{x_q}$, $V_q = \frac{x\psi_F}{x_d' \tau_{d0}'} - \frac{V_0 \cos\delta_0}{x_d'}$ och $V_t^2 = V_d^2 + V_q^2$

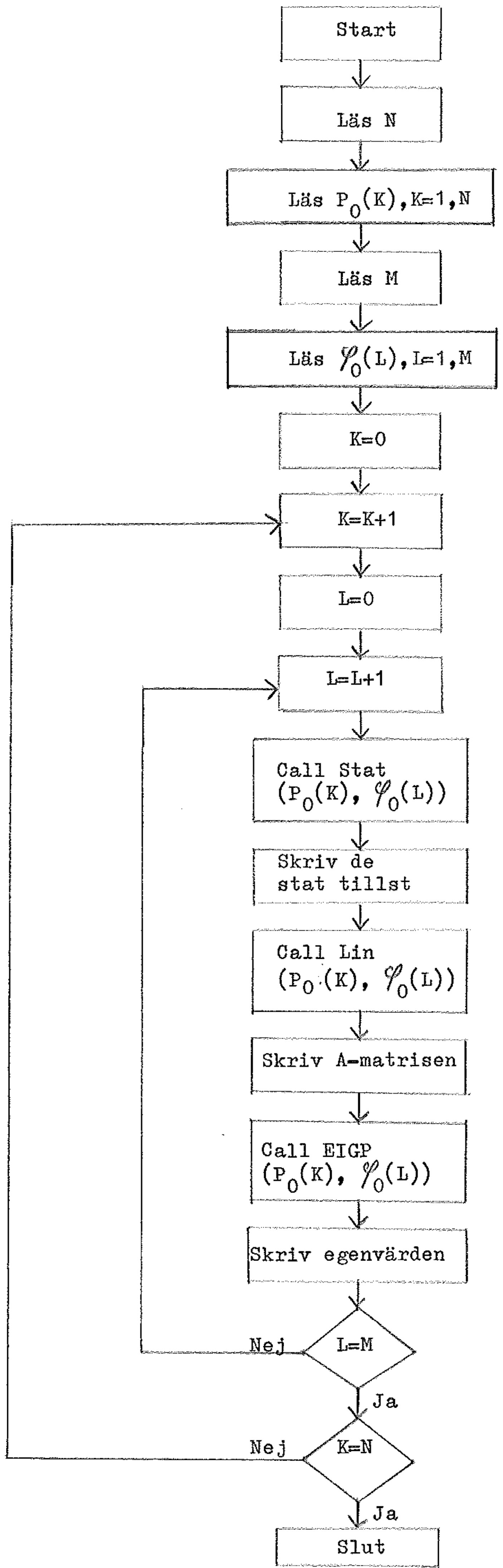
$$a_{43} = -\frac{\mu_e}{\beta \tau_e V_{t0}} \frac{x V_{q0}}{x_d' \tau_{d0}'}$$

Vi får då en subroutine för beräkningen av elementen i matrisen A.

```
      SUBROUTINE LIN(A,PSIO,DELTAO,TDO,XDO,XQO,BETA,H,D,XD2,
     *YE,TE,XL,TS,WO,TG,SIGMA,TA,TW,U,B)
C     BEREKNING AV ELEMENTEN I MATRISEN A
      DIMENSION A(8,8)
      DO 1 I=1,8
      DO 1 J=1,8
1     A(I,J)=0
      XQ1=(1.-XL*B)*XQ0+XL
      XD1=(1.-XL*B)*XD0+XL
      XD=(1.-XL*B)*XD2+XL
      A(1,2)=1.
      A(2,1)=-(PSI0*COS(DELTA0)/TD0+(XD0-XQ0)*U*COS(2.*DELTA0)/XQ1)*
     *U/(BETA**2*H*XD1)
       A(2,2)=-D/(BETA*H)
      A(2,3)=-U*SIN(DELTA0)/(BETA**2*H*XD1*TD0)
      A(2,6)=1./(BETA**2*H)
      A(2,8)=1.5/(BETA**2*H)
      A(3,1)=-(XD2-XD0)*U*SIN(DELTA0)/(BETA*XD1)
      A(3,3)=-XD/(BETA*XD1*TD0)
      A(3,4)=1./BETA
      VD0=XQ0*U*SIN(DELTA0)/XQ1
      VQ0=XL*PSI0/(XD1*TD0)+XD0*U*COS(DELTA0)/XD1
       VT0=SQRT(VD0**2+VQ0**2)
      A(4,1)=-YE*U/(BETA*TE*VT0)*(XQ0*VD0*COS(DELTA0)/XQ1-
     *XD0*VQ0*SIN(DELTA0)/XD1)
      A(4,3)=-YE*XL*VQ0/(BETA*TE*VT0*XD1*TD0)
      A(4,4)=-1./(BETA*TE)
      A(4,5)=-YE/(BETA*TE)
      A(5,5)=-1./(BETA*TS)
      A(6,2)=-1./(WO*TG)
      A(6,6)=-SIGMA/(BETA*TG)
      A(6,7)=-1./(BETA*TG)
      A(7,7)=-1./(BETA*TA)
      A(8,2)=2./(WO*TG)
      A(8,6)=2.*SIGMA/(BETA*TG)
      A(8,7)=2./(BETA*TG)
      A(8,8)=-2./(BETA*TW)
      RETURN
      END
```

Egenvärdena till den beräknade A-matrisen beräknas genom en subroutine, EIGP, som finns lagrad på magnetband.

Vi kan nu ställa upp ett flödesschema för linjäriseringen samt beräkningen av egenvärdena till A-matrisen. Vi utför beräkningarna för N st värden på den utmatade effekten P_0 och för varje P_0 genomföres beräkningarna för M st olika effektfaktorer (olika fasförskjutningar, φ_0)


Start
Läs N
Läs P_0(K),K=1,N
Läs M
Läs φ_0(L),L=1,M
K=0
K=K+1
L=0
L=L+1
Call Stat (P_0(K), φ_0(L))
Skriv de stat tillst
Call Lin (P_0(K), φ_0(L))
Skriv A-matrisen
Call EIGP (P_0(K), φ_0(L))
Skriv egenvärden
L=M
Nej
Ja
K=N
Nej
Ja
Slut

Programmet som vi kallar huvudprogram 1 får då följande utseende:

```
C       HUVUDPROGRAM 1
        DIMENSION A(8,8)
        DIMENSION P0(9)
        DIMENSION FI0(9)
        DIMENSION VECR(8,8),VECI(8,8),INDIC(8),EVR(8),EVI(8)
        READ (5,10) N
10      FORMAT(I2)
        READ (5,11) (P0(I),I=1,N)
11      FORMAT(F8.2)
        READ (5,12) M
12      FORMAT(I2)
        READ (5,13) (FI0(I),I=1,M)
13      FORMAT(F8.3)
        READ (5,17) FREKV
17      FORMAT(F5.2)
        W0=6.2832*FREKV
        K=0
14      K=K+1
        L=0
15      L=L+1
        CALL STAT(DELTA0,PSI0,VF0,VS0,P0(K),FI0(L),Q0,EFF,
       *1.058,0.1339,0.6,9.,0.27,1.,10.,0.7417)
        WRITE (6,16)FI0(L),EFF,P0(K),Q0,DELTA0,PSI0,VF0,VS0
16      FORMAT(///4X,6H   FI0,4X,6H   EFF,4X,6H    P0,4X,6H    Q0,
       *4X,6HDELTA0,4X,6H  PSI0,4X,6H   VF0,4X,6H   VS0/8F10.4)
        CALL LIN(A,PSI0,DELTA0,9.,0.27,0.6,7.308,0.2122,0.00537,
       *1.,10.,1.,0.7417,0.5,W0,0.1,0.045,0.01,1.6,1.058,0.1339)
        WRITE (6,18) ((A(I,J),J=1,8),I=1,8)
18      FORMAT(//6X,10HMATRISEN A,/(4X,8F8.3))
        CALL EIGP(A,8,8,27,EVR,EVI,VECR,VECI,INDIC)
        WRITE (6,19) EVR
19      FORMAT(//6X,2HRE,4X,8F8.3)
        WRITE (6,20) EVI
20      FORMAT(6X,2HIM,4X,8F8.3)
        IF(L-M) 15,21,21
21      WRITE(6,23)
23      FORMAT(1H1,6X,18HFORTS. AV UTSKRIFT)
        IF(K-N) 14,22,22
22      CONTINUE
        WRITE(6,30)
30      FORMAT(///6X,48HPROGRAMMET GENOMLUPET FOR ALLA BELASTNINGSFALLEN)
        END
```

Som framgår av programmet finns även möjlighet att genomföra beräkningarna för olika frekvenser. (satsen READ(5,17)FREKV)

Beräkningarna utfördes för följande värden på systemparametrarna:

$x = 0.7417$	$B = 0.1339$	$x_d = 1.000$	$x_d' = 0.270$	$x_q = 0.6000$
$\tau_{d0}' = 9.000$	$M = 0.2122$	$D = 0.00537$	$\mu_e = 10.00$	$\tau_e = 1.000$
$\tau_s = 0.500$	$\sigma = 0.045$	$\tau_g = 0.100$	$\tau_a = 0.010$	$\tau_w = 1.600$

$\beta = 7.308$

Vi genomförde beräkningarna för frekvensen 60 perioder/sek och följande värden på P_0 och φ_0.

$$P_0 = 0.1 \quad \begin{cases} \varphi_0 = 0.65 & \text{(induktiv bel)} \\ \varphi_0 = 0.00 & \text{(rent resistiv bel.)} \\ \varphi_0 = -0.65 & \text{(kapacitiv bel.)} \end{cases}$$

$$P_0 = 0.5 \quad \begin{cases} \varphi_0 = 0.65 \\ \varphi_0 = 0.00 \\ \varphi_0 = -0.65 \end{cases}$$

$$P_0 = 0.75 \quad \begin{cases} \varphi_0 = 0.65 \\ \varphi_0 = 0.00 \\ \varphi_0 = -0.65 \end{cases}$$

$$P_0 = 1.00 \quad \begin{cases} \varphi_0 = 0.65 \\ \varphi_0 = 0.00 \\ \varphi_0 = -0.65 \end{cases}$$

Som resultat av exekveringen erhölls:

FIO	EFF	PO	QO	DELTAO	PSIO	VFO	VSO
.6500	.7961	.1000	.0760	.1133	9.8464	1.0453	.1045

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.078	-.003	-.001	.000	.000	.088	.000	.132
-.012	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.011	.000	-.114	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.004	-.146	-.089	-.037	-.122	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FIO	EFF	PO	QO	DELTAO	PSIO	VFO	VSO
.0000	1.0000	.1000	.0000	.1239	9.2109	.9285	.0928

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.071	-.003	-.001	.000	.000	.088	.000	.132
-.013	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.010	.000	-.114	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.004	-.145	-.089	-.054	-.105	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FIO	EFF	PO	QO	DELTAO	PSIO	VFO	VSO
-.6500	.7961	.1000	-.0760	.1367	8.5753	.8120	.0812

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.065	-.003	-.001	.000	.000	.088	.000	.132
-.015	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.009	.000	-.114	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.004	-.145	-.089	-.083	-.078	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FORTS. AV UTSKRIFT

FIO	EFF	PO	QO	DELTAO	PSIO	VFO	VSO
.6500	.7961	.5000	.3801	.3999	13.0178	1.6897	.1690

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.108	-.003	-.004	.000	.000	.088	.000	.132
-.042	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.065	.000	-.113	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.007	-.135	-.114	-.029	-.114	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FIO	EFF	PO	QO	DELTAO	PSIO	VFO	VSO
.0000	1.0000	.5000	.0000	.5570	10.0050	1.1881	.1188

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.078	-.003	-.006	.000	.000	.088	.000	.132
-.057	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.069	.000	-.111	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.011	-.125	-.127	-.027	-.109	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FIO	EFF	PO	QO	DELTAO	PSIO	VFO	VSO
-.6500	.7961	.5000	-.3801	.8688	7.0686	.8034	.0803

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.052	-.003	-.008	.000	.000	.088	.000	.132
-.082	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.082	.000	-.103	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.024	-.096	-.152	-.052	-.073	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FORTS. AV UTSKRIFT

FIO	EFF	PO	QO	DELTAO	PSIO	VFO	VSO
.6500	.7961	.7500	.5702	.4999	15.2588	2.1391	.2139

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.127	-.003	-.005	.000	.000	.088	.000	.132
-.051	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.097	.000	-.113	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.008	-.133	-.121	-.032	-.105	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FIO	EFF	PO	QO	DELTAO	PSIO	VFO	VSO
.0000	1.0000	.7500	.0000	.7513	10.9961	1.4644	.1464

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.083	-.003	-.007	.000	.000	.088	.000	.132
-.073	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.118	.000	-.110	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.016	-.111	-.149	-.031	-.092	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FIO	EFF	PO	QO	DELTAO	PSIO	VFO	VSO
-.6500	.7961	.7500	-.5702	1.2699	7.3056	1.1212	.1121

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.044	-.003	-.010	.000	.000	.088	.000	.132
-.102	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.201	.000	-.095	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.054	-.041	-.180	-.067	-.055	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FORTS. AV UTSKRIFT

FI0	EFF	P0	Q0	DELTA0	PSI0	VF0	VS0
.6500	.7961	1.0000	.7602	.5691	17.6111	2.6025	.2603

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.145	-.003	-.006	.000	.000	.088	.000	.132
-.058	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.124	.000	-.113	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.008	-.132	-.125	-.035	-.099	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FI0	EFF	P0	Q0	DELTA0	PSI0	VF0	VS0
.0000	1.0000	1.0000	.0000	.8943	12.2789	1.7842	.1784

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.087	-.003	-.008	.000	.000	.088	.000	.132
-.084	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.166	.000	-.109	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.020	-.099	-.162	-.037	-.080	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

FI0	EFF	P0	Q0	DELTA0	PSI0	VF0	VS0
-.6500	.7961	1.0000	-.7602	1.5281	8.4903	1.5397	.1540

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.030	-.003	-.011	.000	.000	.088	.000	.132
-.107	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.311	.000	-.094	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

RE	.000	-.096	.005	-.143	-.115	-.049	-.274	-13.684
IM	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

Vi ser att det linjäriserade systemet är villkorligt stabilt eftersom alla egenvärdena har negativ realdel förutom ett, vilket är enkelt i origo.

Ett av egenvärdena har markant mindre realdel än de övriga (-13.684).

Om vi utvecklar matrisprodukten får vi för tillståndet g_f:

$\frac{dg_f}{d\tau} = - \frac{g_f}{\beta \tau_a}$ vars lösning är: $g_f = g_{f0}\, e^{-\frac{1}{\beta \tau_a} t}$

$-\frac{1}{\beta \tau_a}$ är just detta egenvärde, vilket lätt inses om determinanten $(\lambda I - A)$ utvecklas efter 7-de raden. Detta egenvärde representerar alltså det mycket snabba tillståndet g_f. Vid en eventuell reducering av systemet, kan då i första hand detta tillstånd negligeras, dvs vi approximerar då överföringsfunktionen hos turbinregulatorn med en konstant förstärkningsparameter (μ_a).

Vid en ytterligare reducering av systemet kan man pss tänka sig att tillståndsvariabeln V_s negligeras ty egenvärdet -0.274, som representerar detta tillstånd är åtminstone dubbelt så litet som de övriga. Denna approximation blir dock mycket grövre än den ovan nämda att negligera g_f.

Av de övriga egenvärdenas storlek framgår vidare att vissa tillstånd kommer att vara mycket långsamma.

Variationerna hos egenvärdena är mycket små mellan de olika belastningsfallen. Det egenvärde, som representerar det långsammaste tillståndet, dvs det egenvärde som är störst (förutom det i origo) tenderar att minska vid ökande belastning. Motsvarande långsamma tillstånd blir således snabbare i närheten av fullast än i närheten av låglast.

De övriga egenvärdenas variationer mellan de olika belastningsfallen är procentuellt mycket mindre, och därför torde det inte föreligga någon väsentlig ändring i snabbheten hos motsvarande tillstånd vid olika belastnigsfall. Normalt går maskinen med induktiv last, och om vi inskränker oss till de induktiva belastningsfallen, blir denna tendens än mer markant.

<u>Bestämmning av styrlag</u>

Vi skall nu bestämma en styrlag, som minimerar en förlustfunktion av formen: $J = \frac{1}{2}\int_0^T ((x^T Q_1 x) + (u^T Q_2 u))dt$

Denna förlustfunktion väljes genom att välja matriserna Q_1 och Q_2.

Vi begränsar oss till att variera elementen i Q_1 matrisen och låter Q_2 matrisen vara konstant, nämligen $Q_2 = \text{diag}(1,1)$, dvs vi "bestraffar" styrsignalerna u_1 och u_2 lika. Vid valet av Q_1 väljer vi först att "bestraffa" alla tillstånd lika, dvs $Q_1 = \text{diag}(1,1,1,1,1,1,1)$.

Vi har emellertid några tillstånd, vilkas avvikelser från de stationära jämviktslägena ej bör bli för stora. Först och främst gäller detta tillståndet n, d v s avvikelsen i vinkelfrekvens eftersom det är viktigt att maskinen levererar spänning med konstant frekvens. Vi "bestraffar" således detta tillstånd extra. Detta kan även ske genom att vi "bestraffar" första tillståndet δ', eftersom detta tillstånd är integralen av n. Vi prövar därför med Q_1 = diag(3,3,1,1,1,1,1,1) , Q_1 = diag(5,5,1,1,1,1,1,1) samt Q_1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1).

Ur de beräknade stationära värdena på lastvinkelen ser vi att denna uppvisar de största värdena vid fullast, 0.5691 för induktiv last, 0.8943 för rent resistiv last och 1.5281 för kapacitiv last. Det föreligger således ingen risk för att systemet skall falla ur fas p g a att δ överskrider $\pi/2$ i de induktiva och rent resistiva belastningsfallen.

P g a fysikaliskt betingade begränsningar, till vilka vi i ekvationssystemet ej tagit någon hänsyn, kan det finnas skäl att "bestraffa" härav berörda tillstånd extra. Vi har främst tänkt oss ψ_F och g, ψ_F p g a magnetisk mättning och g p g a de naturliga begränsningarna i turbinpådraget. Vi väntar emellertid med att "bestraffa" dessa tillstånd extra och ser först vilken inverkan de ovan gjorda valen av Q_1 har på dessa tillstånd.

Eftersom egenvärdena varierar ganska lite mellan de olika belastningsfallen inskränker vi oss till att beräkna styrlagarna för P_0 = 1.00 , φ_0 = 0.65, d v s induktiv fullast.

Då nu valet av Q_1- och Q_2- matriserna är gjort, kan motsvarande styrlagar bestämmas entydigt. Program härför, d v s för lösandet av Riccati-ekvationen och bestämning av den linjära återkopplingen u = -Lx, finns lagrat på magnetband.(LOCCO)

Dessa styrlagar får då följande utseende:

Q_1 = diag(1,1,1,1,1,1,1,1)

$$L = \begin{bmatrix} -0.1722 & 0.1996 & -0.6715 & -0.9532 & 1.6451 & 0.3330 & 0.0033 & 0.1822 \\ -0.3814 & 2.7920 & -0.0561 & -0.0072 & 0.0033 & -0.4769 & 0.2712 & 0.9480 \end{bmatrix}$$

$$u = -Lx$$

$Q_1 = \mathrm{diag}(3,3,1,1,1,1,1,1)$

$$L = \begin{bmatrix} -0.2130 & 0.2045 & -0.6743 & -0.9537 & 1.6455 & 0.4344 & 0.0025 & 0.2281 \\ -0.3588 & 4.9138 & -0.0662 & -0.0071 & 0.0025 & -0.7288 & 0.3530 & 1.2404 \end{bmatrix}$$

$$u = -Lx$$

$Q_1 = \mathrm{diag}(5,5,1,1,1,1,1,1)$

$$L = \begin{bmatrix} -0.2462 & 0.2146 & -0.6768 & -0.9542 & 1.6458 & 0.5269 & 0.0015 & 0.2689 \\ -0.2322 & 6.3637 & -0.0693 & -0.0063 & 0.0015 & -1.0025 & 0.4051 & 1.3711 \end{bmatrix}$$

$$u = -Lx$$

$Q_1 = \mathrm{diag}(10,10,1,1,1,1,1,1)$

$$L = \begin{bmatrix} -0.3214 & 0.2505 & -0.6828 & -0.9552 & 1.6466 & 0.7510 & -0.0009 & 0.3681 \\ 0.1613 & 8.9668 & -0.0689 & -0.0040 & -0.0009 & -1.6631 & 0.4929 & 1.4948 \end{bmatrix}$$

$$u = -Lx$$

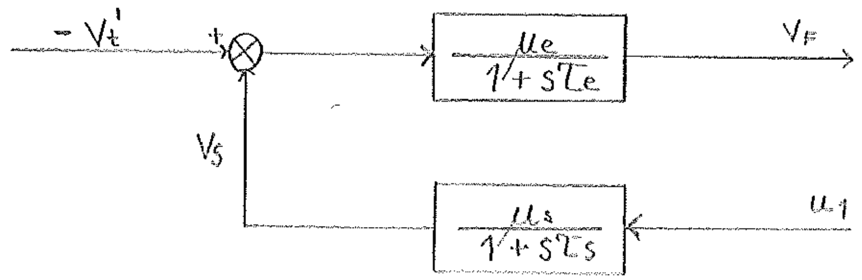
Simulering.

Då vi nu bestämt styrlagarna kan vi applicera dessa på systemet och utföra simuleringen. Vi arbetar då parallellt dels med det olinjära systemet och dels med den approximativa linjäriserade modellen. Vi undersöker därvid under vilka betingelser vi får en god överensstämmelse mellan dessa båda modeller, d v s om den linjära approximationen kan anses vara giltlig, och i så fall när.

Vi simulerar följande situation:

Maskinen tänkes gå i ett stationärt tillstånd varvid den lämnar den aktiva effekten P_1 till linjen. Vi gör en stegstörning genom att plötsligt höja uteffekten till fullast P_0. Vidare låter vi fasvinkeln vara lika vid de båda effekterna, nämligen $\varphi = 0.65$ ($\cos\varphi = 0.8$).

Vid simuleringen av den olinjära modellen väljer vi att studera resp tillstånds avvikelse från det värde det får när insvängningen är fullbordad, d v s avvikelsen från det stationära slutvärdet på resp tillstånd. Vi kan därigenom göra en direkt jämförelse med den linjäriserade modellen, som ju är linjäriserad kring sluttillstånden. Begynnelsevärdet hos resp tillstånds avvikelse fås då genom att beräkna de stationära värdena vid effekterna P_1 resp P_0 samt ta skillnaden mellan dessa. De stationära värdena beräknas med subroutinen STAT. Vi måste emellertid utvidga parameterlistan i STAT, eftersom vi nu även vill beräkna ett slutvärde på styrsignalen u_1. Betrakta nämligen maskinens spänningsregulator:



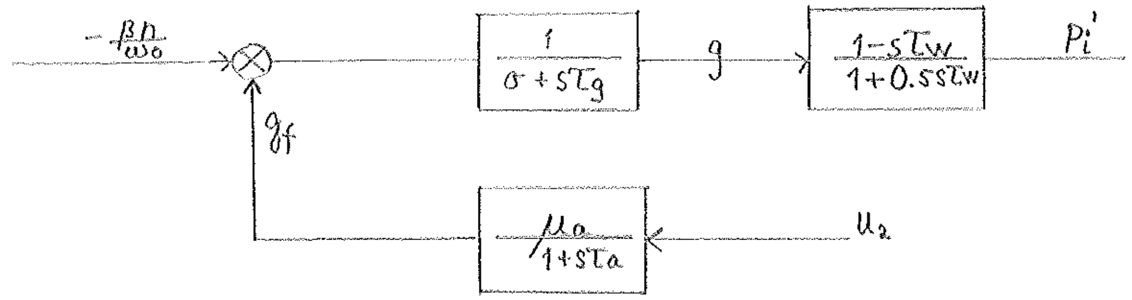
Då nu V_s är skilt från noll i det stationära sluttillståndet, måste vi även ha ett slutvärde på u_1.

Ekvationen för tillståndet V_s är: $\frac{dV_s}{d\tau} = -\frac{V_s}{\beta\tau_s} + \frac{\mu_s}{\beta\tau_s}\cdot u_1$

Med LOCCO beräknas hela termen $\frac{\mu_s}{\beta\tau_s}u_1$ och då erhålles $u_1 = \frac{V_{so}}{\beta\tau_s}$ i stationärt sluttillstånd. Denna beräkningssats måste införas i STAT och den modifierade subroutinen får följande utseende:

```
      SUBROUTINE STAT(DELTA0,PSI0,VF0,VS0,P0,FI0,Q0,EFF,U,B,XQ0,
     *TD0,XD0,XD2,YE,XL,STYR,BETA,TS)
C     BEREKNING AV DE STATIONERA TILLSTANDEN
      XQ1=(1.-XL*B)*XQ0+XL
      XD1=(1.-XL*B)*XD0+XL
      XD=(1.-XL*B)*XD2+XL
      Q0=P0*SIN(FI0)/COS(FI0)
      DELTA0=ATAN(P0/(U**2*(1.-B*XQ0)/XQ1+Q0))
      PSI0=(P0/U/SIN(DELTA0)-U*(XD0-XQ0)*COS(DELTA0)/XD1/XQ1)*XD1*TD0
      VF0=XD*PSI0/XD1/TD0-(XD2-XD0)*U*COS(DELTA0)/XD1
      VS0=-VF0/YE
      STYR=VS0/BETA/TS
      EFF=COS(FI0)
      RETURN
      END
```

De tillstånd, vilka är noll då maskinen går i stationärt tillstånd måste även tilldelas initialvärden. Det gäller: $P_i = g + 1.5h$ där g och h är lineäriserade tillstånd hos turbinen. g betecknar avvikelsen från turbinpådraget vid effekten P_0 och då blir begynnelsevärdet av g : g = PSTEG = $P_1 - P_0$.
$n = \frac{\omega'}{\beta}$, d v s i princip avvikelsen från den givna frekvensen hos maskinen. Frekvensen är naturligtvis lika vid olika belastningsfall d v s begynnelsevärdet av n blir noll.
Ur turbinregulatorn



ser vi att begynnelsevärdet av g_f blir $-\sigma g_f$. Begynnelsevärdet av h blir noll. Vi får då en subroutine, som beräknar dessa tillstånds initialvärde.

```
      SUBROUTINE TURBBV(PSTEG,HAST,G,GF,HE,SIGMA)
C     BEREKNING AV BEGYNNELSEVERDENA AV TILLSTANDEN HAST,G,GF OCH HE.
      HAST=0.
      G=PSTEG
      GF=-SIGMA*G
      HE=0.
      RETURN
      END
```

För integreringen av ekvationerna i den olinjära modellen används Runge-Kuttas metod. En subroutine för denna integrering finns lagrad på magnetband. (RK1ST). Denna subroutine fordrar i sin tur en annan subroutine i vilken systemekvationerna är bildade. Denna senare subroutinen, FUNC, får i vårt fall följande utseende:

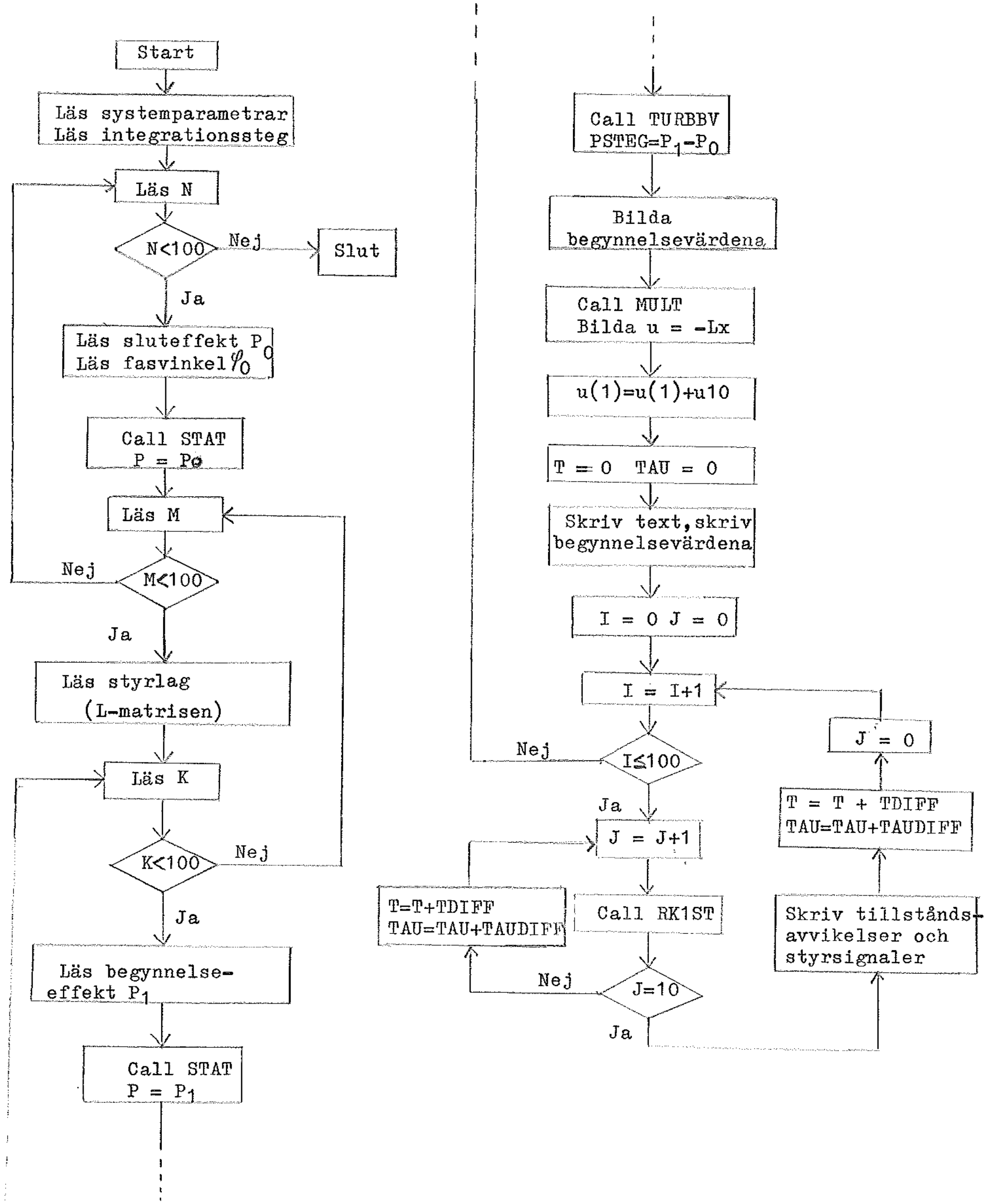
```
      SUBROUTINE FUNC
      DIMENSION DXDT(10),Z(10),V(2)
      COMMON/FUNCT/ T,Z,DXDT
      COMMON/SYST/ BETA,H,D,U,XD0,XQ0,XD2,B,XL,TD0,TE,YE,TS,SIGMA,
     *TG,TA,TW,FREKV,WO,XD1,XQ1,XD,VD,VQ,VT,VT1,VT0,P0,DELTA0,PSI0,VF0,
     *VS0,V
      DXDT(1)=Z(2)
      DXDT(2)=(((Z(6)+1.5*Z(8))-D*BETA*Z(2))-(U*SIN(Z(1)+DELTA0)*(Z(3)
     *+PSI0)/XD1/TD0+(XD0-XQ0)*U**2*SIN(2*(Z(1)+DELTA0))/2/XD1/XQ1
     *-P0))/BETA**2/H
      DXDT(3)=(Z(4)+VF0)/BETA-XD*(Z(3) +PSI0)/BETA/XD1/TD0+
     *(XD2-XD0)*U*COS(Z(1)+DELTA0)/BETA/XD1
      VD=XQ0*U*SIN(Z(1)+DELTA0)/XQ1
      VQ=XL*(Z(3)+PSI0)/(XD1*TD0)+XD0*U*COS(Z(1)+DELTA0)/XD1
      VT=SQRT(VD**2+VQ**2)
      VT1=VT-VT0
      DXDT(4)=-(Z(4)+VF0+YE*(VT1+Z(5)+VS0))/BETA/TE
      DXDT(5)=-(Z(5)+VS0)/BETA/TS+V(1)
      DXDT(6)=-(SIGMA*Z(6)+BETA*Z(2)/WO+Z(7))/BETA/TG
      DXDT(7)=-Z(7)/BETA/TA+V(2)
      DXDT(8)=-2*DXDT(6)-2*Z(8)/BETA/TW
      DXDT(9)=0.
      DXDT(10)=0.
      RETURN
      END
```

Vidare behövs en subroutine för att beräkna matrisprodukten u = -Lx.

```
      SUBROUTINE MULT(A,B,C,M,N,P)
C     BEREKNAR MATRISPRODUKTEN C=-A*B
C     A  M*P-MATRIS
C     B  P*N-MATRIS
C     C  M*N-MATRIS
      INTEGER V,P
      DIMENSION A(M,P),B(P,N),C(M,N)
      DO 1 I=1,M
      DO 1 J=1,N
      C(I,J)=0
      DO 1 V=1,P
1     C(I,J)=C(I,J)+A(I,V)*B(V,J)
      DO 2 I=1,M
      DO 2 J=1,N
2     C(I,J)=-C(I,J)
      RETURN
      END
```

Ekvationerna är givna i skalad tid $\tau = \beta t$. Integrationssteget TDIFF i reell tid måste således multipliceras med β för att få det i skalad tid. Vi utför simuleringen under tidsintervallet 0-10 sek. Integrationssteget väljes till 0.01 sek. Värden på tillståndsavvikelserna samt styrsignalerna utskrives vid vart 10:e steg d v s var tiondels sek.

Simuleringsprogrammet lägges upp enligt följande flödesschema:



Som framgår av flödesschemat styres simuleringen av de tre heltalen N,M och K. Programmet är således upplagt för att kunna utföra simulering för olika kombinationer av sluteffekt,styrlag och effektsteg och får följande utseende:

```
C     HUVUDPROGRAM 3.
C     SIMULERING AV DET OLINEARA SYSTEMET MHA SUBROUTINEN RK1ST.
      DIMENSION YIN(10),YUT(10),S(2,8),Q1(8),V(2)
      EXTERNAL FUNC
      COMMON/SYST/ BETA,H,D,U,XD0,XQ0,XD2,B,XL,TD0,TE,YE,TS,SIGMA,
     *TG,TA,TW,FREKV,WO,XD1,XQ1,XD,VD,VQ,VT,VT1,VT0,P0,DELTA0,PSI0,VF0,
     *VS0,V
      READ(5,1) BETA,H,D,U,XD0,XQ0,XD2,B,XL,TD0,TE,YE,TS,SIGMA,TG,TA,
     *TW,FREKV
1     FORMAT(9F8.5/9F8.5)
      XQ1=(1.-XL*B)*XQ0+XL
      XD1=(1.-XL*B)*XD0+XL
      XD=(1.-XL*B)*XD2+XL
      WO=6.2832*FREKV
      READ(5,2) TDIFF
2     FORMAT(F5.3)
      TAUD=BETA*TDIFF
50    READ(5,3) N
3     FORMAT(I3)
      IF(N-100) 4,100,100
4     READ(5,5) P0,FI0
5     FORMAT(2F8.3)
      CALL STAT(DELTA0,PSI0,VF0,VS0,P0,FI0,Q0,EFF,
     *U,B,XQ0,TD0,XD0,XD2,YE,XL,V10,BETA,TS)
      VD0=XQ0*U*SIN(DELTA0)/XQ1
      VQ0=XL*PSI0/(XD1*TD0)+XD0*U*COS(DELTA0)/XD1
       VT0=SQRT(VD0**2+VQ0**2)
40    READ(5,6) M
6     FORMAT(I3)
      IF(M-100) 7,50,50
7     READ(5,8) ((S(I,J),J=1,8),I=1,2)
8     FORMAT(8F9.4/8F9.4)
      READ(5,9) (Q1(I),I=1,8)
9     FORMAT(8F4.1)
30    READ(5,10) K
10    FORMAT(I3)
      IF(K-100)11,40,40
11    READ(5,12) P1
12    FORMAT(F8.3)
      CALL STAT(DELTA1,PSI1,VF1,VS1,P1,FI0,Q01,EFF,
     *U,B,XQ0,TD0,XD0,XD2,YE,XL,V11,BETA,TS)
      PSTEG=P1-P0
      CALL TURBBV(PSTEG,HAST1,G1,GF1,HE1,SIGMA)
      YIN(1)=DELTA1-DELTA0
      YIN(2)=HAST1
      YIN(3)=PSI1-PSI0
      YIN(4)=VF1-VF0
      YIN(5)=VS1-VS0
      YIN(6)=G1
      YIN(7)=GF1
      YIN(8)=HE1
      YIN(9)=0.
      YIN(10)=0.
      CALL MULT(S,YIN,V,2,1,8)
      V(1)=V(1)+V10
      T=0.00
      TAU=0.00
```

```
      WRITE(6,13) P0,P1,EFF,(Q1(I),I=1,8)
13    FORMAT(1H1,4X,36HSIMULERING AV DET OLINEARA SYSTEMET.//4X,3HP0=,
     *F5.3,4X,3HP1=,F5.3,4X,4HEFF=,F5.3,4X,8HQ1=DIAG(,F4.1,1H,,F4.1,
     *1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H))
      WRITE(6,18) DELTA0,PSI0,VF0,VS0
18    FORMAT(///5X,52HSTATIONERA VERDEN TILL VILKA INSVENGNINGEN SKALL S
     *KE//4X,7HDELTA0=,F8.4,4X,5HPSI0=,F8.4,4X,4HVF0=,F8.4,4X,4HVS0=,
     *F8.4)
      WRITE(6,19) ((S(I,J),J=1,8),I=1,2)
19    FORMAT(///4X,28HL-MATRISEN I STYRLAGEN U=-LX//4X,8F9.4/4X,8F9.4)
      WRITE(6,14) T,(YIN(I),I=1,8),(V(J),J=1,2)
14    FORMAT(///4X,1HT,4X,9HDELTA-DEV,3X,4HHAST,3X,7HPSI-DEV,3X,
     *6HVF-DEV,3X,6HVS-DEV,5X,1HG,7X,2HGF,7X,2HHE,17X,2HU1,7X,2HU2
     *//2X,F5.2,1X,8F9.4,11X,2F9.4)
      DO 16 I=1,100
      DO 15 J=1,10
      CALL RK1ST(TAU,YIN,TAUD,YUT,10,FUNC)
      CALL MULT(S,YUT,V,2,1,8)
      V(1)=V(1)+V10
      T=T+TDIFF
      TAU=TAU+TAUD
      DO 15 L=1,10
15    YIN(L)=YUT(L)
16    WRITE(6,17) T,(YUT(L),L=1,8),(V(IA),IA=1,2)
17    FORMAT(2X,F5.2,1X,8F9.4,11X,2F9.4)
      GO TO 30
100   CONTINUE
      END
```

För den linjära modellen gäller:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \qquad u = -Lx \qquad \frac{dx}{dt} = Ax - BLx$$

$$\frac{dx}{dt} - (A - BL)x = 0 \qquad e^{-(A - BL)t}\left(\frac{dx}{dt} - (A - BL)x\right) = 0$$

$$\frac{d}{dt}\left(e^{-(A - BL)t}x(t)\right) = 0 \qquad \int_0^t \frac{d}{dt}\left(e^{-(A - BL)t}x(t)\right)dt = 0$$

$$e^{-(A - BL)t}x(t) - x(0) = 0 \qquad \underline{x(t) = x(0)e^{-(A - BL)t}}$$

Programmet för simuleringen av den linjära modellen är i princip uppbyggd på samma sätt som programmet för simuleringen av den olinjära modellen. Subroutinen MULT är emellertid ändrad på så sätt att den beräknar C = AB i stället för C = -AB, d v s de tre sista beräknande satserna i den ovan redovisade subroutinen MULT utgår. Subroutinen MEXP7, som finns lagrad på magnetband beräknar $D = e^A$. Programmet får följande utseende:

```
C     HUVUDPROGRAM (2)
C     SIMULERING AV SYSTEMET GENOM DIREKT INTEGRERING AV DEN
C     LINEARA MODELLEN
      DIMENSION A(8,8),B(8,2),S(2,8),D(8,8),X0(8),X1(8),Q1(8),X(8),V(2)
     *,C(8,8)
      READ(5,1) N,IA,NOTRAC
1     FORMAT(3I2)
      READ(5,2) TDIFF,TMAX
2     FORMAT(2F4.1)
      READ(5,3) ((B(J,I),I=1,2),J=1,8)
3     FORMAT(16F3.0)
4     READ(5,5) K
5     FORMAT(I3)
      IF(K-100)6,100,100
6     READ(5,7) P0,FI0
7     FORMAT(2F4.2)
      CALL STAT(X0(1),X0(3),X0(4),X0(5),V10,P0,FI0,Q0,EFF0,1.058,0.1339,
     *0.6,9.,0.27,1.,10.,0.7417,7.308,0.5)
      CALL TURBBV(0.,X0(2),X0(6),X0(7),X0(8),0.045,V20)
8     READ(5,5) L
      IF(L-100)9,4,4
9     READ(5,10) ((S(J,I),I=1,8),J=1,2)
10    FORMAT(8F9.4)
      READ(5,11)(Q1(I),I=1,8)
11    FORMAT(8F3.0)
12    READ(5,5) M
      IF(M-100)14,8,8
14    READ(5,7) P1,FI1
      PSTEG=P1-P0
      CALL TURBBV(PSTEG,X1(2),X1(6),X1(7),X1(8),0.045,V21)
      CALL STAT(X1(1),X1(3),X1(4),X1(5),V11,P1,FI1,Q01,EFF1,1.058,0.1339
     *,0.6,9.,0.27,1.,10.,0.7417,7.308,0.5)
      CALL MULT(B,S,C,8,8,2)
      DO15 J=1,8
15    X1(J)=X1(J)-X0(J)
      WRITE(6,16) P0,P1,EFF0,(Q1(I),I=1,8)
16    FORMAT(1H1,4X,35HSIMULERING AV DEN LINEARA MODELLEN.//
     *4X,3HP0=,F5.3,4X,3HP1=,F5.3,4X,4HEFF=,F5.3,4X,8HQ1=DIAG(,F4.1,1H,
     *,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H))
      WRITE(6,23)((S(I,J),J=1,8),I=1,2)
23    FORMAT(///4X,28HL-MATRISEN I STYRLAGEN U=-LX//4X,8F9.4/4X,8F9.4)
      WRITE(6,22) X0(1),X0(3),X0(4),X0(5)
22    FORMAT(///5X,54HSTATIONERA VERDEN TILL VILKA INSVENGNINGEN SKALL
     * SKE//4X,7HDELTA0=,F8.4,4X,5HPSI0=,F8.4,4X,4HVF0=,F8.4,4X,4HVS0=,
     *F8.4)
      WRITE(6,17)
17    FORMAT(///4X,1HT,4X,9HDELTA-DEV,3X,4HHAST,3X,7HPSI-DEV,3X,
     *6HVF-DEV,3X,
     *6HVS-DEV,5X,1HG,7X,2HGF,7X,2HHE,19X,2HU1,7X,2HU2)
      T=0.
      CALL MULT(S,X1,V,2,1,8)
      V(1)=V(1)+V10
      V(2)=V(2)+V20
      WRITE(6,19)T,(X1(I),I=1,8),(V(J),J=1,2)
      CALL LIN(A,X0(3),X0(1),9.,0.27,0.6,7.308,0.2122,0.00537,1.,10.,
     *1.,0.7417,0.5,376.,0.1,0.045,0.01,1.6,1.058,0.1339)
      DO 18 I=1,8
      DO18 J=1,8
18    A(I,J)=(A(I,J)-C(I,J))*TDIFF*7.308
      CALL MEXP7(A,D,N,IA,NOTRAC)
20    T=T+TDIFF
13    CALL MULT(D,X1,X,8,1,8)
      CALL MULT(S,X,V,2,1,8)
      V(1)=V(1)+V10
      V(2)=V(2)+V20
```

```
      WRITE(6,19) T,(X(I),I=1,8),(V(J),J=1,2)
19    FORMAT(2X,F5.2,8F9.4,12X,2F9.4)
      DO 24 LA=1,8
24    X1(LA)=X(LA)
      IF (T-TMAX) 20,12,12
100   CONTINUE
      END
```

Resultat av simuleringen

Samtidigt som vi undersöker den linjära approximationens giltlighet försöker vi bestämma vilken av de använda styrlagarna,som ger det bästa insvängningsförloppet.Vi diskuterar därvid de erhållna resultaten tillstånd för tillstånd och illustrerar med figurer,vilka står att finna i appendixet.

δ':

Periodtiderna för svängningarna är praktiskt taget desamma för de båda modellerna för alla tre effektstegen.Samtliga max- och minpunkter inträffar med maximalt en tiondels sekunds förskjutning mellan de båda modellerna,dvs nästan identitet vad periodtiderna beträffar.
Den linjära modellen har något mindre utsvängning,dvs större min- och mindre maxvärden,än den olinjära modellen,vilket är ganska naturligt.Skillnaden är maximalt ca:15% av utsvängningens maximala värde för den olinjära modellen.Denna maximala skillnad inträffar för effetsteget 0.50.För effektstegen 0.10 och 0.25 är skillnaden obetydlig.
Q_1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1) ger den bästa styrningen.Avvikelsen från det stationära slutvärdet (0.5691)är mindre än 5% av detta efter 5 sekunder.
Kurvor,som illustrerar insvängningsförlopp, se appendix sid 1-2.

n:

Mellan periodtidena för svängningarna hos de båda modellerna råder även här praktiskt taget identitet (maximalt en tiondels sekunds förskjutning mellan max- och minpunkter mellan de båda modellerna).
Skillnaden i amplitud är här dock något större än för δ',maximalt 30% av utsvängningen för den olinjära modellen.(se appendix sid 3, fig 1).
Q_1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1) ger även här den bästa styrningen (se appendix sid 3-4).n kan med denna styrlag anses vara fullständigt inreglerad efter 5 sekunder.

ψ_F:

Svängningarnas periodtider är desamma för de båda modellerna (maximal skillnad på 0.1 sek. mellan max- och min-värden mellan modellerna). I fråga om amplidud existerar praktiskt taget inga skillnader mellan modellerna. Överensstämmelsen är nästan fullständig (för det ostyrda fallet se fig 1 sid 5 i appendix).

Vad beträffar inregleringen av ψ_F', råder ingen märkbar skillnad mellan de använda styrlagarna. Alla följer förloppet enligt fig 2 sid 5 i appendix. Skillnaden utgör maximalt ca 0.05, dvs det är liktydigt vilken styrlag man använder för att reglera ψ_F'.

Inregleringen är fullbordad efter 3-4 sekunder. ψ_F' går assymtotiskt mot noll, dvs vi har en mycket bra styrning. Härur kan vi dra slutsatsen att vi inte behöver pröva någon styrlag i vilken ψ_F' "bestraffas" extra, vilket vi ovan antytt kanske skulle bli nödvändigt.

V_F:

Praktiskt taget identitet mellan modellerna. Svängningarnas periodtider är desamma samt maximala skillnaden i amplitud är 0.03, dvs obetydlig. De använda styrlagarna ger samma insvängningsförlopp (se fig 2 sid 6 i appendix). Enda skillnaden är att ju mer vi "bestraffar" δ' och n, desto mindre blir amplituden vid maxvärdet (se fig 2 sid 6 i appendix). Skillnaden är dock obetydlig, 0.09 mellan insvängningen då $Q_1 = \mathrm{diag}(1,1,1,1,1,1,1)$ och insvängningen då $Q_1 = \mathrm{diag}(10,10,1,1,1,1,1)$. V_F' är inreglerad till 10% av slutvärdet V_{F0} (2.6025) efter 3 sekunder och till 5% av slutvärdet efter 3.5 sekunder, dvs en mycket bra styrning.

V_S:

Tillståndet V_S är ett av de snabba tillstånd, som vi vid en eventuell reducering av systemets ordning ansåg oss kunna negligera (se ovan). Dess snabbhet illustreras i fig 1 sid 7 i appendix.

Skillnad mellan modellerna står endast att finna i amplituden i det djupa minimat. Skillnaden är dock obetydlig (0.05)

Beträffande styrlagarna gäller samma som för V_F, dvs de är likvärdiga så när som på att minpunkten är något förskjuten uppåt då δ' och n bestraffas.

V_S är inreglerad till 10% av V_{S0} (-0.2603) efter 3 sekunder och till 5% av V_{S0} efter 3.5 sekunder.

g:

Ingen skillnad mellan modellerna förutom en obetydlig amplitudskillnad. Styrlagarna är praktiskt taget likvärdiga (se fig 1 och fig 2 sid 8 i appendix). Ur figurerna framgår även att inregleringen av g går ganska snabbt samt har ett nära nog asymptotiskt förlopp, dvs en bra styrning. Vi behöver därför inte vidtaga någon extra "bestraffning" av g, vilket vi ovan antydde kunde bliva nödvändigt.

g_f:

Tillståndet g_f svarar enligt ovan mot egenvärdet längst ut i vänstra halvplanet och är således det snabbaste tillståndet. För det ostyrda systemet är g_f insvängt till noll redan efter 0.10 sekunder.
En viss skillnad mellan modellerna står att finna i amplituden (se fig 1 och fig 2 sid 9 i appendix).
Vad beträffar styrlagarna gäller att ju mer vi besraffar σ' och n, desto större blir utsvängningen av g_f i början av svängningsförloppet, medan å andra sidan insvängningen går snabbare. Med $Q_1 = \mathrm{diag}(10,10,1,1,1,1,1,1)$ är insvängningen fullbordad efter 4 sekunder (se fig 2 sid 9 i appendix).

h:

Inga märkbara skillnader mellan modellerna. Styrlagarna kan anses vara likvärdiga. Inregleringen klar efter 5-6 sekunder. Figurer på sidan 10 i appendix.

Styrsignalerna u_1 och u_2:

Vid ostyrt system har vi konstanta värden på styrsignalerna, $u_1 = \frac{V}{\beta\tau s} s0 = -0.0712$ och $u_2 = 0$. u_1 har samma förlopp för alla styrlagarna. Intressant att se är emellertid att det negativa startvärdet på u_1 blir numeriskt mindre då vi bestraffar σ' och n, vilket skulle tala för användandet av $Q_1 = \mathrm{diag}(10,10,1,1,1,1,1,1)$.
Vad beträffar u_2 gäller emellertid raka motsatsen. Här har $Q_1 = \mathrm{diag}(10,10,1,1,1,1,1,1)$ dock fördelen att u_2 går mot noll snabbare. Figurer i appendix, sid 11.
En viss amplitudskillnad föreligger mellan modellerna vad beträffar u_2 (se sid 12 i appendix).

Ur denna undersökning kan vi nu draga slutsatsen, att mellan den linjära och den olinjära modellen råder ingen skillnad vad beträffar svängningarnas periodtider. Vad det gäller skillnader i amplituden hos svängningarna, kan dessa väsentligen lokaliseras till tillstånden σ' och n samt i viss mån även till g_f. De största skillnaderna står att finna hos tillståndet n, vilket är ganska naturligt eftersom i detta tillstånd ingår de flesta olinjäriteterna. De av systemekvationerna, som beskriver turbinen är redan i den olinjära modellen linjäriserade, och det är därför inte oväntat att skillnaderna mellan modellerna knappast är märkbara vad beträffar härav berörda tillstånd (g och h). Skillnaderna i g_f kan lämpligen förklaras av att g_f påverkas direkt av styrsignalen u_2, samt att denna i sin tur har vissa amplitudskillnader mellan modellerna. För effektsteg upp till 50% av fullast kan den linjära approximationen vara fullt tillräcklig vid studium av systemet. Vid mindre effektsteg är skillnaderna mellan modellerna obetydliga, t.ex. vid effektsteg på 10% av fullast är de knappast märkbara. Detta rättfärdigar teorin att linjärisera de givna olinjära systemekvationerna kring sluteffekten och använda den väl utvecklade linjära teorin vid studium av systemet.

Vad beträffar de använda styrlagarna kan dessa i stort anses vara likvärdiga då det gäller att reglera tillstånden ψ_F, V_F, V_S, g, g_f och h, medan $Q_1 = \text{diag}(10,10,1,1,1,1,1,1)$ är att föredraga för regleringen av σ' och n. Man kan då även tänka sig att undersöka en styrlag med ännu hårdare "bestraffning" på σ' och n, men eftersom $Q_1 = \text{diag}(10,10,1,1,1,1,1,1)$ har inreglerat alla tillstånd efter 5 sekunder på ett utmärkt sätt, kan vi anse oss nöjda med denna styrning.

Vi redovisar simuleringen i tabellform för $Q_1 = \text{diag}(10,10,1,1,1,1,1,1)$ och PSTEG = -0.50, se sid 13-15.

AUTOMATISK PLOTTNING

Simuleringsprogrammet kan modifieras så,att vi får automatisk plottning av tillstånden och styrsignalerna.Plottningen utföres med en subroutine RITA,som finns lagrad på magnetband.
Värdena på vissa av de parametrar,vilka ingår i RITA,ändrar vi ej under exekveringen,och för att komma ifrån olägenheten,att varje gång RITA anropas behöva skriva ut dessa konstanta värden,bildar vi en ny subroutine,KURVA,med följande utseende:

```
SUBROUTINE KURVA(Y,X0,Y0,YMIN,YMAX)
DIMENSION Y(100)
CALL RITA(Y,100,X0,Y0,0.,1.,YMIN,YMAX,1.,10.,6.,-1,1,10,1,1,0)
RETURN
END
```

Anropet av RITA sker således i KURVA,och som parametrar i denna senare subroutine väljer vi alltså de parametrar i RITA,vilka ges nya värden för varje plottat diagram,t.ex. vilken variabel plottningen avser (fältet Y),koordinaterna för nytt origo uttryckt i föregående systems koordinater och minimalt och maximalt värde i y-led.
Programmet för plottningen blir då som följer:

```
C       HUVUDPROGRAM 3.
C       PLOTTNING AV DEN OLINERA SIMULERINGEN
        CALL UPLOTS(DUMMY,DUMMY)
        DIMENSION YIN(10),YUT(10),S(2,8),Q1(8),V(2)
        DIMENSION Y1(100),Y2(100),Y3(100),Y4(100),Y5(100),Y6(100),
       *Y7(100),Y8(100),U1(100),U2(100)
        EXTERNAL FUNC
        COMMON/SYST/ BETA,H,D,U,XD0,XQ0,XD2,B,XL,TD0,TE,YE,TS,SIGMA,
       *TG,TA,TW,FREKV,W0,XD1,XQ1,XD,VD,VQ,VT,VT1,VT0,P0,DELTA0,PSI0,VF0,
       *VS0,V
        READ(5,1) BETA,H,D,U,XD0,XQ0,XD2,B,XL,TD0,TE,YE,TS,SIGMA,TG,TA,
       *TW,FREKV
1       FORMAT(9F8.5/9F8.5)
        XQ1=(1.-XL*B)*XQ0+XL
        XD1=(1.-XL*B)*XD0+XL
        XD=(1.-XL*B)*XD2+XL
        W0=6.2832*FREKV
        READ(5,2) TDIFF
2       FORMAT(F5.3)
        TAUD=BETA*TDIFF
50      READ(5,3) N
3       FORMAT(I3)
        IF(N-100) 4,100,100
4       READ(5,5) P0,FI0
5       FORMAT(2F8.3)
```

```
      CALL STAT(DELTA0,PSI0,VF0,VS0,P0,FI0,Q0,EFF,
     *U,B,XQ0,TD0,XD0,XD2,YE,XL,V10,BETA,TS)
      VD0=XQ0*U*SIN(DELTA0)/XQ1
      VQ0=XL*PSI0/(XD1*TD0)+XD0*U*COS(DELTA0)/XD1
       VT0=SQRT(VD0**2+VQ0**2)
40    READ(5,6) M
6     FORMAT(I3)
      IF(M-100) 7,50,50
7     READ(5,8) ((S(I,J),J=1,8),I=1,2)
8     FORMAT(8F9.4/8F9.4)
      READ(5,9) (Q1(I),I=1,8)
9     FORMAT(8F4.1)
30    READ(5,10) K
10    FORMAT(I3)
      IF(K-100)11,40,40
11    READ(5,12) P1
12    FORMAT(F8.3)
      CALL STAT(DELTA1,PSI1,VF1,VS1,P1,FI0,Q01,EFF,
     *U,B,XQ0,TD0,XD0,XD2,YE,XL,V11,BETA,TS)
      PSTEG=P1-P0
      CALL TURBBV(PSTEG,HAST1,G1,GF1,HE1,SIGMA)
      YIN(1)=DELTA1-DELTA0
      YIN(2)=HAST1
      YIN(3)=PSI1-PSI0
      YIN(4)=VF1-VF0
      YIN(5)=VS1-VS0
      YIN(6)=G1
      YIN(7)=GF1
      YIN(8)=HE1
      YIN(9)=0.
      YIN(10)=0.
      Y1(0)=YIN(1)
      Y2(0)=YIN(2)
      Y3(0)=YIN(3)
      Y4(0)=YIN(4)
      Y5(0)=YIN(5)
      Y6(0)=YIN(6)
      Y7(0)=YIN(7)
      Y8(0)=YIN(8)
      CALL MULT(S,YIN,V,2,1,8)
      V(1)=V(1)+V10
      U1(0)=V(1)
      U2(0)=V(2)
      T=0.00
      TAU=0.00
      LB=0
      DO 16 I=1,100
      DO 15 J=1,10
      CALL RK1ST(TAU,YIN,TAUD,YUT,10,FUNC)
      CALL MULT(S,YUT,V,2,1,8)
      V(1)=V(1)+V10
      T=T+TDIFF
      TAU=TAU+TAUD
      DO 15 L=1,10
15    YIN(L)=YUT(L)
      LB=LB+1
```

```
      Y1(LB)=YUT(1)
      Y2(LB)=YUT(2)
      Y3(LB)=YUT(3)
      Y4(LB)=YUT(4)
      Y5(LB)=YUT(5)
      Y6(LB)=YUT(6)
      Y7(LB)=YUT(7)
      Y8(LB)=YUT(8)
      U1(LB)=V(1)
16    U2(LB)=V(2)
      CALL KURVA(Y1,0.,3.,-0.75,0.75)
      CALL KURVA(Y2,0.,7.,-0.075,0.075)
      CALL KURVA(Y3,0.,7.,-5.,1.)
      CALL KURVA(Y4,15.,-14.,-2.,4.)
      CALL KURVA(Y5,0.,7.,-2.,1.)
      CALL KURVA(Y6,0.,7.,-0.6,0.)
      CALL KURVA(Y7,15.,-14.,-0.06,0.06)
      CALL KURVA(Y8,0.,7.,-0.6,0.)
      CALL KURVA(U1,0.,7.,-4.,2.)
      CALL KURVA(U2,15.,-14.,-2.,1.)
      CALL PLOTTA(15.,-3.,-3)
      GO TO 30
100   CONTINUE
      END
```

Resultat av denna plottning vissa i appendix, sid 16 -25, för dels ostyrt system samt dels för styrt system, och då för styrlagarna $Q_1 = \mathrm{diag}(1,1,1,1,1,1,1,1)$ samt $Q_1 = \mathrm{diag}(10,10,1,1,1,1,1,1)$.

Konventionell styrning.

Vi skall nu titta på systemet då vi återkopplar endast från två tillstånd, nämligen frekvensavvikelsen samt avvikelsen hos terminalspänningen.

Styrlagen beräknas med liknande metod som i det fulloptimala fallet, d.v.s. minimering av enlineärkvadratisk kostnadsfunktion. Då vi nu inte mäter alla tillstånden, kan man emmellertid inte direkt ta fram en entydig styrlag. Denna blir nämligen oftast beroende av systemets initialtillstånd. Men om vi antar att dessa är en normalfördelad stokastisk variabel med känt medelvärde och kovarians, redugeras problemet tillaatt bestämma en lineär, (tidsinvariant), återkoppling med given struktur, så att kostnadsfkns medelvärde minimeras. Vid beräkningen av den suboptimala styrlagen utnyttjar vi denredan beräknade fulloptimala styrlagen L^* samt den till L^* hörande S^*-matrisen ($u=-L^*x, L^*=Q_2^{-1}B^TS^*$).

Betrakta nu en godtycklig tidsinvariant styrlag

$u=-Lx$

Det slutna systemet är då

$\dot{x}=(A-BL)x$ initialtillstånd: $x(0)$

och den till L hörande kostnadsfkn

$$V(L)=\int_0^\infty (x^T(s)Q_1x(s) + x^T(s)L^TQ_2Lx(s))\, ds$$

Inför den mot $(A-BL)$ svarande fundamentalmatrisen $F_L(t;t_0)$.

$\dot{F}_L=(A-BL)F_L$ $F_L(t_0;t_0)=I$

Kostnadsfkn blir då

$V(L)=x^T(0)S(L)x(0)$

där

$$S(L)=\int_0^\infty F_L^T(s;0)(Q_1 + L^TQ_2L)F_L(s;0)\, ds$$

S(L) existerar om det slutna systemet $(A-BL)$ är asymptotiskt stabilt och det kan sedan visas att S(L) är en entydig lösning till den algebraiska ekvationen

$$(A-BL)^T S(L) + S(L)(A-BL) = -Q_1 - L^T Q_2 L$$

Om vi från denna ekvation subtraherar Riccatiekvationen för det fulloptimala fallet får vi:

$$(A-BL)^T (S(L) - S^*) + (S(L) - S^*)(A - BL) = -(L-L^*)^T Q_2 (L-L^*)$$

Ett explicit uttryck för lösningen är

$$S(L) - S^* = \int_0^\infty F_L^T(s;0)(L - L^*)^T Q_2 (L - L^*) F_L(s;0)\, ds$$

d.v.s. $S(L) \geq S^*$ då $L \neq L^*$.

Låt oss nu anta att återkopplingsmatrisen $L=(l_{ij})$ skall ha en bestämd struktur, nämligen $l_{ij}=0$ då återkoppling från tillstånd j till ingång i, ej önskas. Med denna struktur blir styrlagen som minimerar V(L) olika för olika initialtillstånd, d.v.s. man skulle behöva ett flertal styrlagar för att kunna föra systemet till ett och samma sluttillstånd från olika startvärden. Om vi istället antar att dessa (X(0)) är en normalfördelad stokastisk variabel, med medelvärdet

$$E(x(0)) = m$$

och kovariansmatrisen

$$E((x(0)-m)(x(0)-m)^T) = R$$

Då skall styrlagen L minimera förväntningsvärdet av förlustfunktionen

$$\mu(L) = E(x^T(0) S(L) x(0))$$

eller förväntningsvärdet av avvikelsen från den optimala strategin

$$\mu(L) = E(x^T(0)(S(L) - S^*) x(0))$$

Då x(0) är normalfördelad, är detta ekvivalent med

$$\mu(L) = m^T (S(L) - S^*) m + \text{spåret}((S(L) - S^*) R)$$

eller

$$\mu(L) = \text{spåret}((S(L) - S^*)(R + mm^T))$$

Som framgår av ekvationen nederst på föregående sida,kan mm^T inkluderas i kovariansmatrisen R. Detta utnyttjas i programmet SUBOP.

Vi återgår nu till vårt speciella system. Som nämdes i inledningen,vill vi återkoppla från generatorns terminalspänning. Denna ingår inte som tillståndsvariabel i det system vi har undersökt men den kan bildas som en olineär funktion av två ingående variabler,nämligen δ' och Ψ_F' . Ekvationen lyder

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2$$

a=U XQ0/XQ1

b=XL/(XD1 TD0)

c=U XD0/XD1

$$V_d = a\sin\delta$$

$$V_q = b\Psi_F + c\cdot\cos\delta$$

d.v.s

$$V_t^2 = a^2\sin^2\delta + b^2\Psi_F^2 + c^2\cos^2\delta + 2bc\Psi_F\cos\delta$$

Vi differentierar och får

$$2V_{t0}\,V_t' = 2a^2\sin\delta_0\cos\delta_0\cdot\delta' + 2b^2\Psi_{F0}\cdot\Psi_F' - 2c^2\cos\delta_0\sin\delta_0\cdot\delta' +$$

$$+2bc\,\cos\delta_0\cdot\Psi_F' - 2bc\,\Psi_{F0}\,\sin\delta_0\cdot\delta'$$

Vi kan altså uttrycka V_t' som en lineärkombination av δ' och Ψ_F' .

$$V_t' = k\delta' + 1\cdot\Psi_F'$$

eller om vi kallar den ursprungliga tillståndsvektorn för X, och den nya för X',kan vi skriva

$X' = C\cdot X$ där C är en 8x8-matris

Differentialekvationen

$$\dot{X} = A\cdot X + B\cdot U$$

får då följande utseende

$$C\cdot\dot{X} = C\cdot A\cdot C^{-1}\cdot CX + C\cdot B\cdot U$$

Vi kan altså skriva

$\dot{X} = A'\cdot X' + B'\cdot U$ där $A' = C\cdot A\cdot C^{-1}$; $B' = C\cdot B$;

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k/1 & 0 & 1/1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dessutom kommer "straffmatrisen" Q_1 att transformeras enligt följande

$$X^T\cdot Q_1\cdot X = X'^T\cdot Q_1'\cdot X' = (C\cdot X)^T\cdot Q_1'\cdot(C\cdot X) = X^T\cdot C^T\cdot Q_1'\cdot C\cdot X \quad \Longrightarrow$$

$$Q_1 = C^T\cdot Q_1'\cdot C$$

eller

$$Q_1' = (C^{-1})^T\cdot Q_1\cdot C^{-1}$$

På samma vis med S^* och L^*:

$V = x^T(0)\ S^* x(0) = x'^T(0)\ S^{*\prime}\ x'(0) =$

$(C\ x(0))^T\ S^{*\prime}\ (C\ x(0)) = x^T(0)\ C^T\ S^{*\prime}\ C\ x(0)$

$S^* = C^T\ S^{*\prime}\ C$ eller

$S^{*\prime} = (C^{-1})^T\ S^* C^{-1}$;

$L^* = Q_2^{-1}\ B^T\ S^*$

$L^{*\prime} = Q_2^{-1}\ B'^T\ S^{*\prime} = Q_2^{-1}\ B^T\ C^T\ (C^{-1})^T\ S^* C^{-1} = L^* C^{-1}$;

Nåväl, för att få fram styrlagen behöver vi även kovariansen för initialtillstånden. Vi har här inte för avsikt att göra en rigorös undersökning av systemets statistiska egenskaper, utan vi vill kort och gott jämföra vår fulloptimala styrning med den suboptimala. Problemställningen förenklas så tillvida att endast ett enda initialtillstånd antas inträffa. Då blir $m = x(0)$, vilket medför att kovariansen R blir = 0. Men den kovariansmatris som användes för beräkningen av styrlagen är ju enligt ovan :

$Ro = R + m\ m^T$;

Kovariansmatrisen Ro sättes alltså här till :

$x(0)\ x^T(0)$;

Kovariansmatrisen och de erforderliga transformerna beräknas och utföres i programmet TRANSF.

Beteckningar:

A'	kallas i programmet	R
Q_1'	"	Q1TR
Ro	"	RO
L^*	"	S
$L^{*\prime}$	"	S1

För att förenkla stansningsarbetet, har vi emellertid satt S =0-matrisen. Dessutom fann vi att problemställningen var illa konditionerad då återkoppling göres från endast två tillstånd. Därför gör vi återkoppling från ytterligare två, nämligen V_S och g_f som ju är utsignalerna från regulatorerna och därför lätt åtkomliga för mätning.

Den suboptimala styrlagen beräknas, som nämnts ovan, i programmet SUBOP. Systemet simuleras enligt samma metod som användes i det fulloptimala fallet d.v.s. integrering av de olineära ekvationerna med hjälp av subroutinen RK1ST. Dock får vissa ändringar göras i programmet då vi nu inför ett nytt tillstånd, V_T. V_T är ju, som visats ovan, en olineär kombination av Ψ_f och δ. I programmet utnyttjar vi detta samband istället för det lineariserade. Det simulerade systemet plottas också m.h. a. subroutinen RITA.

För en direkt jämförelse mellan det fulloptimala fallet och det suboptimala, har vi plottat de båda fallens insvängningsförlopp i samma diagram. Härvid är att märka att vi för det suboptimala fallet, istället för tillståndsvariabeln V_T, har plottat Ψ_f' för jämförelsens skull.
Se appendix sid. 26-29.

Vi finner att för samtliga tillstånd, ger den fullopt. styrningen det bättre insvängningsförloppet. Genomgående är den subopt. styrningen mer oscillativ och har ett långsammare insvängningsförlopp. Särskilt märkbar är denna tendens i tillståndet n (HAST), d.v.s. avvikelsen hos vinkelfrekvensen (tidsskalat). Detta tillstånd är ju kanske det som man vill ha snabbast inreglerat.

Vi kan altså sluta oss till att den fulloptimala styrningen bör ge en tillförlitligare och snabbare reglering av systemet.

```
C     HUVUDPROGRAM TRANSF  BEREKNAR DEN TRANSFORMERADE A-MATRISEN
C     R=C*A*CINV
C     DEN TRANSFORMERADE Q1-MATRISEN Q1TR SAMT KOVARIANSMATRISEN R0
      DIMENSION A(8,8),C(8,8),R(8,8),CINV(8,8),SLASK(8,8),SLASK1(8,8)
     *,DINV(8,8),Q1(8,8),Q1TR(8,8),DIAG(8),X(8),X0(8),X1(8),R0(8,8)
      DIMENSION S(2,8),S1(2,8)
      READ (5,1) BETA,H,D,U,XD0,XQ0,XD2,BC,XL,TD0,TE,YE,TS,SIGMA,
     *TG,TA,TW,FREKV
1     FORMAT (9F8.5/9F8.5)
      READ(5,13) P0,FI0,P1
13    FORMAT (3F4.2)
      XQ1=(1.-XL*BC)*XD0+XL
      XD1=(1.-XL*BC)*XD0+XL
      XD=(1.-XL*BC)*XD2+XL
      W0=6.2832*FREKV
      CALL STAT(DELTA0,PSI0,VF0,VS0,P0,FI0,Q0,EFF,U,BC,XQ0,TD0,XD0
     *,XD2,YE,XL)
      CALL LIN(A,PSI0,DELTA0,TD0,XD0,XQ0,BETA,H,D,XD2,YE,TE,XL,TS,
     *W0,TG,SIGMA,TA,TW,U,BC,VT0)
      F1=XQ0*U/XQ1
      F2=XL/XD1/TD0
      F3=XD0*U/XD1
      F4=((F1**2-F3**2)*SIN(2.*DELTA0)-2.*F2*F3*PSI0*SIN(DELTA0))/2./VT0
      F5=(2.*F2**2*PSI0+2.*F2*F3*COS(DELTA0))/2./VT0
      DO 3 I=1,8
      DO2 J=1,8
      C(I,J)=0.
2     CINV(I,J)=0.
      C(I,I)=1.
3     CINV(I,I)=1.
      C(3,1)=F4
      C(3,3)=F5
      CINV(3,1)=-F4/F5
      CINV(3,3)=1./F5
      CALL MULT(C,A,SLASK,8,8,8)
      CALL MULT(SLASK,CINV,R,8,8,8)
      DO 8 I=1,8
      DO 8 J=1,8
8     Q1(I,J)=0.
      READ(5,10) (DIAG(I),I=1,8)
10    FORMAT(8F4.1)
      READ(5,30) ((S(I,J),J=1,8),I=1,2)
30    FORMAT(8F8.3)
      CALL MULT(S,CINV,S1,2,8,8)
      DO 9 I=1,8
9     Q1(I,I)=DIAG(I)
      DO 11 I=1,8
      DO 11 J=1,8
11    DINV(I,J)=CINV(J,I)
      CALL MULT(DINV,Q1,SLASK1,8,8,8)
      CALL MULT(SLASK1,CINV,Q1TR,8,8,8)
      CALL STAT(X0(1),X0(3),X0(4),X0(5),P0,FI0,Q0,EFF,U,BC,XQ0,
     *TD0,XD0,XD2,YE,XL)
      CALL STAT(X1(1),X1(3),X1(4),X1(5),P1,FI0,Q01,EFF2,U,BC,XQ0,
     *TD0,XD0,XD2,YE,XL)
      PSTEG=P1-P0
      CALL TURBBV(PSTEG,X1(2),X1(6),X1(7),X1(8),SIGMA)
      CALL TURBBV(0.,X0(2),X0(6),X0(7),X0(8),SIGMA)
      VD1=XQ0*U*SIN(X1(1))/XQ1
      VQ1=XL*X1(3)/(XD1*TD0)+XD0*U*COS(X1(1))/XD1
      VT1=SQRT(VD1**2+VQ1**2)
```

```
      DO 14 I=1,8
14    X(I)=X1(I)-X0(I)
      X(3)=VT1-VT0
      DO 15 I=1,8
      DO 15 J=1,8
15    R0(I,J)=X(I)*X(J)
      WRITE(6,4) ((A(I,J),J=1,8),I=1,8)
4     FORMAT(//6X,10HMATRISEN A,/(4X,8F8.3))
      WRITE(6,5) ((R(I,J),J=1,8),I=1,8)
5     FORMAT(////6X,10HMATRISEN R,/(4X,8F8.3))
      WRITE(6,12) ((Q1TR(I,J),I=1,8),J=1,8)
12    FORMAT(////,6X,13HMATRISEN Q1TR,/(4X,8F8.3))
      WRITE(6,16)((R0(I,J),J=1,8),I=1,8)
16    FORMAT(////,6X,11HMATRISEN R0,/(4X,8F8.3))
      WRITE(6,31)((S1(I,J),J=1,8),I=1,2)
31    FORMAT(//6X,11HMATRISEN L',/(4X,8F8.3))
      END
```

MATRISEN A

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.145	-.003	-.006	.000	.000	.088	.000	.132
-.058	.000	-.025	.137	.000	.000	.000	.000
.124	.000	-.113	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

MATRISEN R

.000	1.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
-.149	-.003	-.069	.000	.000	.088	.000	.132
-.006	-.046	-.025	.011	.000	.000	.000	.000
.061	.000	-1.368	-.137	-1.368	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	-.274	.000	.000	.000
.000	-.027	.000	.000	.000	-.062	-1.368	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	-13.684	.000
.000	.053	.000	.000	.000	.123	2.737	-.171

MATRISEN Q1TR

10.309	.000	6.725	.000	.000	.000	.000	.000
.000	10.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
6.725	.000	146.269	.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	1.000	.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	1.000	.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000	1.000	.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	1.000	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	1.000

MATRISEN RO

.029	.000	.061	.155	.015	.085	-.004	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
.061	.000	.129	.328	.033	.180	-.008	.000
.155	.000	.328	.833	.083	.456	-.021	.000
.015	.000	.033	.083	.008	.046	-.002	.000
.085	.000	.180	.456	.046	.250	-.011	.000
-.004	.000	-.008	-.021	-.002	-.011	.001	.000
.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000

MATRISEN L'

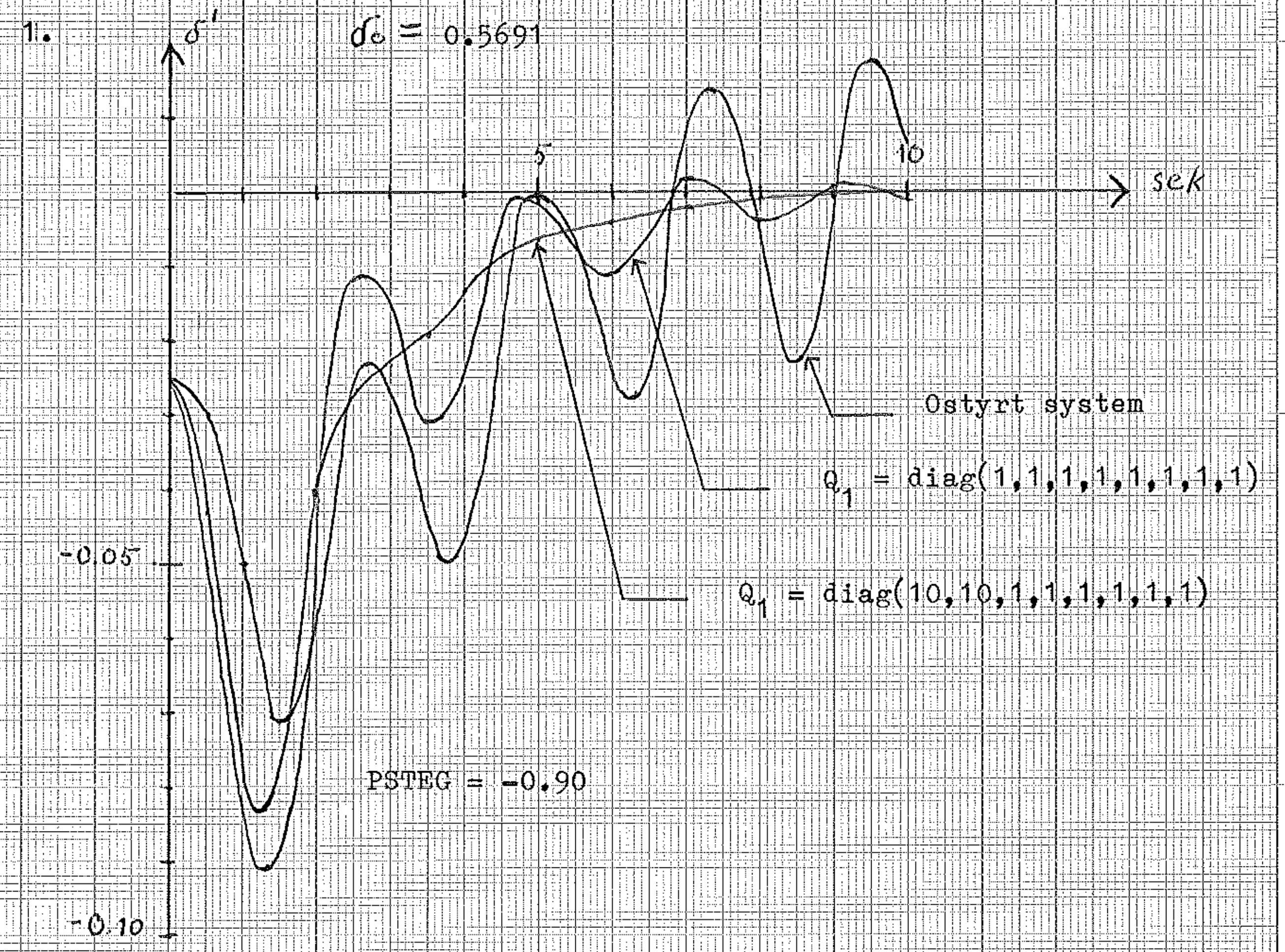
-.698	.250	-8.224	-.960	1.650	.750	.000	.370
.121	8.970	-.847	.000	.000	-1.660	.490	1.490

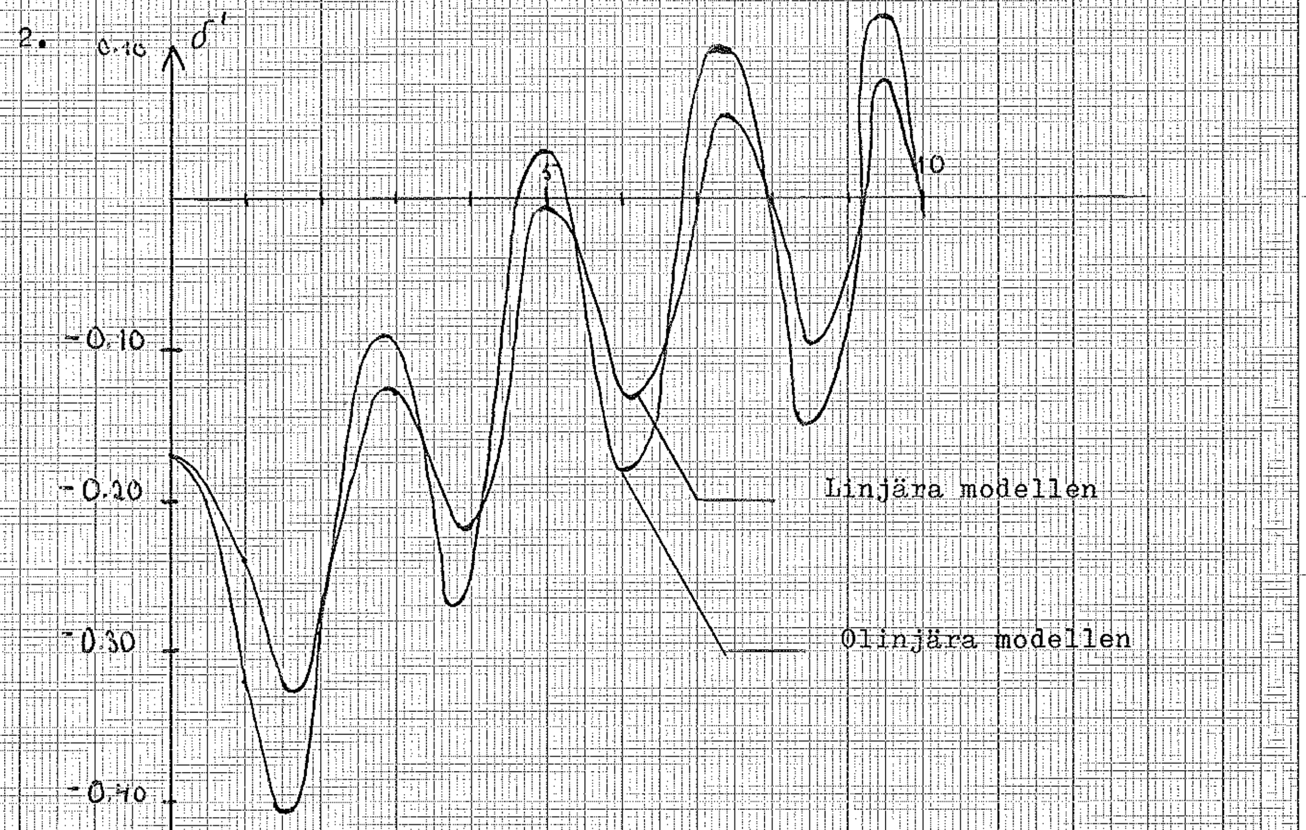
```
C     HUVUDPROGRAM 3.
C     SIMULERING AV DET OLINEARA SYSTEMET MHA SUBROUTINEN RK1ST.
      DIMENSION YIN(10),YUT(10),S(2,8),Q1(8),V(2)
      EXTERNAL FUNC
      COMMON/SYST/ BETA,H,D,U,XD0,XQ0,XD2,B,XL,TD0,TE,YE,TS,SIGMA,
     *TG,TA,TW,FREKV,W0,XD1,XQ1,XD,VD,VQ,VT,VT1,VT0,P0,DELTA0,PSI0,VF0,
     *VS0,V
      READ(5,1) BETA,H,D,U,XD0,XQ0,XD2,B,XL,TD0,TE,YE,TS,SIGMA,TG,TA,
     *TW,FREKV
1     FORMAT(9F8.5/9F8.5)
      XQ1=(1.-XL*B)*XQ0+XL
      XD1=(1.-XL*B)*XD0+XL
      XD=(1.-XL*B)*XD2+XL
      W0=6.2832*FREKV
      READ(5,2) TDIFF
2     FORMAT(F5.3)
      TAUD=BETA*TDIFF
50    READ(5,3) N
3     FORMAT(I3)
      IF(N-100) 4,100,100
4     READ(5,5) P0,FI0
5     FORMAT(2F8.3)
      CALL STAT(DELTA0,PSI0,VF0,VS0,P0,FI0,Q0,EFF,
     *U,B,XQ0,TD0,XD0,XD2,YE,XL,V10,BETA,TS)
      VD0=XQ0*U*SIN(DELTA0)/XQ1
      VQ0=XL*PSI0/(XD1*TD0)+XD0*U*COS(DELTA0)/XD1
       VT0=SQRT(VD0**2+VQ0**2)
40    READ(5,6) M
6     FORMAT(I3)
      IF(M-100) 7,50,50
7     READ(5,8) ((S(I,J),J=1,8),I=1,2)
8     FORMAT(8F9.4/8F9.4)
      READ(5,9) (Q1(I),I=1,8)
9     FORMAT(8F4.1)
30    READ(5,10) K
10    FORMAT(I3)
      IF(K-100)11,40,40
11    READ(5,12) P1
12    FORMAT(F8.3)
      CALL STAT(DELTA1,PSI1,VF1,VS1,P1,FI0,Q01,EFF,
     *U,B,XQ0,TD0,XD0,XD2,YE,XL,V11,BETA,TS)
      PSTEG=P1-P0
      CALL TURBBV(PSTEG,HAST1,G1,GF1,HE1,SIGMA)
      YIN(1)=DELTA1-DELTA0
      YIN(2)=HAST1
      YIN(3)=PSI1-PSI0
      YIN(4)=VF1-VF0
      YIN(5)=VS1-VS0
      YIN(6)=G1
      YIN(7)=GF1
      YIN(8)=HE1
      YIN(9)=0.
      YIN(10)=0.
      YIN(3)=FVT(U,XQ0,XQ1,XD0,XD1,TD0,XL,DELTA0,PSI0,VT0,YIN(1),YIN(3))
```

```
      CALL MULT(S,YIN,V,2,1,8)
      V(1)=V(1)+V10
      YIN(3)=PSI1-PSI0.
      T=0.00
      TAU=0.00
      WRITE(6,13) P0,P1,EFF,(Q1(I),I=1,8)
13    FORMAT(1H1,4X,36HSIMULERING AV DET OLINEARA SYSTEMET.//4X,3HP0=,
     *F5.3,4X,3HP1=,F5.3,4X,4HEFF=,F5.3,4X,8HQ1=DIAG(,F4.1,1H,,F4.1,
     *1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H,,F4.1,1H))
      WRITE(6,18) DELTAO,PSI0,VF0,VS0
18    FORMAT(///5X,52HSTATIONERA VERDEN TILL VILKA INSVENGNINGEN SKALL S
     *KE//4X,7HDELTA0=,F8.4,4X,5HPSI0=,F8.4,4X,4HVF0=,F8.4,4X,4HVS0=,
     *F8.4)
      WRITE(6,19) ((S(I,J),J=1,8),I=1,2)
19    FORMAT(///4X,28HL-MATRISEN I STYRLAGEN U=-LX//4X,8F9.4/4X,8F9.4)
      WRITE(6,14) T,(YIN(I),I=1,8),(V(J),J=1,2)
14    FORMAT(///4X,1HT,4X,9HDELTA-DEV,3X,4HHAST,3X,7HPSI-DEV,3X,
     *6HVF-DEV,3X,6HVS-DEV,5X,1HG,7X,2HGF,7X,2HHE,17X,2HU1,7X,2HU2
     *//2X,F5.2,1X,8F9.4,11X,2F9.4)
      DO 16 I=1,100
      DO 15 J=1,10
      CALL RK1ST(TAU,YIN,TAUD,YUT,10,FUNC)
      SLASK=YUT(3)
      YUT(3)=FVT(U,XQ0,XQ1,XD0,XD1,TD0,XL,DELTA0,PSI0,VT0,
     *YUT(1),YUT(3))
      CALL MULT(S,YUT,V,2,1,8)
      V(1)=V(1)+V10
      YUT(3)=SLASK
      T=T+TDIFF
      TAU=TAU+TAUD
      DO 15 L=1,10
15    YIN(L)=YUT(L)
16    WRITE(6,17) T,(YUT(L),L=1,8),(V(IA),IA=1,2)
17    FORMAT(2X,F5.2,1X,8F9.4,11X,2F9.4)
      GO TO 30
100   CONTINUE
      END
```

```
      FUNCTION FVT(U,XQ0,XQ1,XD0,XD1,TD0,XL,DELTA0,PSI0,VT0,
     *YUT1,YUT3)
      VD=XQ0*U*SIN(YUT1+DELTA0)/XQ1
      VQ=XL*(YUT3+PSI0)/(XD1*TD0)+XD0*U*COS(YUT1+DELTA0)/XD1
      VT=SQRT(VD**2+VQ**2)
      FVT=VT-VT0
      RETURN
      END
```

Appendix
sid 1.

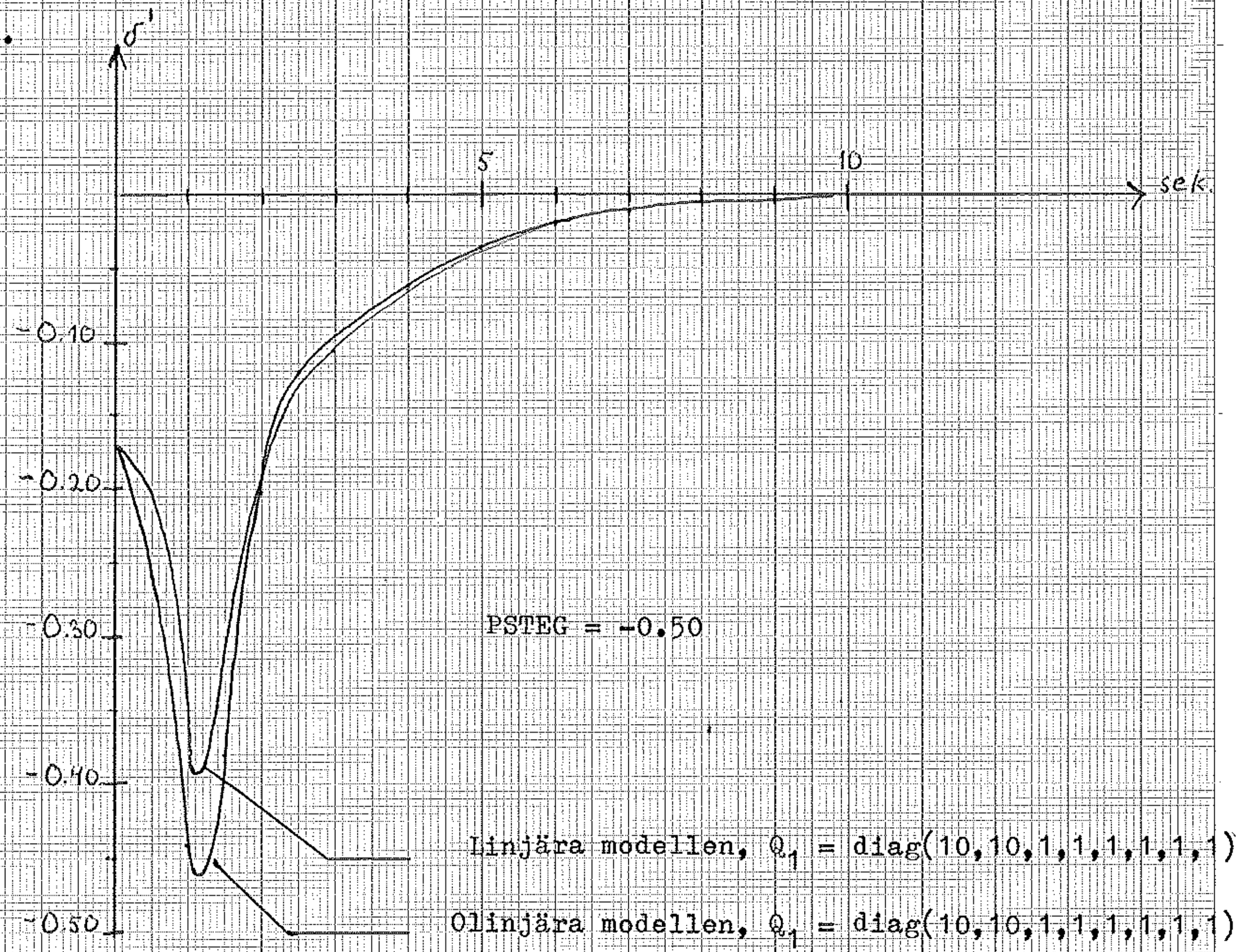




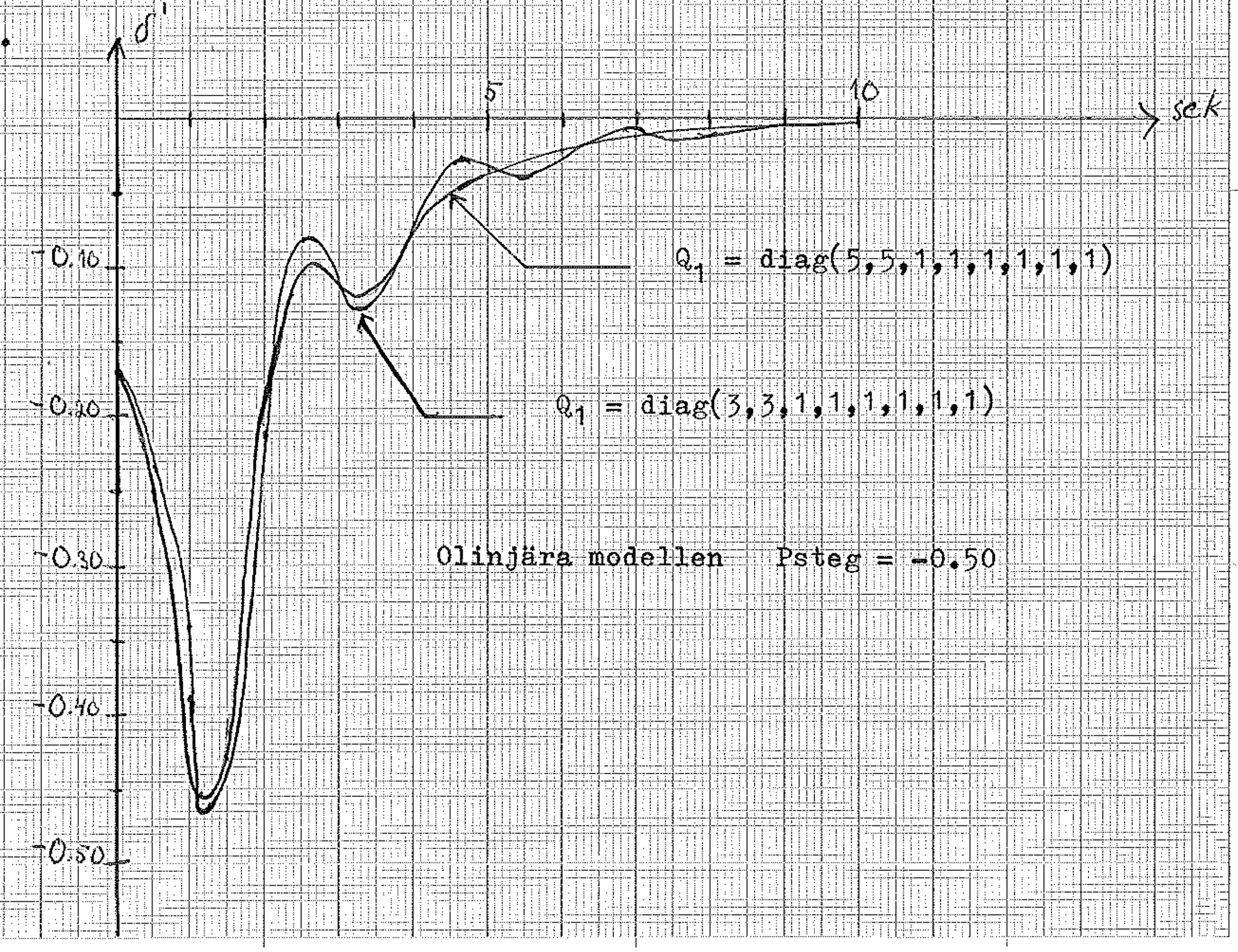
Linjära och olinjära modellerna utan styrning

PSTEG = -0.50

1.

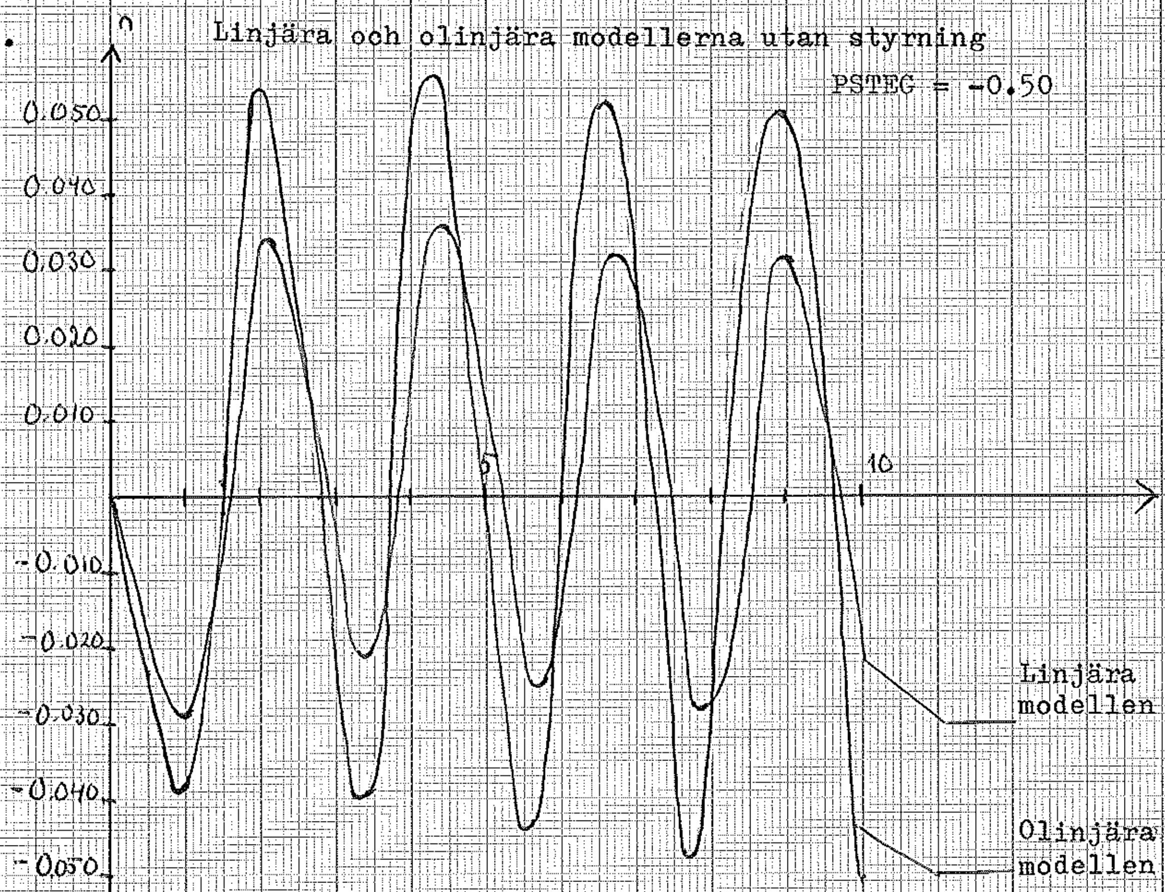

σ'
5
10
sek.
-0.10
-0.20
-0.30
-0.40
-0.50
PSTEG = -0.50
Linjära modellen, Q1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1)
Olinjära modellen, Q1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1)

2.


σ'
5
10
sek
-0.10
-0.20
-0.30
-0.40
-0.50
Q1 = diag(5,5,1,1,1,1,1,1)
Q1 = diag(3,3,1,1,1,1,1,1)
Olinjära modellen Psteg = -0.50

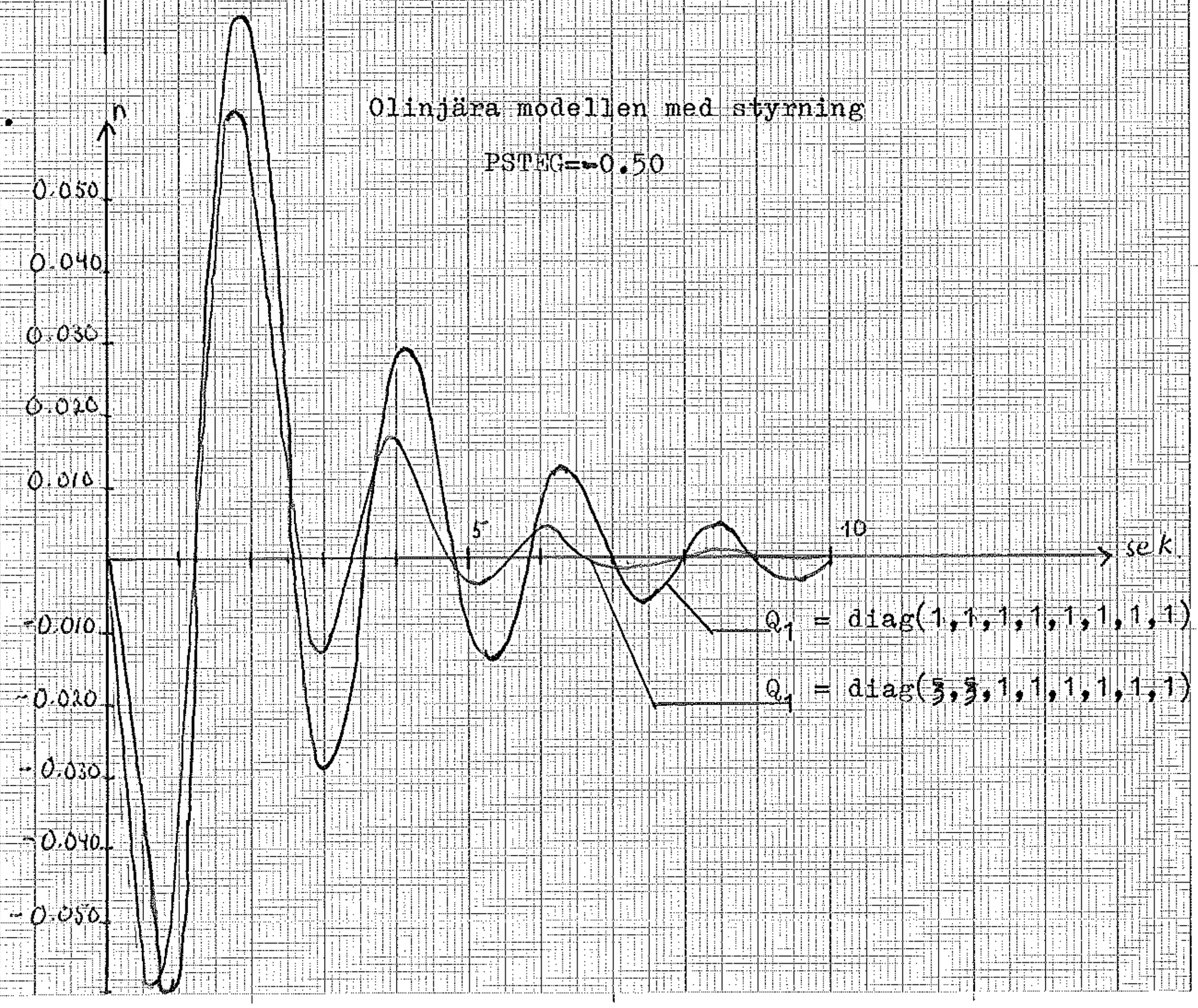
1\. Linjära och olinjära modellerna utan styrning

PSTEG = -0.50

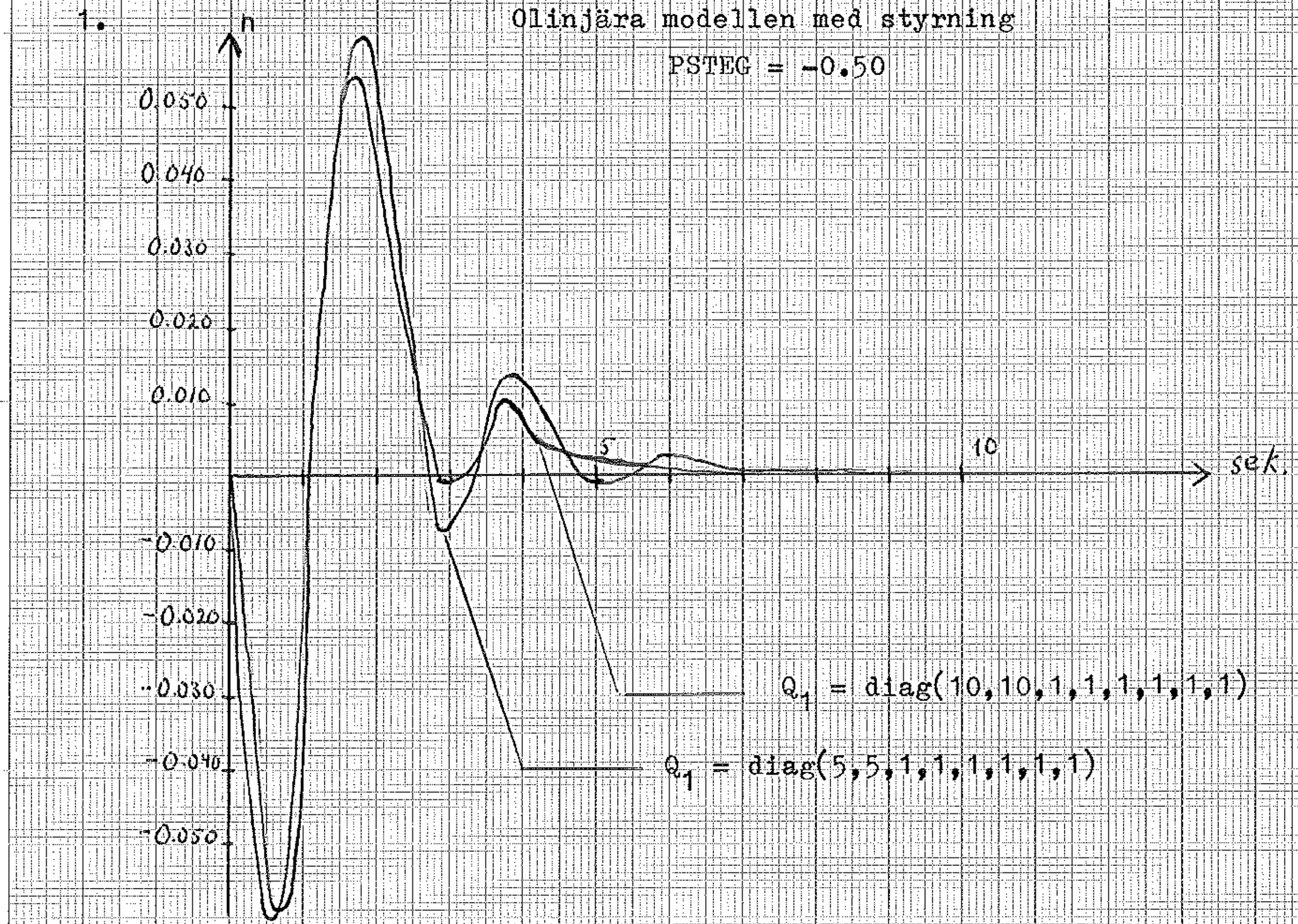


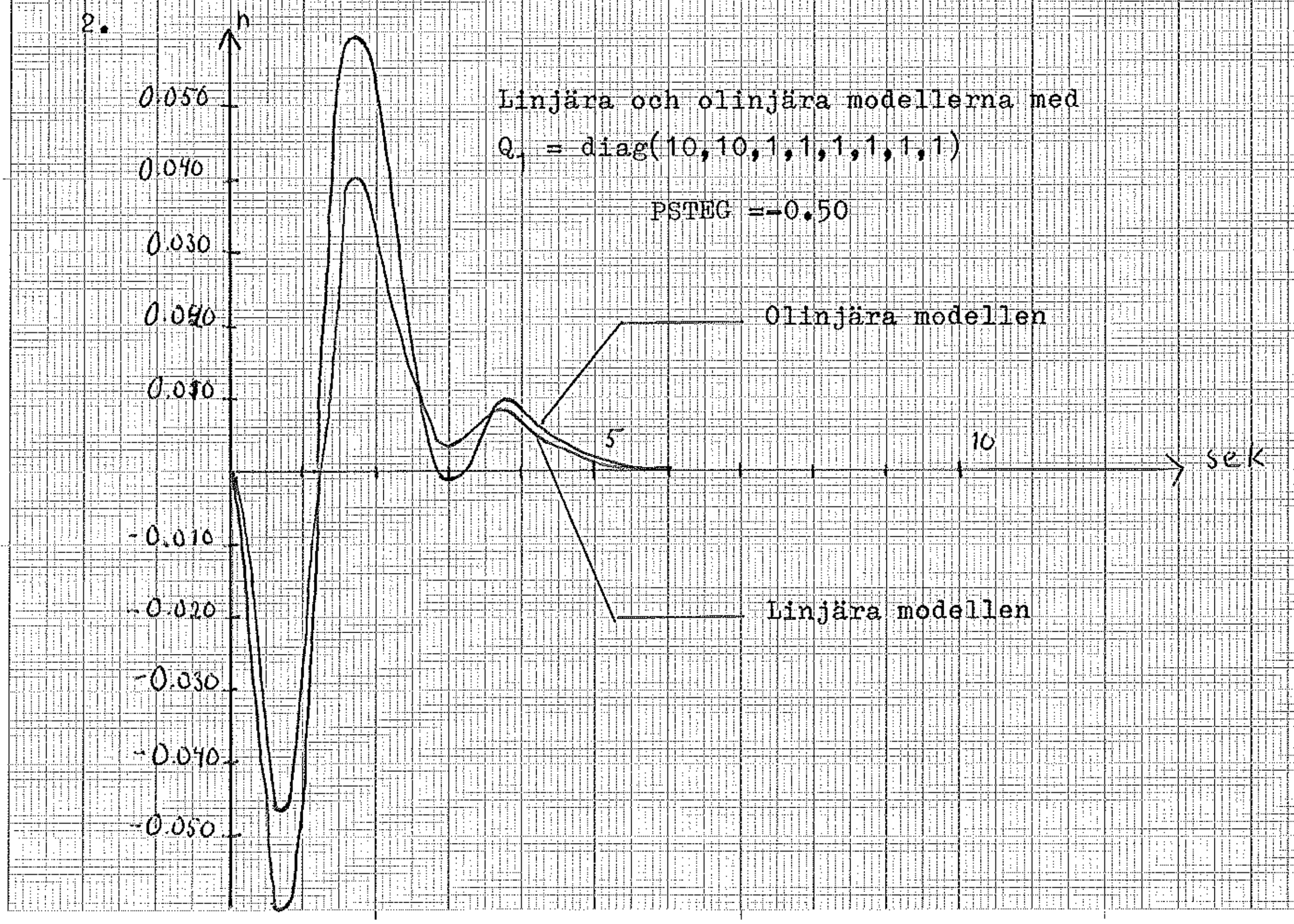
2\. Olinjära modellen med styrning

PSTEG=-0.50



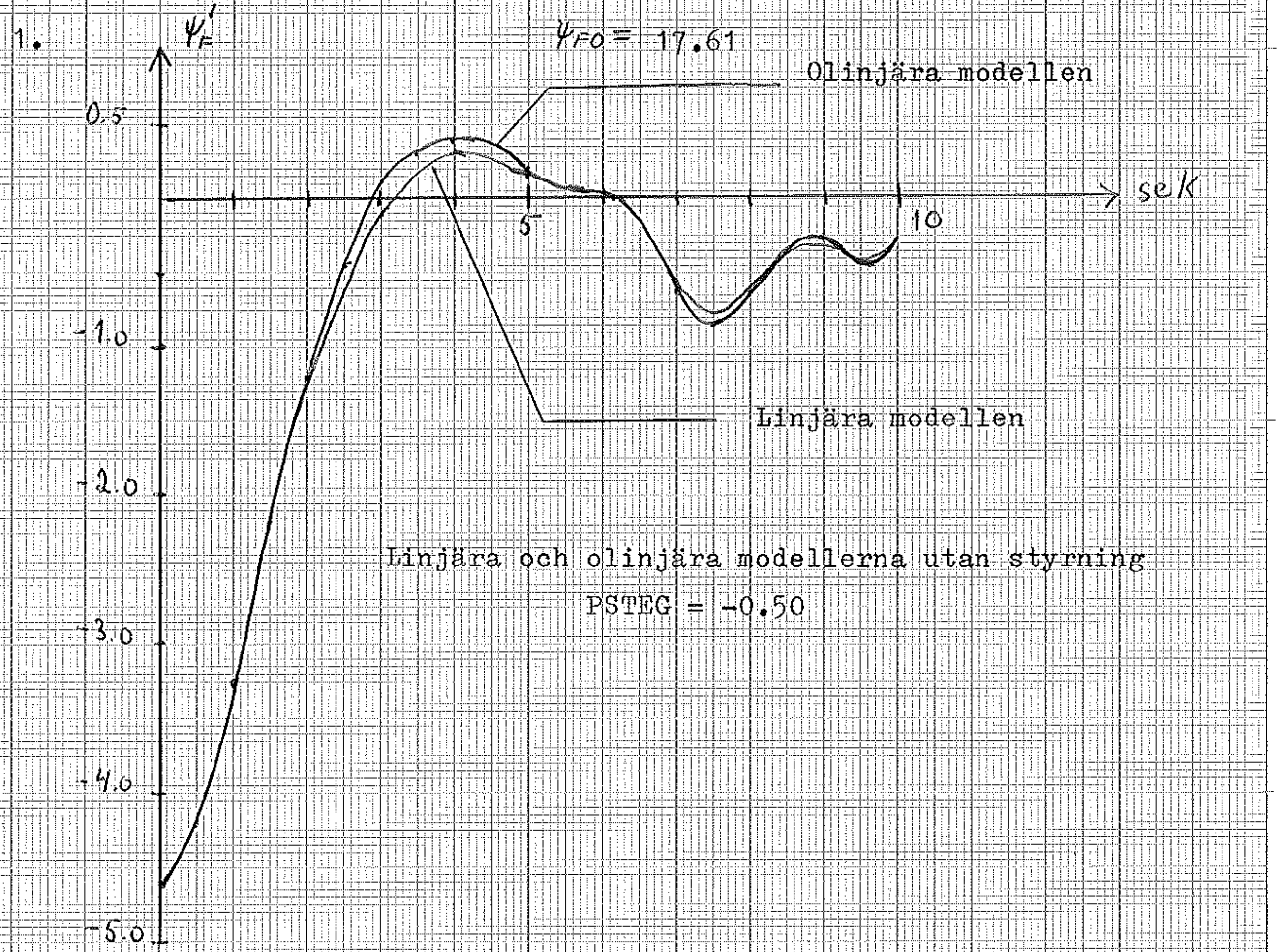
514 A4
SIS 73 25 01
Nr 1624


1.
Olinjära modellen med styrning
PSTEG = -0.50
h
0.050
0.040
0.030
0.020
0.010
-0.010
-0.020
-0.030
-0.040
-0.050
5
10
sek.
Q1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1)
Q1 = diag(5,5,1,1,1,1,1,1)


2.
Linjära och olinjära modellerna med
Q1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1)
PSTEG = -0.50
h
0.050
0.040
0.030
-0.010
-0.020
-0.030
-0.040
-0.050
5
10
sek
Olinjära modellen
Linjära modellen

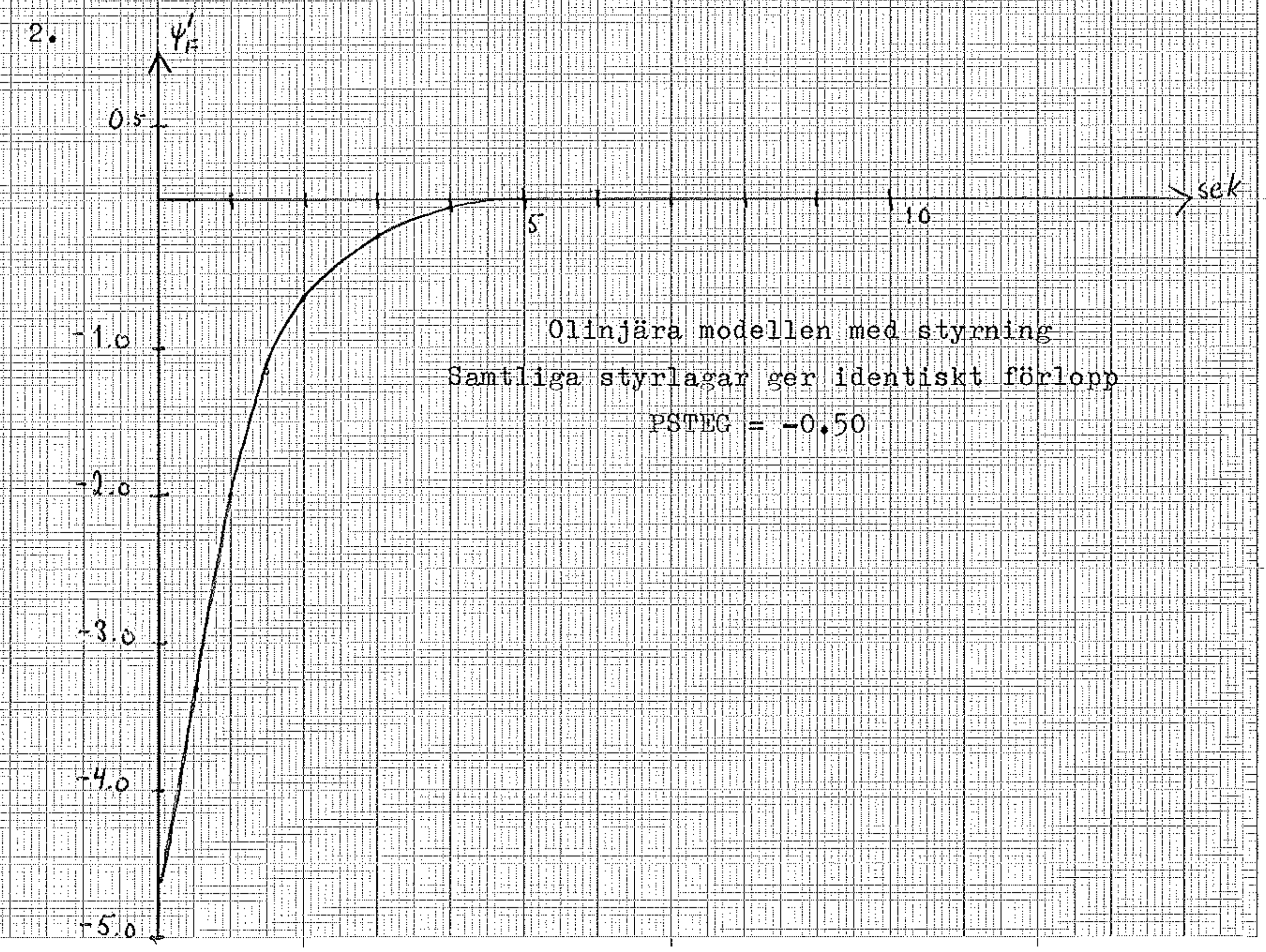
Appendix
sid 5.

1.



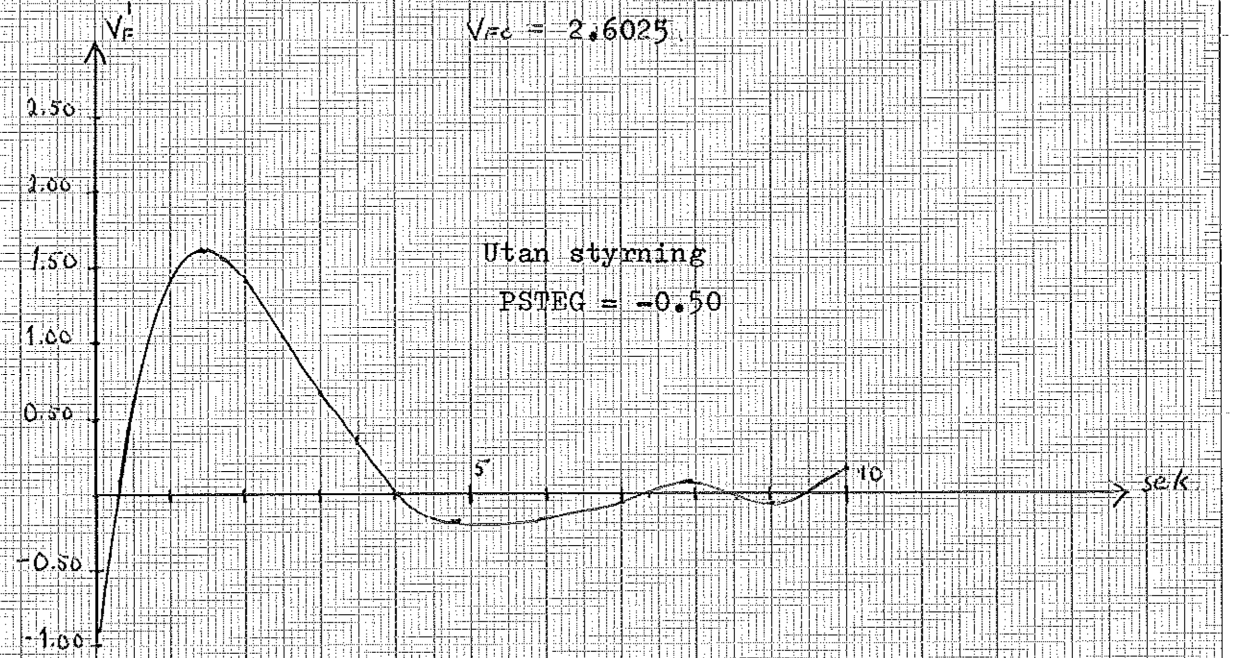
Linjära och olinjära modellerna utan styrning
PSTEG = -0.50

2.

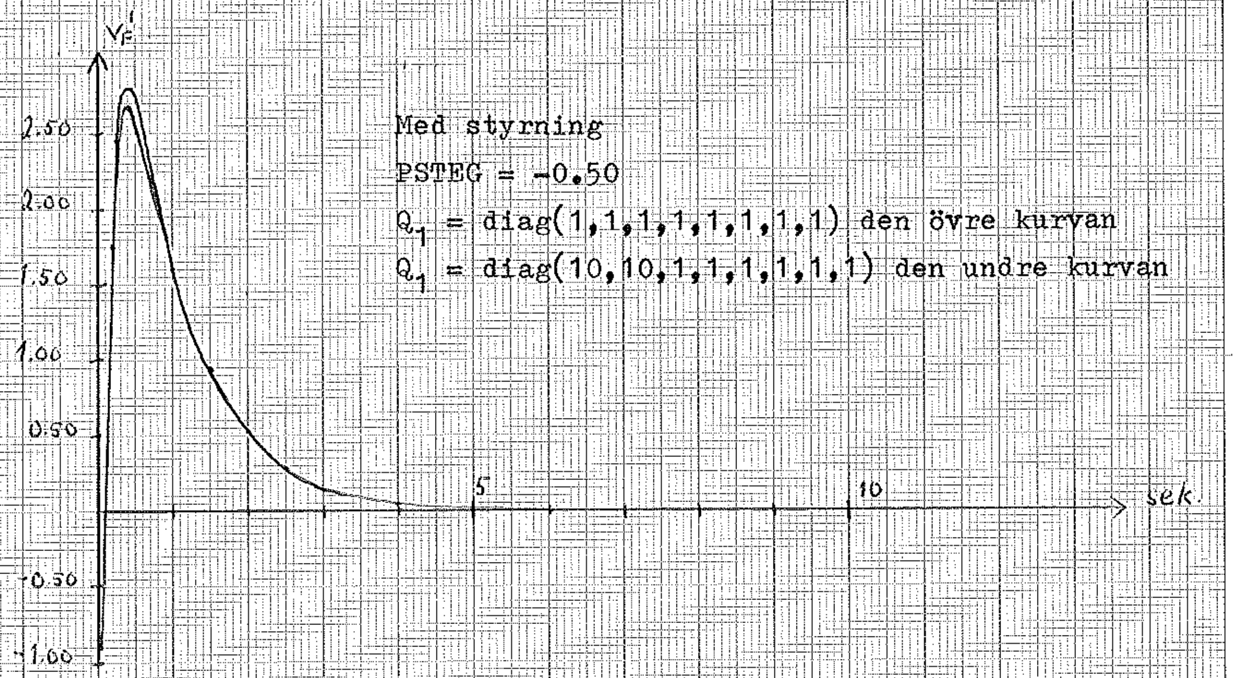


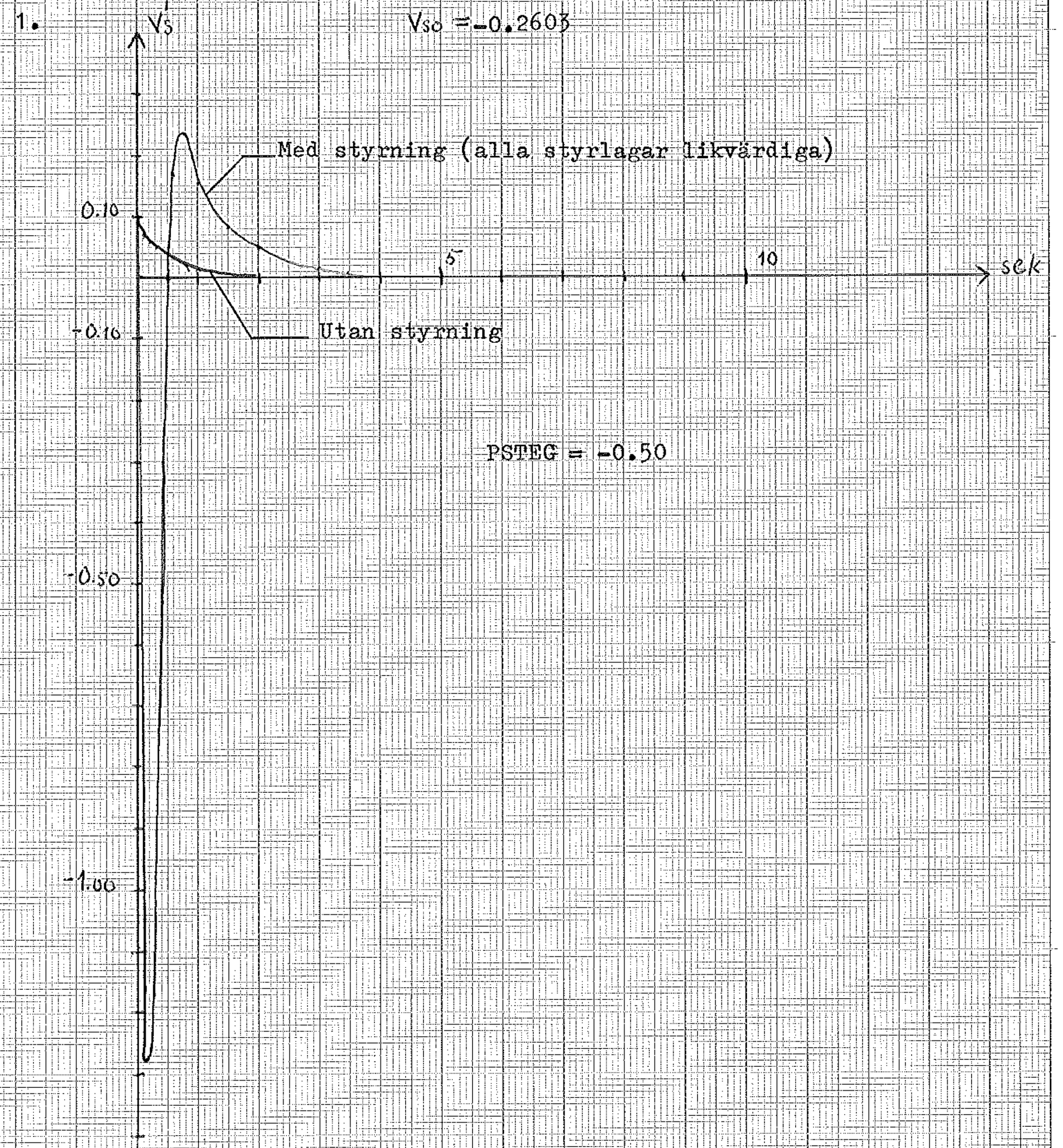
Olinjära modellen med styrning
Samtliga styrlagar ger identiskt förlopp
PSTEG = -0.50

1.


V'F
VFc = 2.6025
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
-0.50
-1.00
5
10
sek
Utan styrning
PSTEG = -0.50

2.

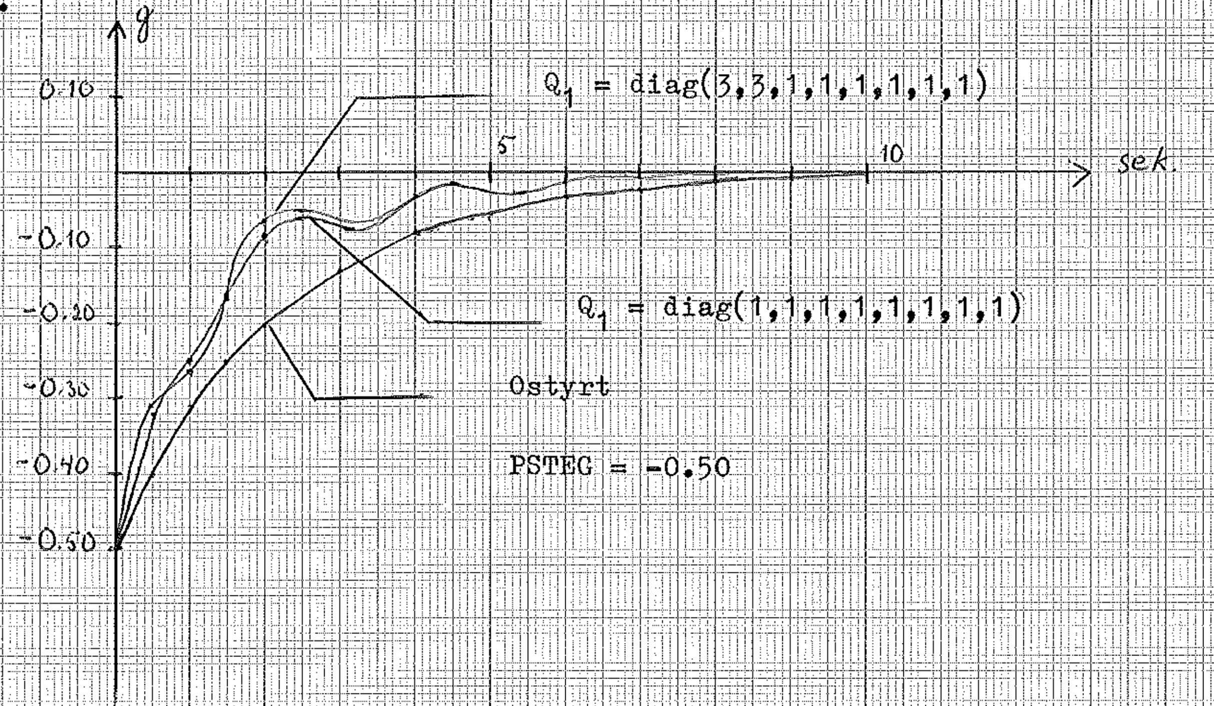

V'F
2.50
2.00
1.50
1.00
0.50
-0.50
-1.00
5
10
sek
Med styrning
PSTEG = -0.50
Q1 = diag(1,1,1,1,1,1,1,1) den övre kurvan
Q1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1) den undre kurvan



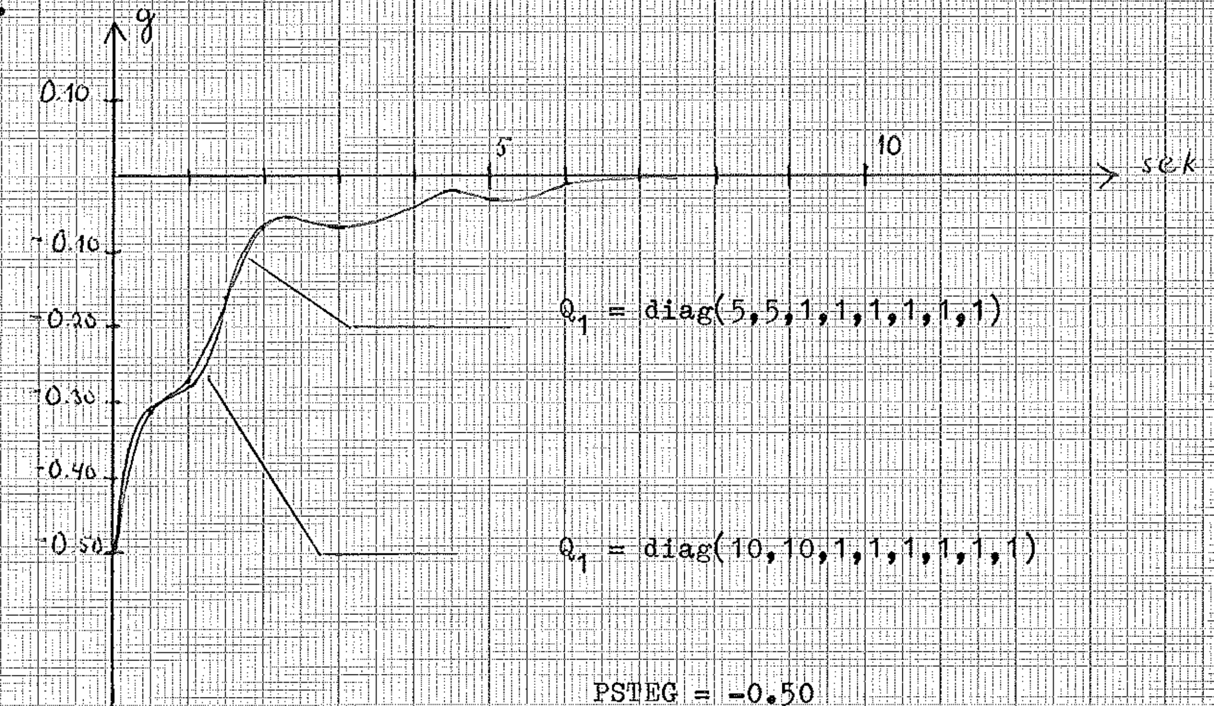
514 A4
SIS 73 25 01
Nr 1624

Appendix
sid 8.

1.

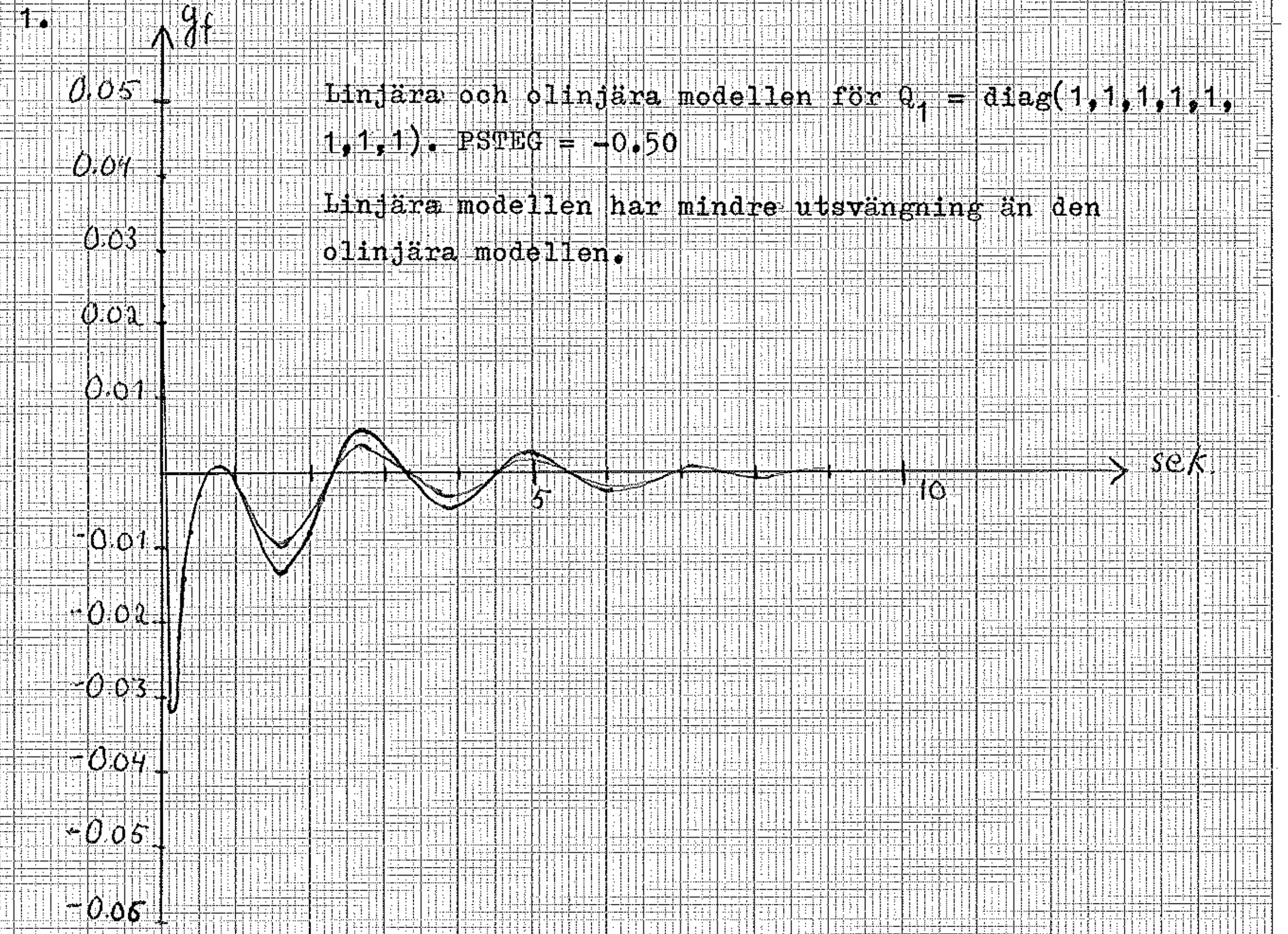


2.



514 A4
SIS 73 25 01
Nr 1624

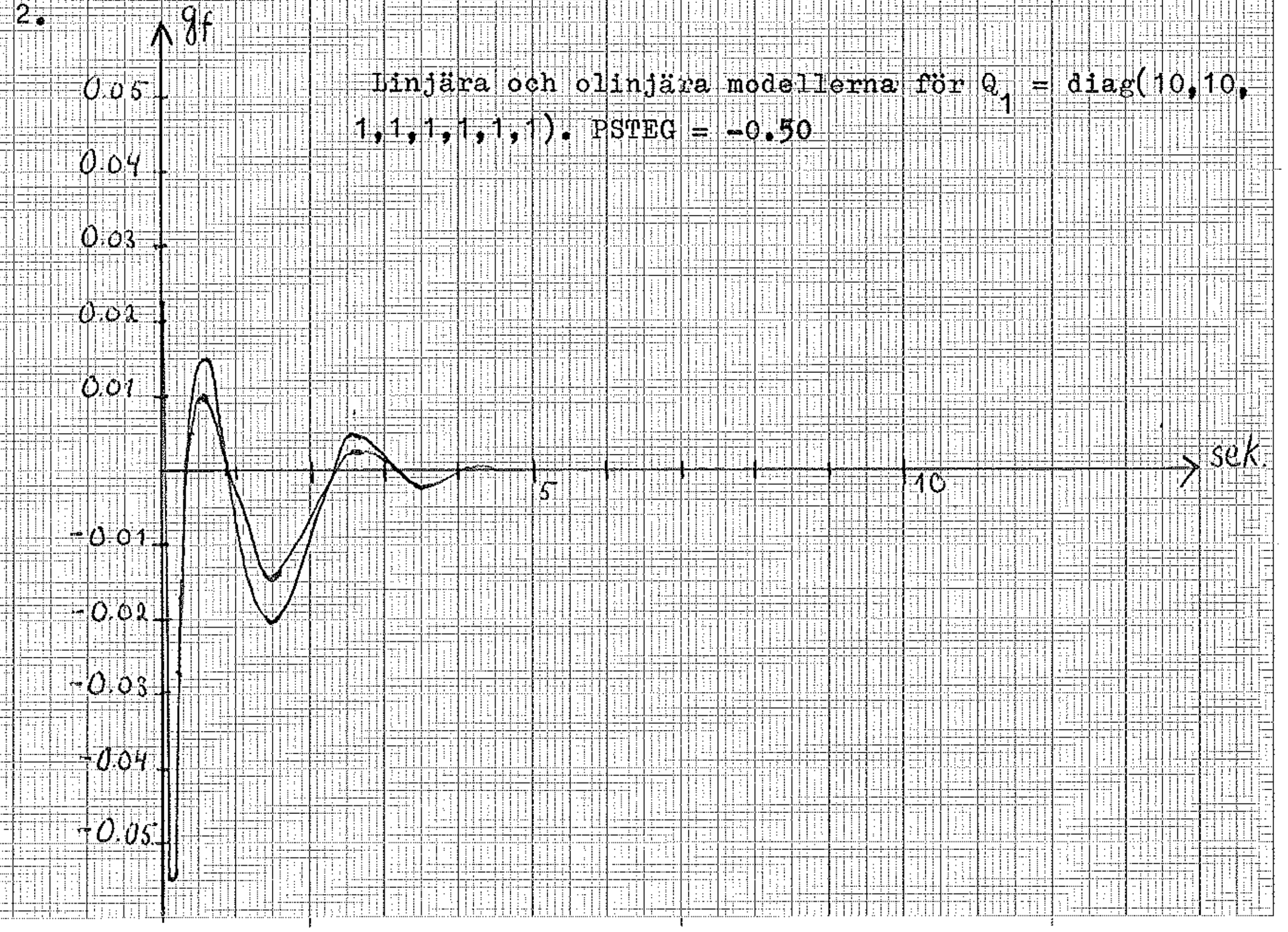
1.



Linjära och olinjära modellen för Q_1 = diag(1,1,1,1,1, 1,1,1). PSTEG = -0.50

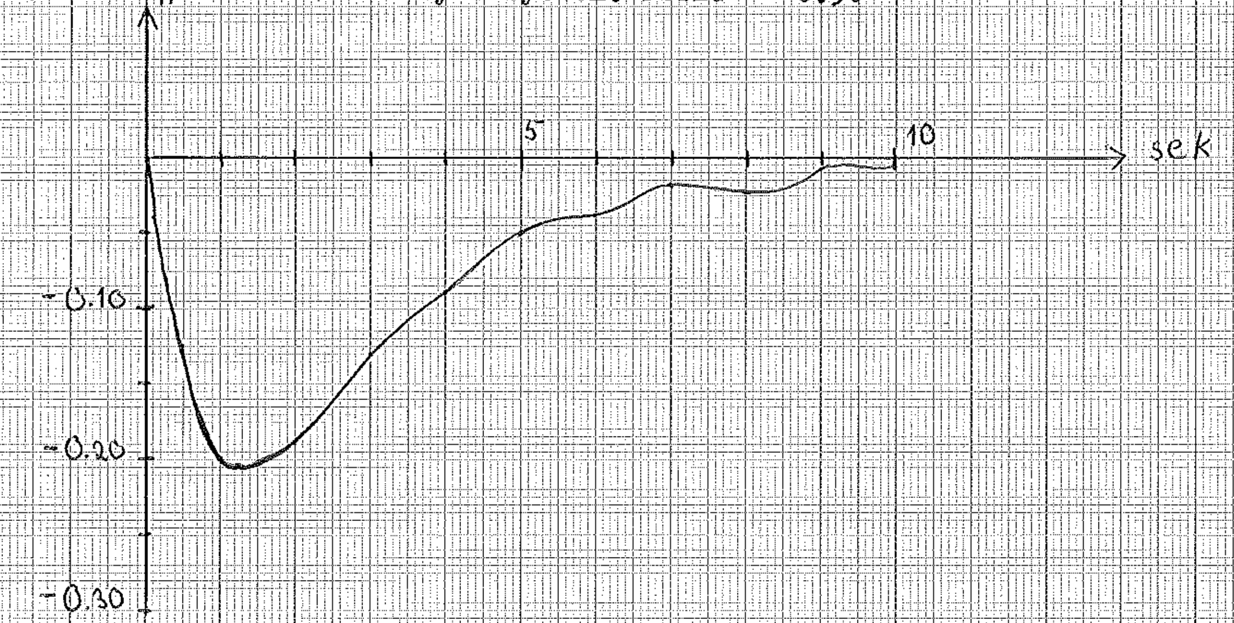
Linjära modellen har mindre utsvängning än den olinjära modellen.

2.



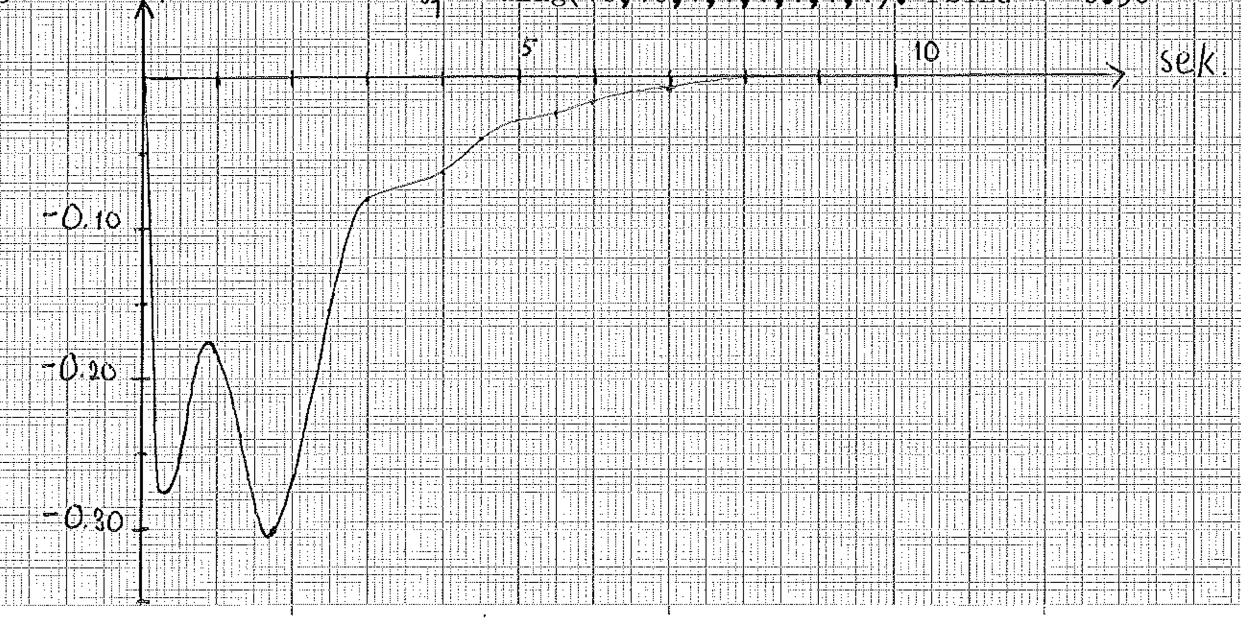
Linjära och olinjära modellerna för Q_1 = diag(10,10, 1,1,1,1,1,1). PSTEG = -0.50

1. Ostyrt system. PSTEG = -0.50



2. Q_1 = diag(1,1,1,1,1,1,1,1). PSTEG = -0.50

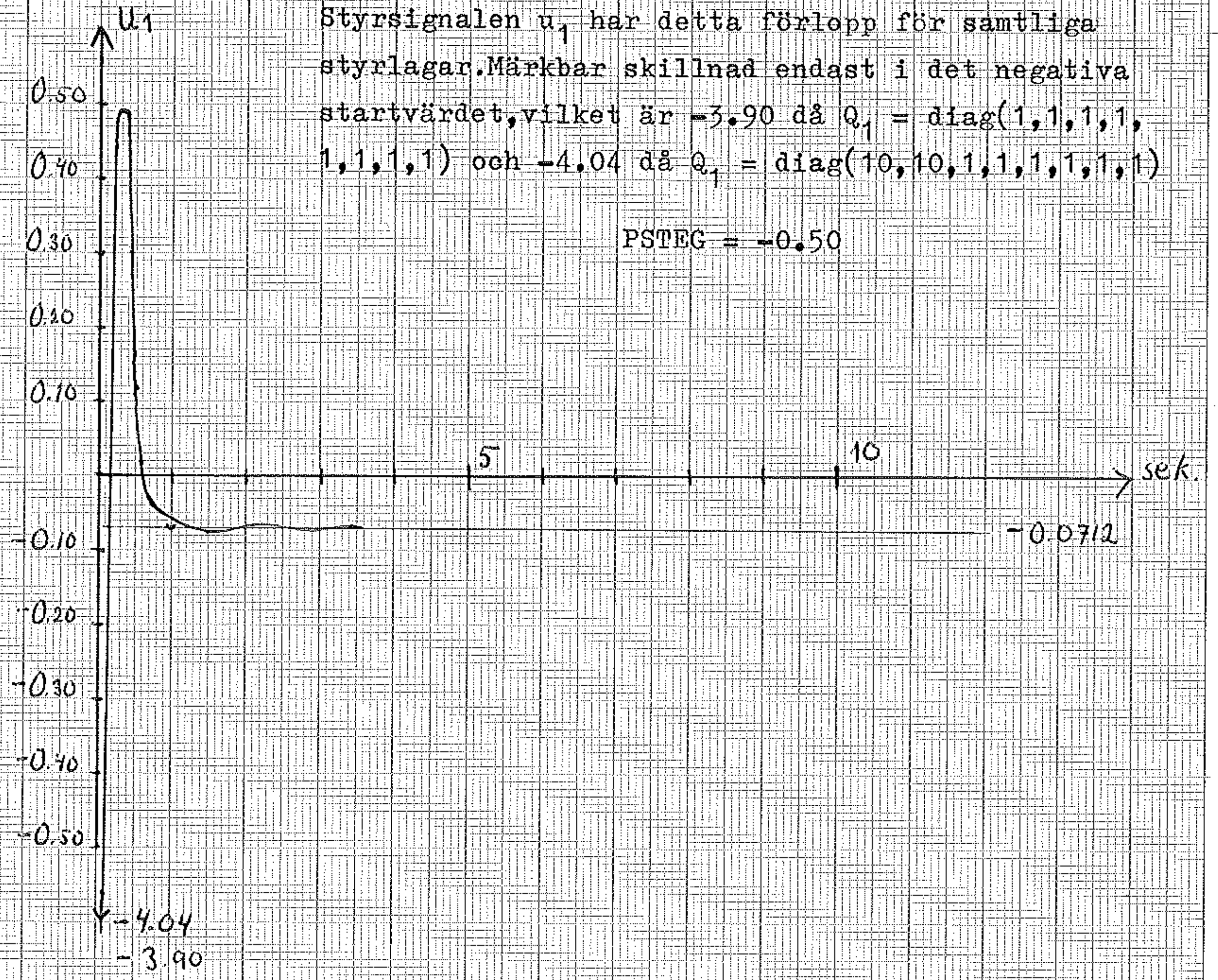
3. Q_1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1). PSTEG = -0.50



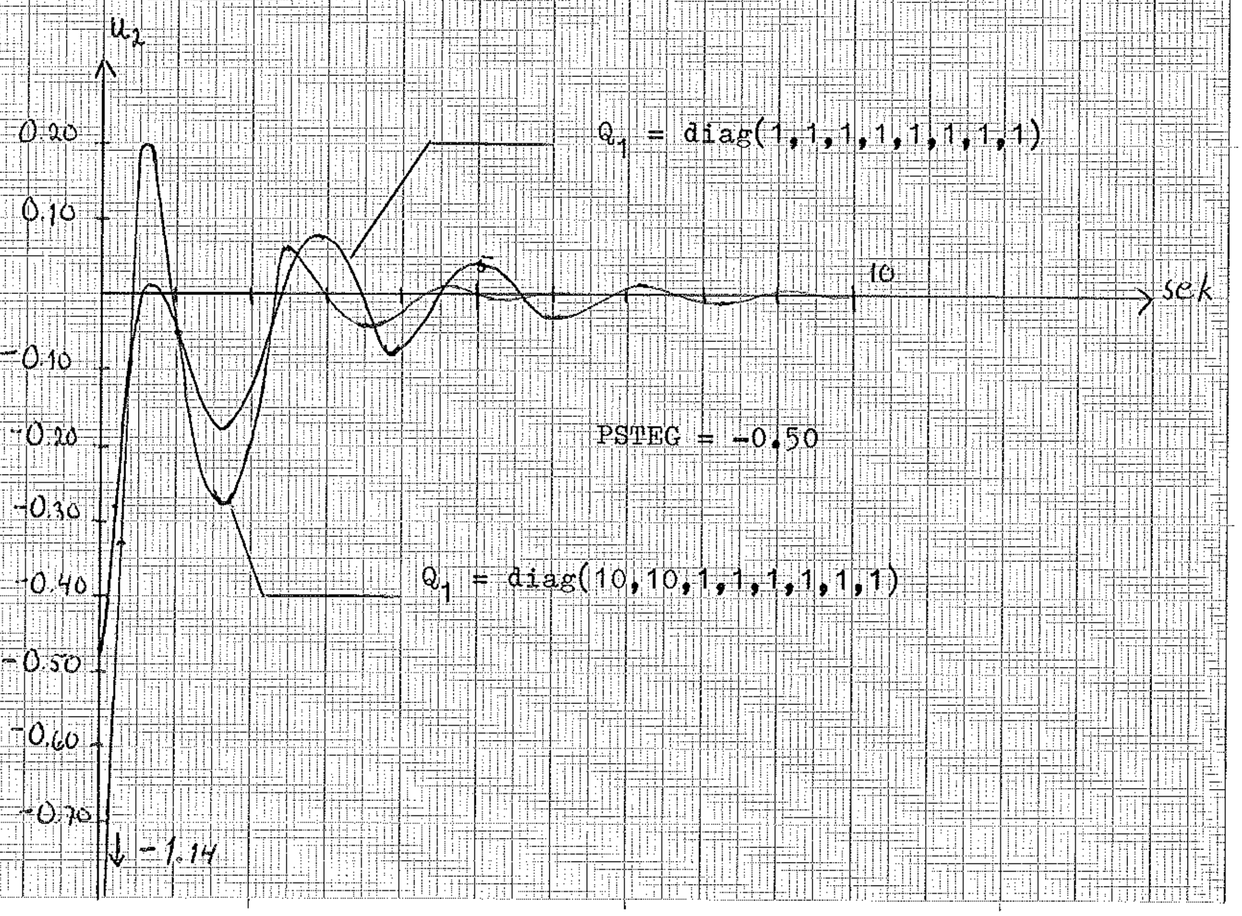
1.

Styrsignalen u_1 har detta förlopp för samtliga styrlagar. Märkbar skillnad endast i det negativa startvärdet, vilket är −3.90 då Q_1 = diag(1,1,1,1,1,1,1,1) och −4.04 då Q_1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1)

PSTEG = −0.50



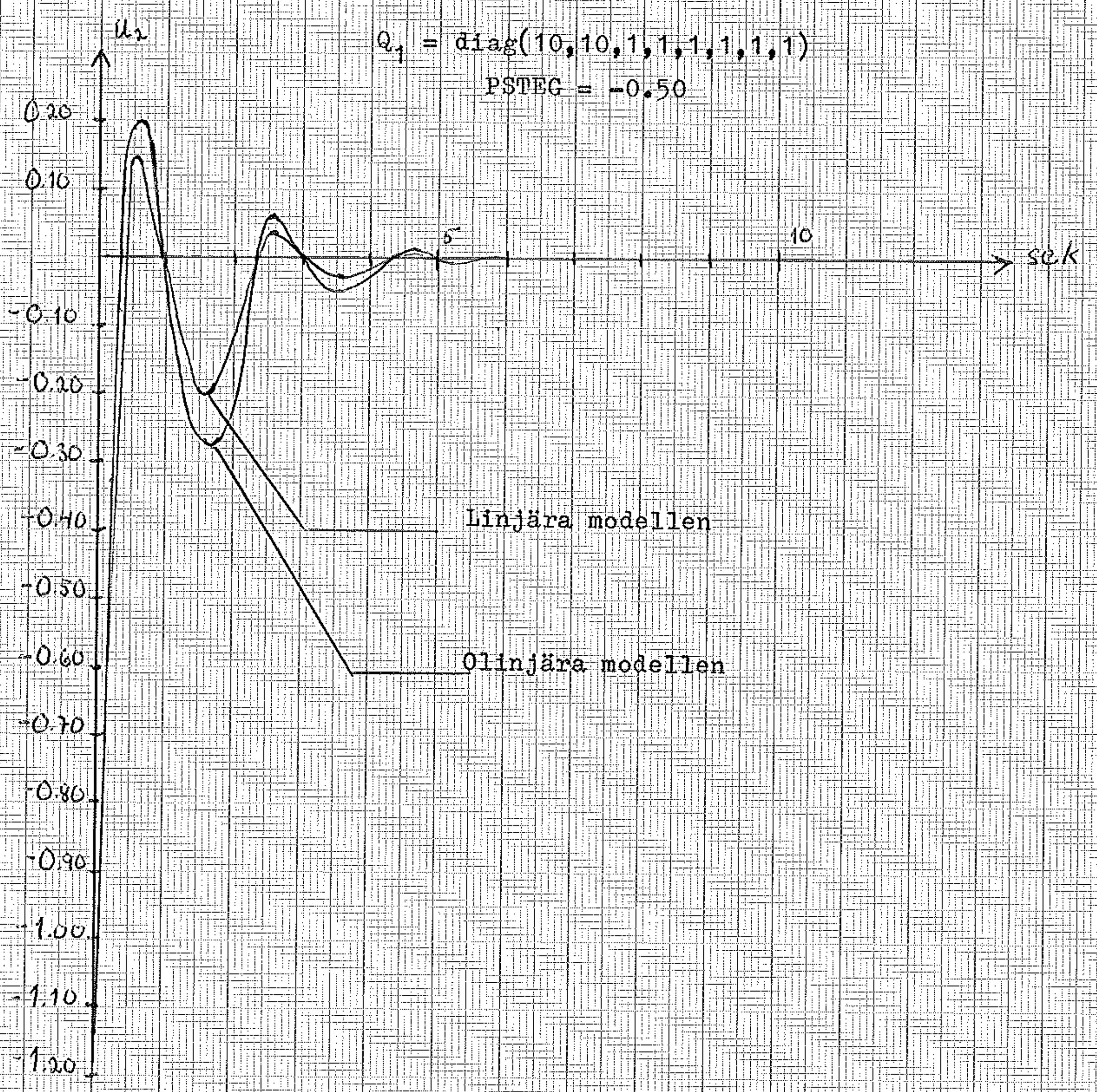
2.



Q_1 = diag(1,1,1,1,1,1,1,1)

PSTEG = −0.50

Q_1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1)


Q_1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1)
PSTEG = -0.50
u_2
0.20
0.10
-0.10
-0.20
-0.30
-0.40
-0.50
-0.60
-0.70
-0.80
-0.90
-1.00
-1.10
-1.20
5
10
sek
Linjära modellen
Olinjära modellen

SIMULERING AV DET OLINEARA SYSTEMET.

P0=1.000 P1= .500 EFF= .796 Q1=DIAG(10.0,10.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0)

STATIONERA VERDEN TILL VILKA INSVENGNINGEN SKALL SKE

DELTA0= .5691 PSI0= 17.6111 VF0= 2.6025 VS0= -.2603

L-MATRISEN I STYRLAGEN U=-LX

-.3214	.2505	-.6828	-.9552	1.6466	.7510	-.0009	.3681
.1613	8.9668	-.0689	-.0040	-.0009	-1.6631	.4929	1.4948

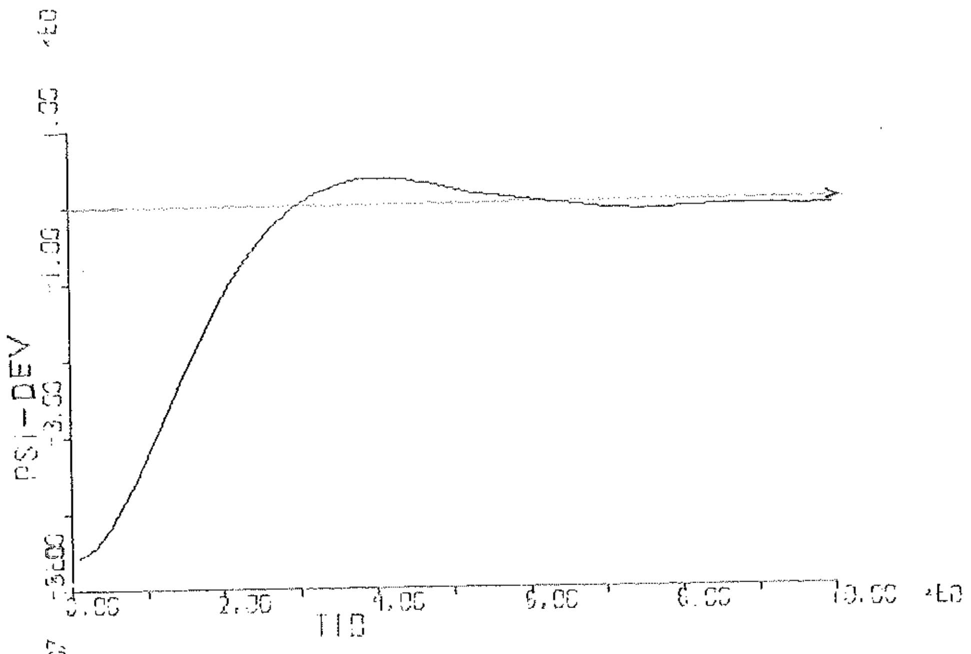
T	DELTA-DEV	HAST	PSI-DEV	VF-DEV	VS-DEV	G	GF	HE	U1	U2
.00	-.1693	.0000	-4.5933	-.9128	.0913	-.5000	.0225	.0000	-3.9086	-1.1354
.10	-.1704	-.0048	-4.5425	.2989	-1.2347	-.4194	-.0549	-.1518	-.5371	-.6863
.20	-.1781	-.0172	-4.3499	1.6951	-.9386	-.3611	-.0281	-.2431	.4310	-.3339
.30	-.1962	-.0323	-4.0512	2.4764	-.3964	-.3278	-.0082	-.2766	.4758	-.0761
.40	-.2250	-.0460	-3.7088	2.7119	-.0170	-.3119	.0052	-.2738	.2891	.0925
.50	-.2625	-.0558	-3.3662	2.6311	.1686	-.3064	.0126	-.2518	.1184	.1821
.60	-.3052	-.0600	-3.0446	2.4204	.2281	-.3057	.0150	-.2235	.0151	.2058
.70	-.3487	-.0582	-2.7508	2.1810	.2264	-.3053	.0136	-.1979	-.0343	.1787
.80	-.3888	-.0506	-2.4849	1.9553	.2029	-.3022	.0094	-.1807	-.0531	.1164
.90	-.4216	-.0384	-2.2445	1.7550	.1761	-.2943	.0035	-.1743	-.0581	.0342
1.00	-.4442	-.0230	-2.0268	1.5791	.1527	-.2810	-.0029	-.1790	-.0583	-.0539
1.10	-.4548	-.0060	-1.8293	1.4233	.1338	-.2624	-.0091	-.1931	-.0576	-.1364
1.20	-.4530	.0109	-1.6501	1.2833	.1187	-.2393	-.0142	-.2138	-.0573	-.2042
1.30	-.4393	.0261	-1.4874	1.1562	.1063	-.2133	-.0179	-.2377	-.0575	-.2515
1.40	-.4155	.0386	-1.3399	1.0400	.0959	-.1858	-.0200	-.2614	-.0582	-.2755
1.50	-.3838	.0475	-1.2065	.9334	.0870	-.1586	-.0203	-.2818	-.0590	-.2763
1.60	-.3470	.0526	-1.0861	.8358	.0790	-.1333	-.0191	-.2963	-.0600	-.2565
1.70	-.3078	.0539	-.9779	.7468	.0717	-.1110	-.0166	-.3034	-.0611	-.2206
1.80	-.2690	.0518	-.8808	.6662	.0651	-.0925	-.0133	-.3024	-.0622	-.1738
1.90	-.2328	.0469	-.7940	.5936	.0590	-.0782	-.0095	-.2936	-.0632	-.1220
2.00	-.2009	.0402	-.7164	.5287	.0533	-.0682	-.0057	-.2779	-.0643	-.0706

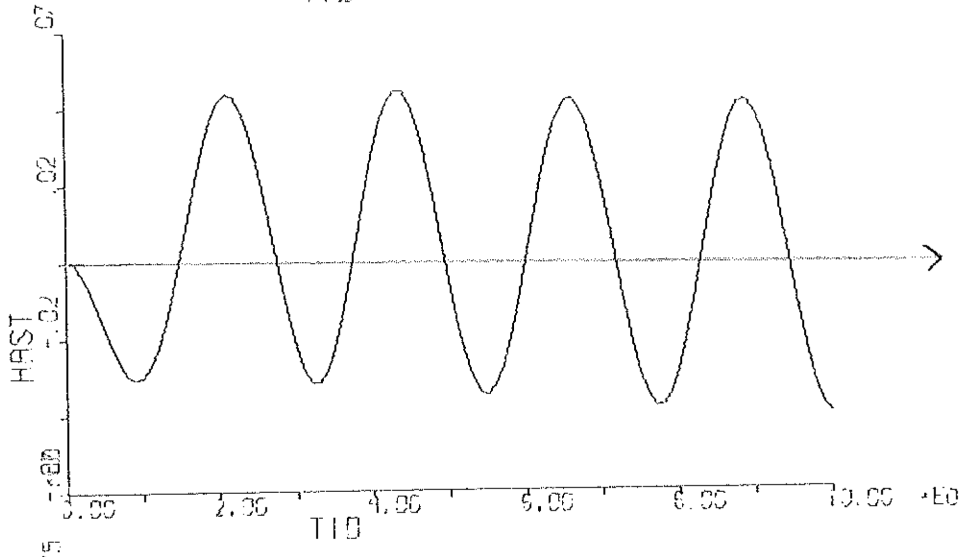
2.10	-.1743	.0325	-.6472	.4709	.0479	-.0620	-.0023	-.2567	-.0653	-.0242
2.20	-.1535	.0246	-.5853	.4197	.0429	-.0591	.0006	-.2320	-.0662	.0139
2.30	-.1383	.0172	-.5299	.3745	.0381	-.0587	.0028	-.2055	-.0671	.0418
2.40	-.1281	.0108	-.4801	.3346	.0337	-.0598	.0041	-.1792	-.0679	.0587
2.50	-.1222	.0058	-.4352	.2993	.0296	-.0617	.0047	-.1545	-.0686	.0651
2.60	-.1193	.0023	-.3946	.2681	.0258	-.0637	.0046	-.1326	-.0692	.0624
2.70	-.1184	.0004	-.3577	.2404	.0223	-.0652	.0040	-.1143	-.0696	.0527
2.80	-.1185	-.0002	-.3241	.2157	.0192	-.0657	.0030	-.0999	-.0700	.0381
2.90	-.1185	.0003	-.2934	.1935	.0165	-.0651	.0017	-.0893	-.0702	.0211
3.00	-.1178	.0017	-.2653	.1736	.0141	-.0634	.0005	-.0822	-.0703	.0038
3.10	-.1160	.0035	-.2397	.1556	.0122	-.0605	-.0007	-.0779	-.0704	-.0119
3.20	-.1127	.0054	-.2164	.1392	.0105	-.0567	-.0017	-.0759	-.0704	-.0247
3.30	-.1081	.0072	-.1952	.1243	.0092	-.0523	-.0024	-.0752	-.0704	-.0338
3.40	-.1022	.0087	-.1759	.1108	.0081	-.0476	-.0028	-.0752	-.0704	-.0389
3.50	-.0954	.0098	-.1585	.0985	.0072	-.0429	-.0029	-.0753	-.0704	-.0401
3.60	-.0881	.0103	-.1428	.0873	.0064	-.0383	-.0028	-.0750	-.0704	-.0380
3.70	-.0805	.0103	-.1288	.0773	.0058	-.0342	-.0025	-.0739	-.0704	-.0333
3.80	-.0731	.0099	-.1162	.0682	.0052	-.0307	-.0021	-.0718	-.0705	-.0270
3.90	-.0662	.0090	-.1050	.0601	.0047	-.0278	-.0015	-.0689	-.0706	-.0198
4.00	-.0600	.0079	-.0949	.0529	.0042	-.0255	-.0010	-.0651	-.0707	-.0126
4.10	-.0546	.0067	-.0860	.0465	.0038	-.0238	-.0005	-.0606	-.0708	-.0061
4.20	-.0501	.0055	-.0780	.0409	.0033	-.0226	-.0001	-.0558	-.0709	-.0007
4.30	-.0465	.0044	-.0708	.0359	.0029	-.0217	.0002	-.0508	-.0710	.0032
4.40	-.0437	.0034	-.0644	.0316	.0024	-.0211	.0004	-.0459	-.0711	.0056
4.50	-.0415	.0026	-.0585	.0278	.0020	-.0207	.0005	-.0414	-.0712	.0065
4.60	-.0398	.0021	-.0532	.0244	.0016	-.0203	.0005	-.0373	-.0713	.0062
4.70	-.0384	.0017	-.0484	.0215	.0013	-.0198	.0004	-.0337	-.0713	.0049
4.80	-.0373	.0016	-.0440	.0189	.0010	-.0193	.0002	-.0308	-.0714	.0029
4.90	-.0361	.0016	-.0399	.0165	.0007	-.0186	.0001	-.0284	-.0714	.0007
5.00	-.0350	.0017	-.0362	.0145	.0005	-.0178	-.0001	-.0266	-.0714	-.0016
5.10	-.0337	.0018	-.0328	.0126	.0003	-.0169	-.0002	-.0252	-.0714	-.0037
5.20	-.0323	.0020	-.0297	.0109	.0001	-.0159	-.0004	-.0241	-.0714	-.0053
5.30	-.0307	.0022	-.0269	.0094	.0000	-.0148	-.0005	-.0233	-.0713	-.0065
5.40	-.0290	.0024	-.0243	.0080	-.0001	-.0137	-.0005	-.0226	-.0713	-.0070
5.50	-.0272	.0025	-.0220	.0068	-.0001	-.0127	-.0005	-.0220	-.0713	-.0071
5.60	-.0254	.0025	-.0199	.0057	-.0001	-.0117	-.0005	-.0213	-.0713	-.0067
5.70	-.0236	.0024	-.0180	.0047	-.0002	-.0107	-.0004	-.0205	-.0713	-.0060
5.80	-.0219	.0023	-.0163	.0039	-.0002	-.0099	-.0004	-.0197	-.0713	-.0050
5.90	-.0203	.0021	-.0148	.0031	-.0002	-.0092	-.0003	-.0187	-.0713	-.0039
6.00	-.0188	.0019	-.0134	.0025	-.0002	-.0086	-.0002	-.0177	-.0713	-.0029

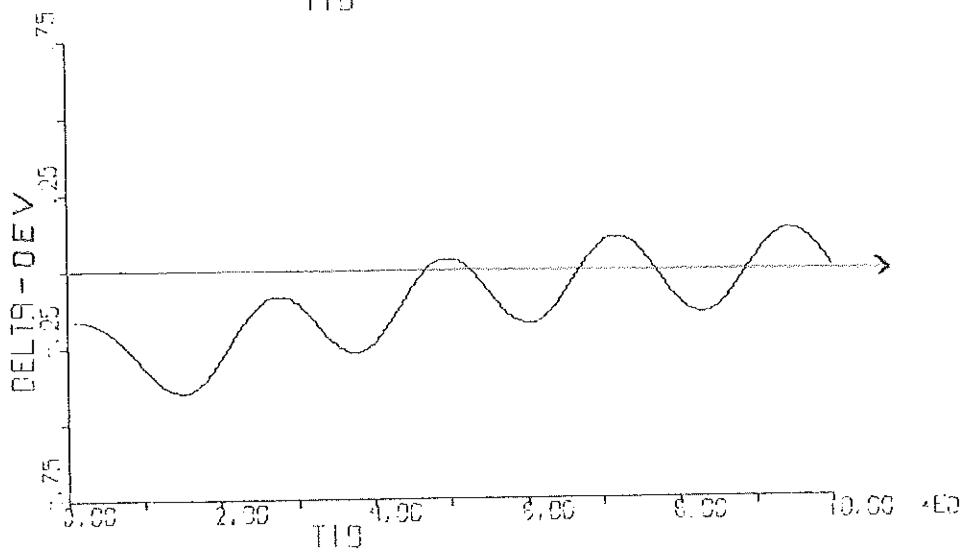
6.10	-.0175	.0017	-.0122	.0019	-.0002	-.0080	-.0002	-.0166	-.0713	-.0019
6.20	-.0163	.0015	-.0111	.0014	-.0002	-.0076	-.0001	-.0155	-.0713	-.0011
6.30	-.0153	.0013	-.0101	.0010	-.0002	-.0072	-.0000	-.0143	-.0713	-.0005
6.40	-.0144	.0011	-.0093	.0007	-.0003	-.0069	-.0000	-.0133	-.0713	-.0001
6.50	-.0136	.0010	-.0085	.0004	-.0003	-.0066	.0000	-.0122	-.0713	.0000
6.60	-.0129	.0009	-.0077	.0001	-.0003	-.0063	.0000	-.0113	-.0713	.0000
6.70	-.0123	.0008	-.0071	-.0001	-.0003	-.0061	-.0000	-.0105	-.0713	-.0001
6.80	-.0118	.0007	-.0065	-.0003	-.0003	-.0058	-.0000	-.0097	-.0713	-.0003
6.90	-.0112	.0007	-.0059	-.0004	-.0003	-.0055	-.0000	-.0091	-.0713	-.0006
7.00	-.0107	.0007	-.0054	-.0005	-.0004	-.0053	-.0001	-.0086	-.0713	-.0008
7.10	-.0102	.0007	-.0049	-.0006	-.0004	-.0050	-.0001	-.0081	-.0713	-.0011
7.20	-.0097	.0007	-.0045	-.0007	-.0003	-.0047	-.0001	-.0077	-.0713	-.0013
7.30	-.0092	.0007	-.0041	-.0008	-.0003	-.0044	-.0001	-.0073	-.0713	-.0014
7.40	-.0087	.0007	-.0037	-.0008	-.0003	-.0041	-.0001	-.0070	-.0713	-.0015
7.50	-.0082	.0007	-.0034	-.0009	-.0003	-.0039	-.0001	-.0067	-.0713	-.0014
7.60	-.0077	.0007	-.0031	-.0009	-.0003	-.0036	-.0001	-.0064	-.0713	-.0014
7.70	-.0072	.0006	-.0028	-.0010	-.0003	-.0034	-.0001	-.0061	-.0713	-.0012
7.80	-.0067	.0006	-.0025	-.0010	-.0003	-.0031	-.0001	-.0058	-.0713	-.0011
7.90	-.0063	.0006	-.0023	-.0010	-.0003	-.0029	-.0001	-.0055	-.0713	-.0009
8.00	-.0059	.0005	-.0021	-.0010	-.0003	-.0028	-.0001	-.0052	-.0713	-.0008
8.10	-.0055	.0005	-.0020	-.0010	-.0002	-.0026	-.0000	-.0049	-.0713	-.0006
8.20	-.0052	.0004	-.0018	-.0010	-.0002	-.0024	-.0000	-.0046	-.0713	-.0005
8.30	-.0049	.0004	-.0016	-.0010	-.0002	-.0023	-.0000	-.0043	-.0713	-.0004
8.40	-.0046	.0004	-.0015	-.0010	-.0002	-.0022	-.0000	-.0040	-.0713	-.0003
8.50	-.0043	.0003	-.0014	-.0009	-.0002	-.0021	-.0000	-.0037	-.0713	-.0003
8.60	-.0041	.0003	-.0013	-.0009	-.0002	-.0020	-.0000	-.0035	-.0713	-.0002
8.70	-.0039	.0003	-.0012	-.0009	-.0002	-.0019	-.0000	-.0033	-.0713	-.0002
8.80	-.0037	.0003	-.0011	-.0009	-.0002	-.0018	-.0000	-.0031	-.0713	-.0003
8.90	-.0035	.0003	-.0010	-.0008	-.0002	-.0017	-.0000	-.0029	-.0713	-.0003
9.00	-.0033	.0002	-.0009	-.0008	-.0002	-.0016	-.0000	-.0027	-.0713	-.0003
9.10	-.0031	.0002	-.0008	-.0008	-.0002	-.0015	-.0000	-.0026	-.0713	-.0003
9.20	-.0030	.0002	-.0008	-.0007	-.0002	-.0014	-.0000	-.0024	-.0713	-.0003
9.30	-.0028	.0002	-.0007	-.0007	-.0002	-.0013	-.0000	-.0023	-.0713	-.0004
9.40	-.0027	.0002	-.0007	-.0007	-.0001	-.0013	-.0000	-.0022	-.0713	-.0004
9.50	-.0025	.0002	-.0006	-.0007	-.0001	-.0012	-.0000	-.0021	-.0713	-.0003
9.60	-.0024	.0002	-.0006	-.0006	-.0001	-.0011	-.0000	-.0020	-.0712	-.0003
9.70	-.0022	.0002	-.0005	-.0006	-.0001	-.0010	-.0000	-.0019	-.0712	-.0003
9.80	-.0021	.0002	-.0005	-.0006	-.0001	-.0010	-.0000	-.0018	-.0712	-.0003
9.90	-.0020	.0002	-.0004	-.0006	-.0001	-.0009	-.0000	-.0017	-.0712	-.0002
10.00	-.0018	.0002	-.0004	-.0005	-.0001	-.0009	-.0000	-.0016	-.0712	-.0002

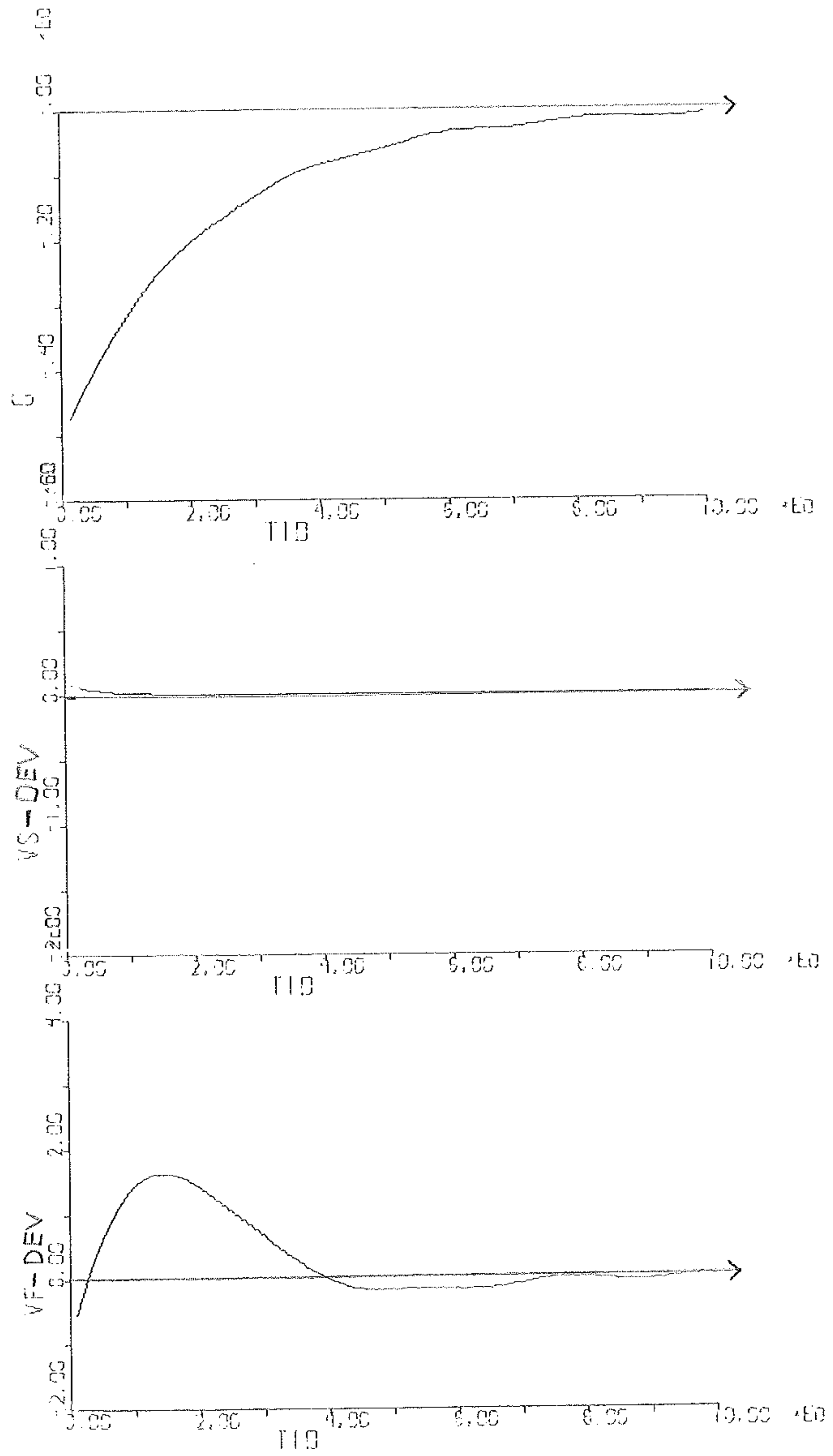
Automatisk plottning:

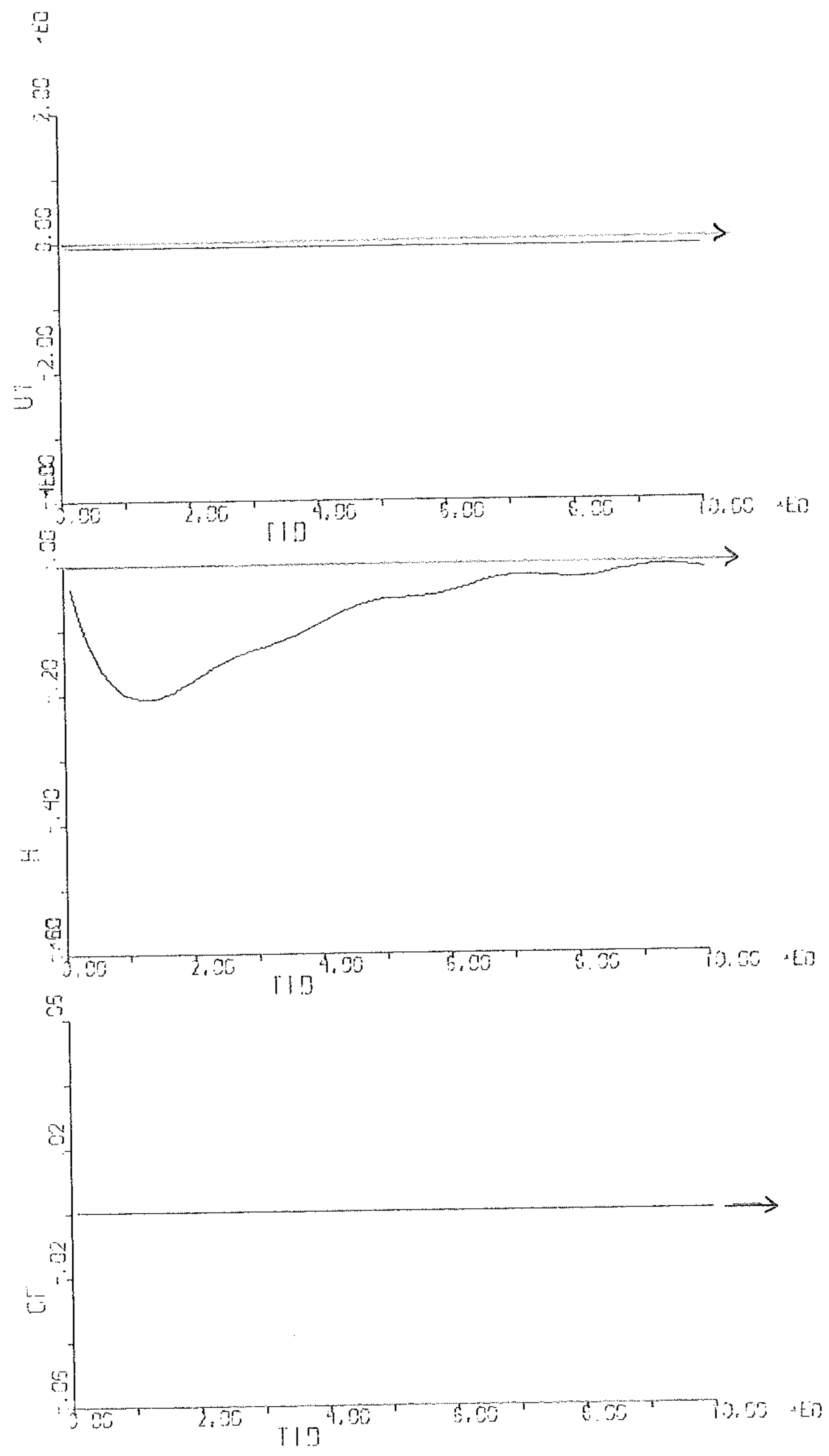
Ostyrt system. PSTEG = -0.50

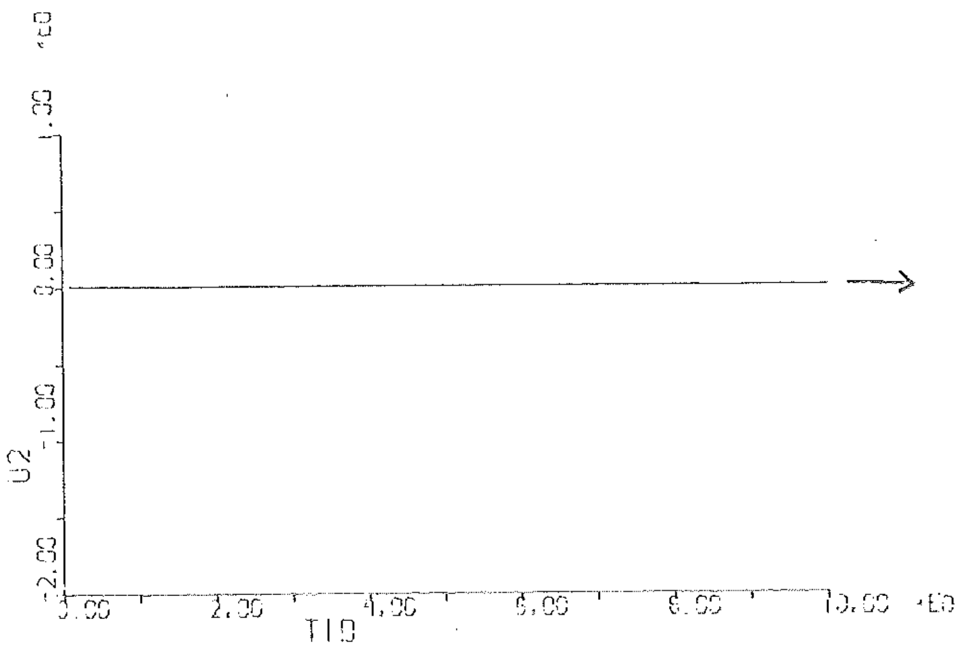




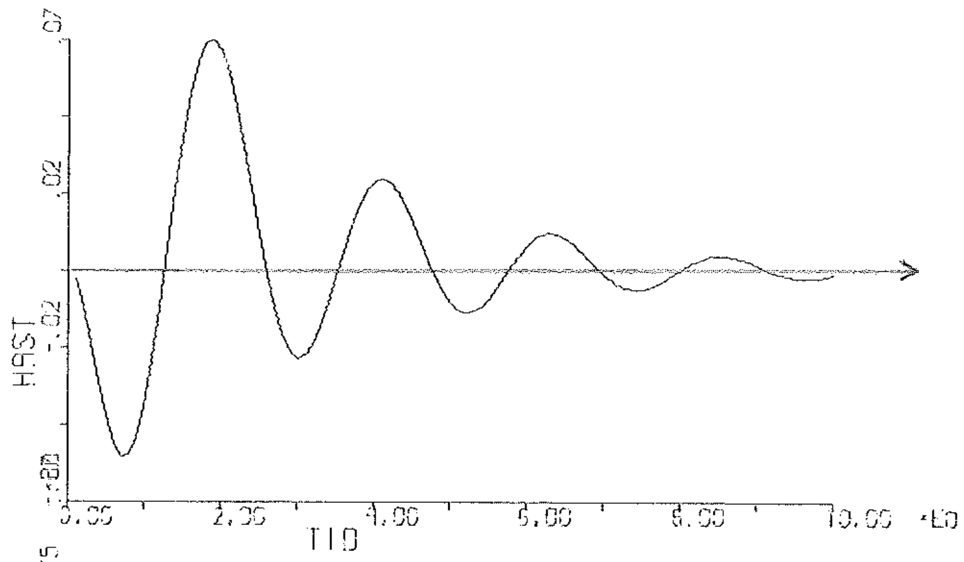


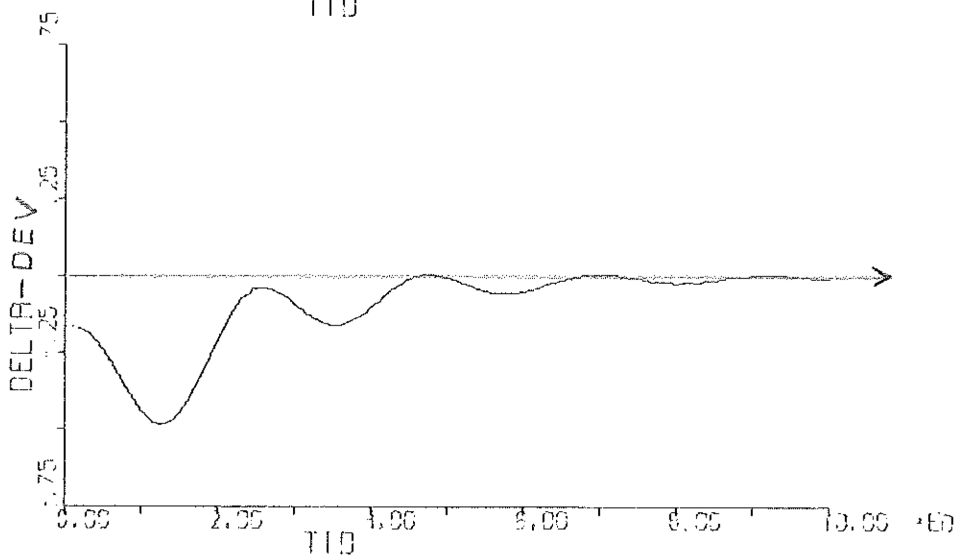

C
TID
VS-DEV
TID
VF-DEV
TID

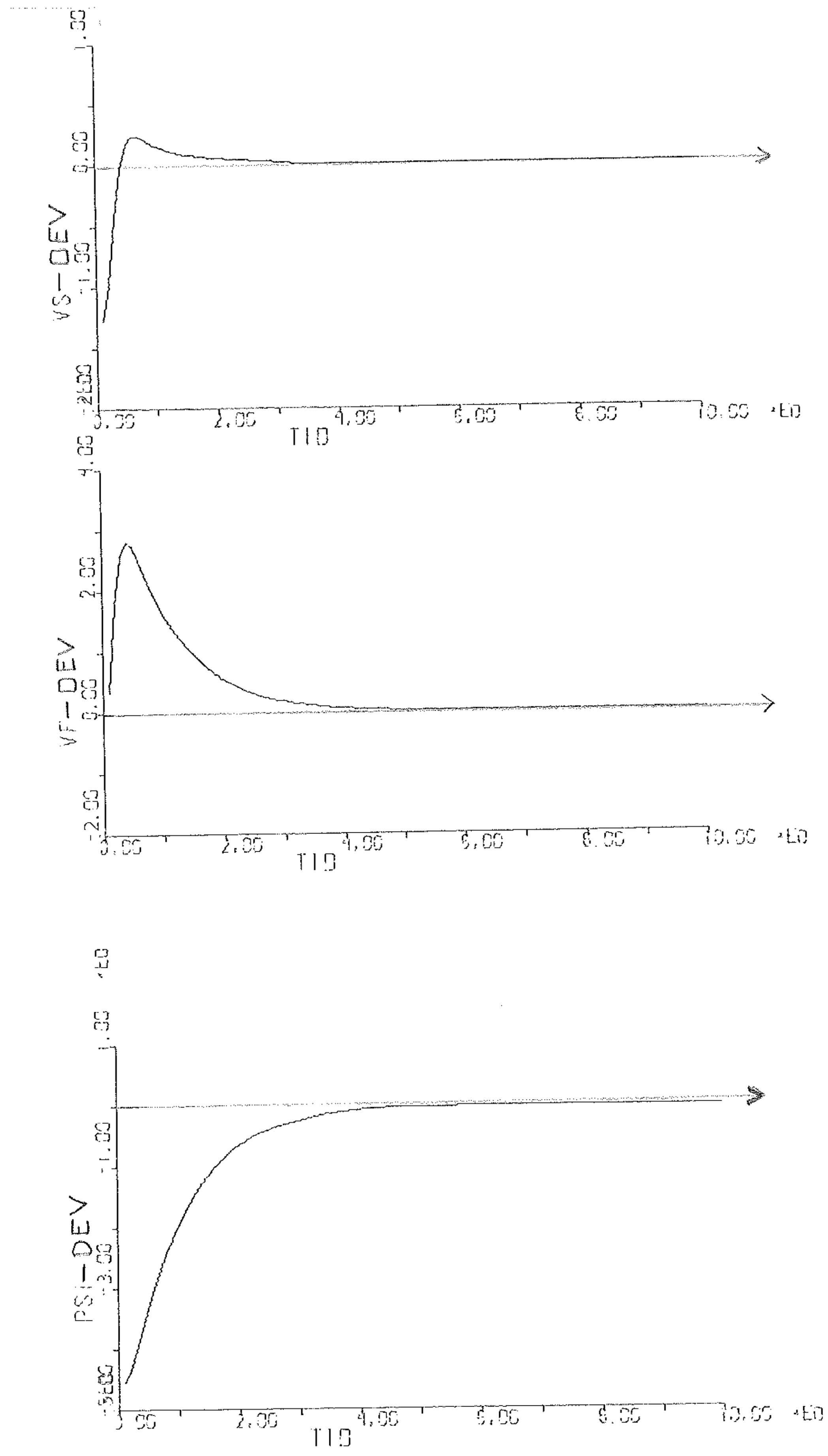


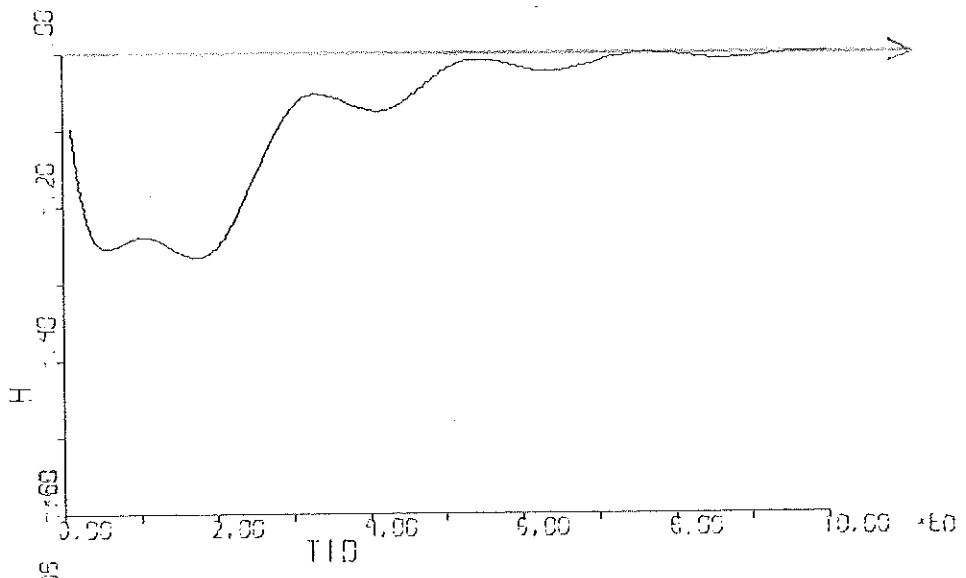


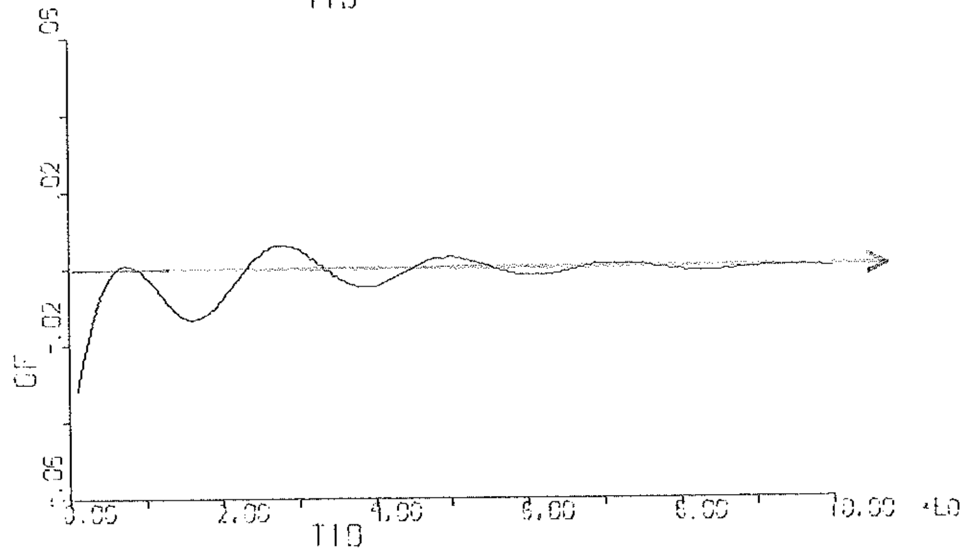
Q_1 = diag(1,1,1,1,1,1,1) PSTEG = -0.50

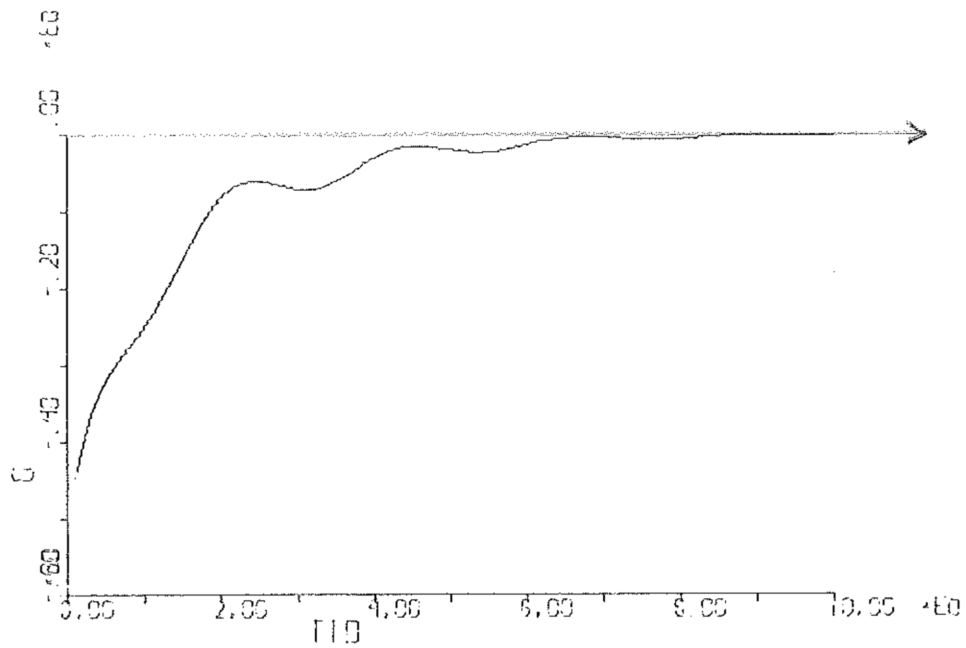


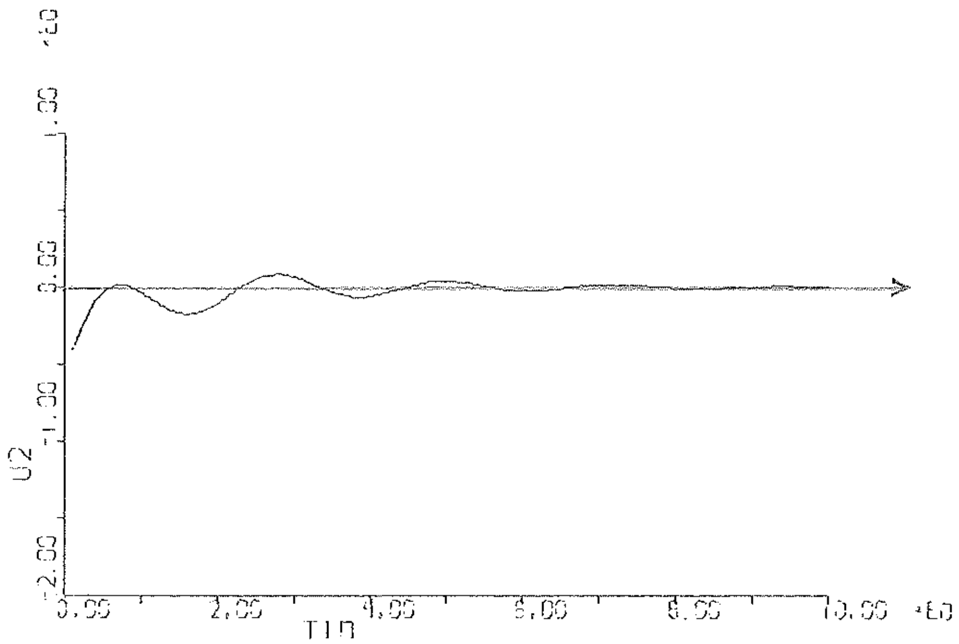


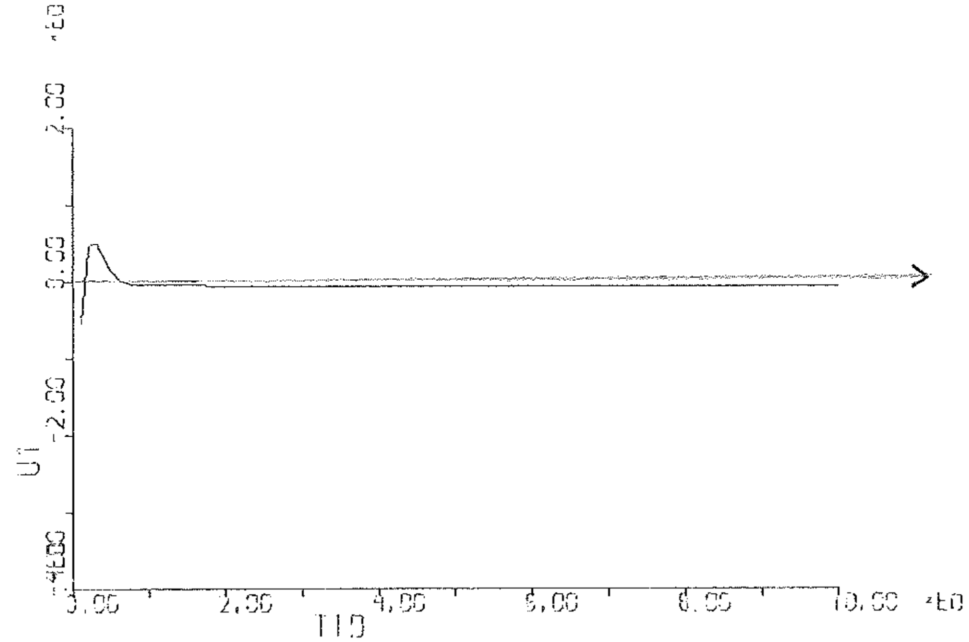

VS-DEV
TID
VF-DEV
TID
PSI-DEV
TID


H
TID

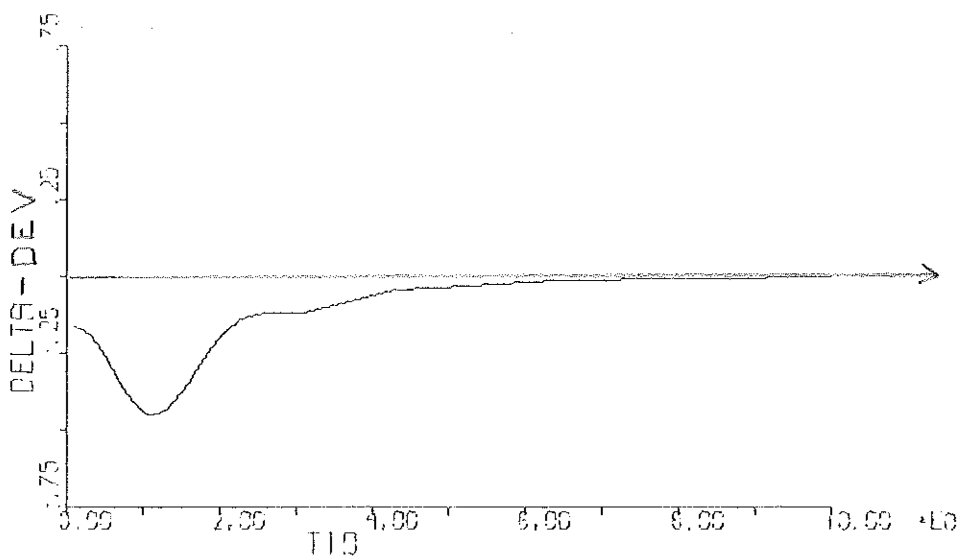

TID

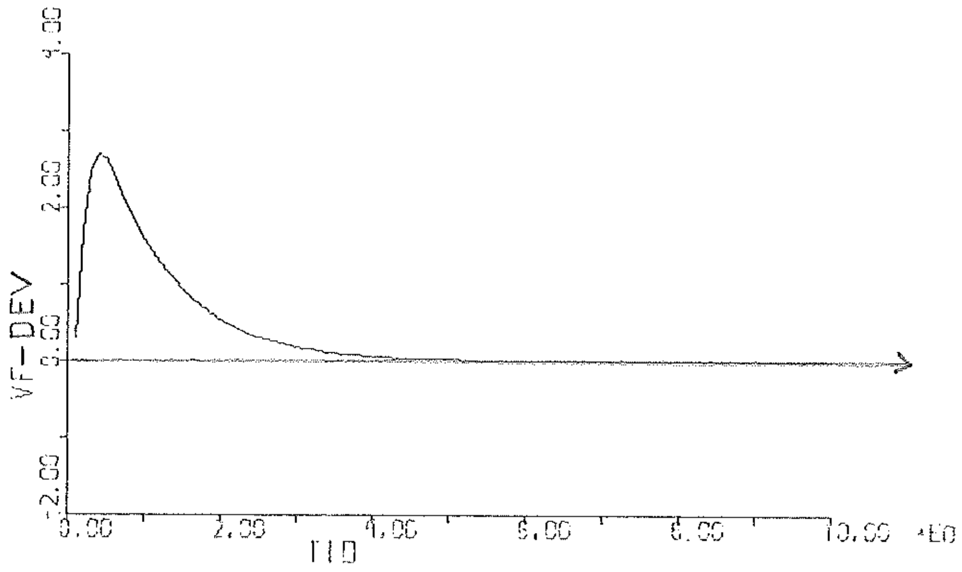

TID

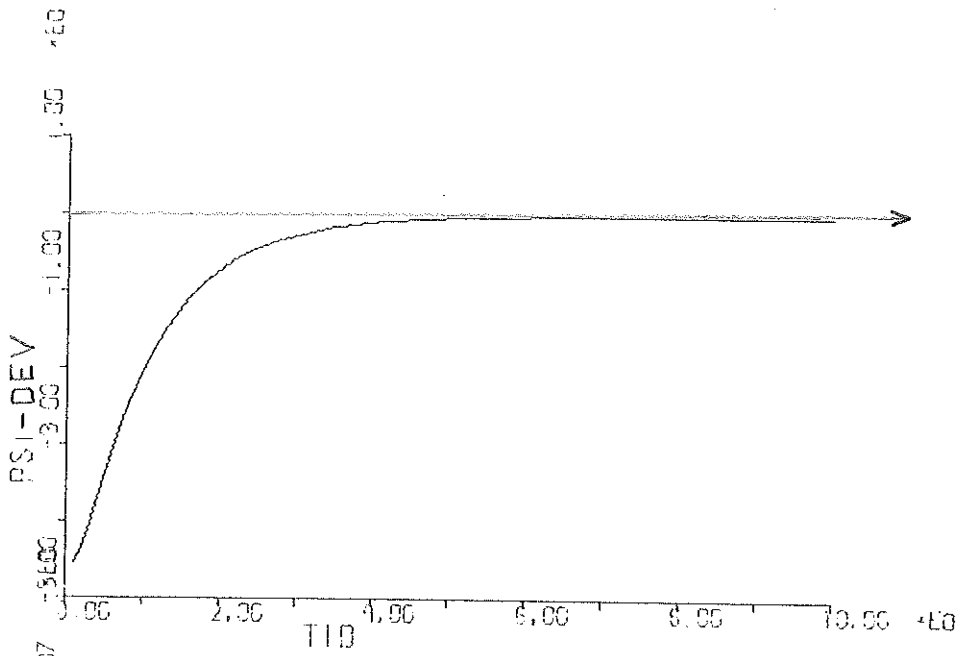


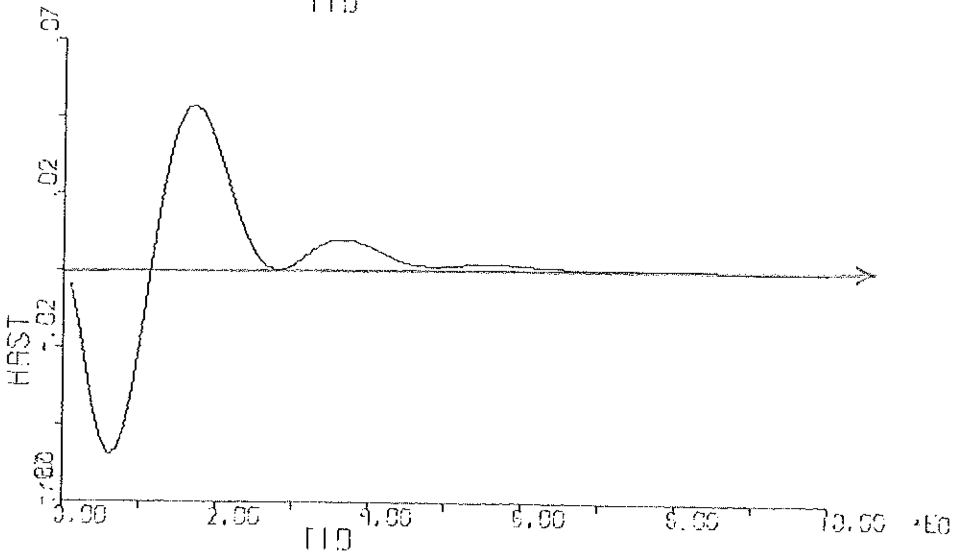


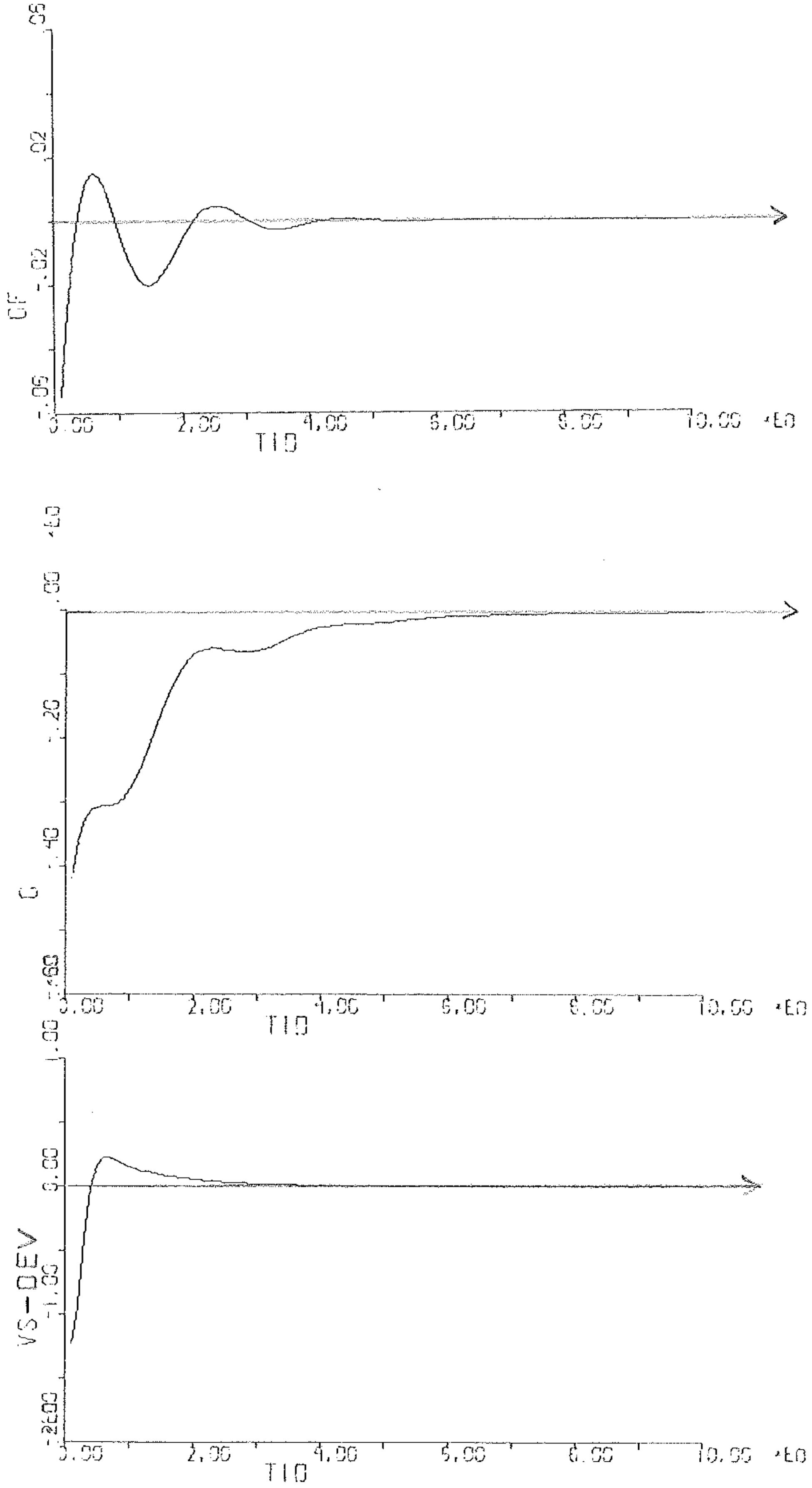
Q_1 = diag(10,10,1,1,1,1,1,1)   PSTEG = -0.50

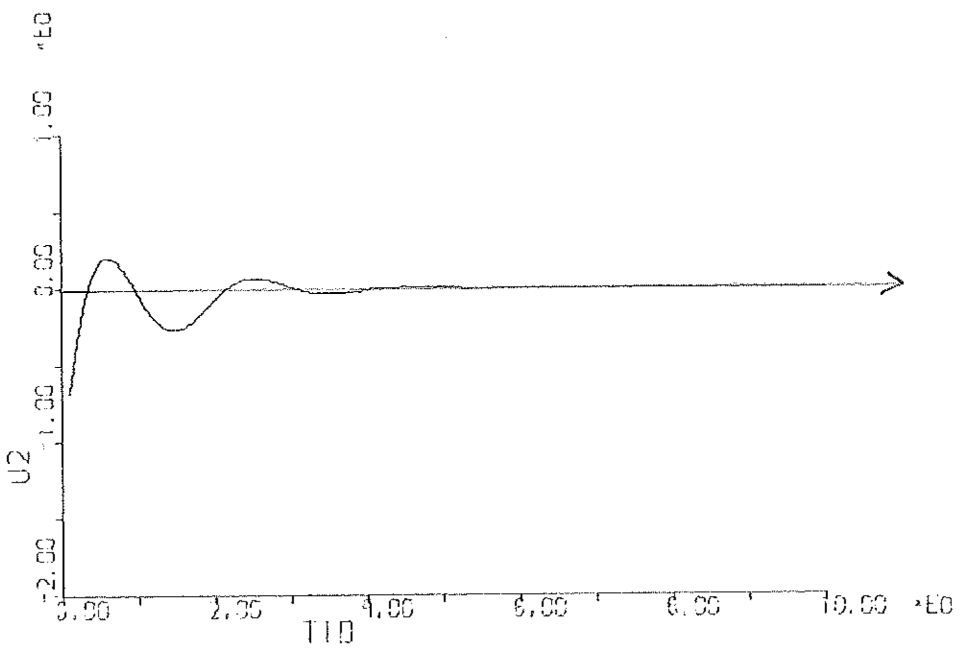


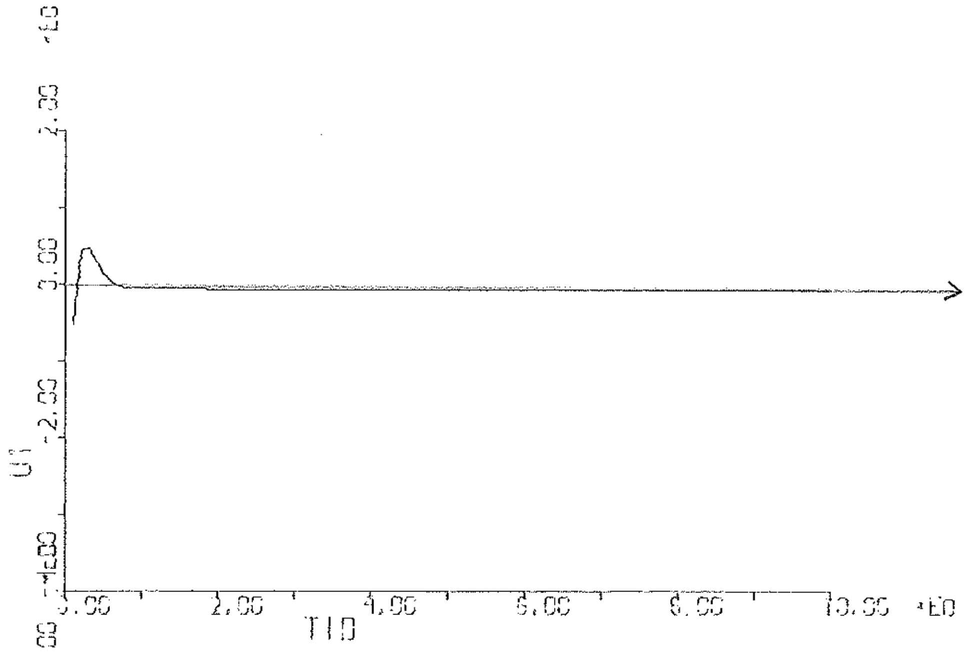

VF-DEV
TID

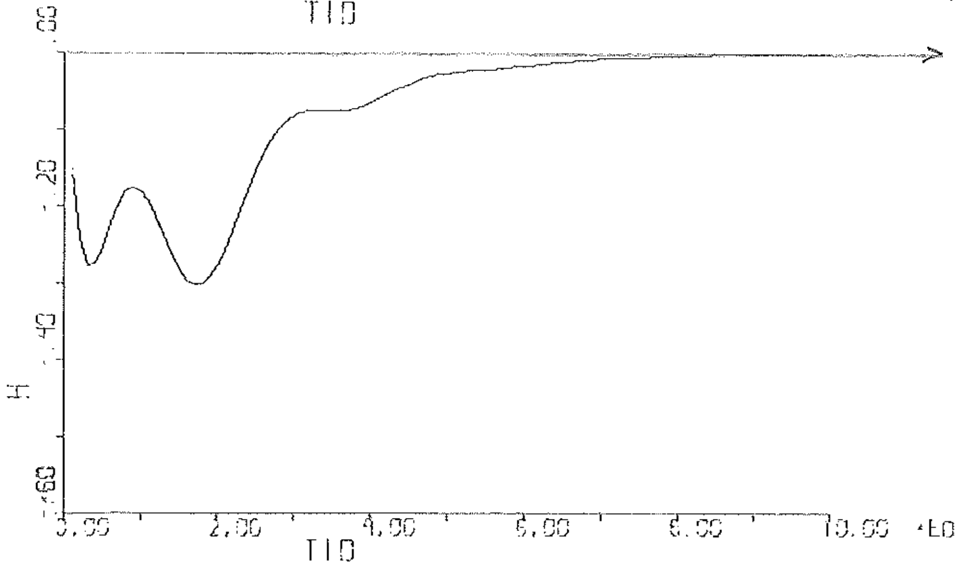

PSI-DEV
TID

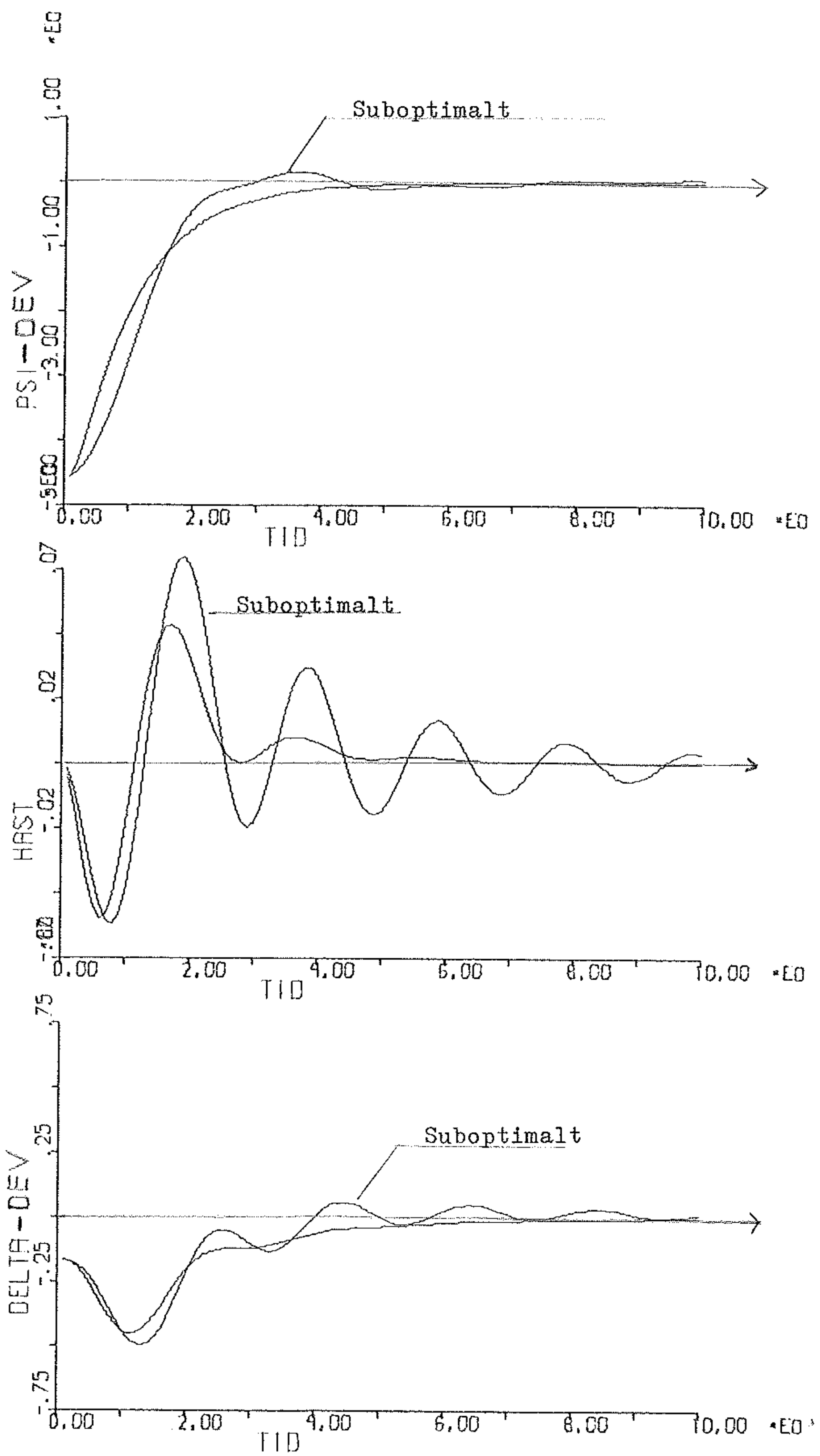

HAST
TID

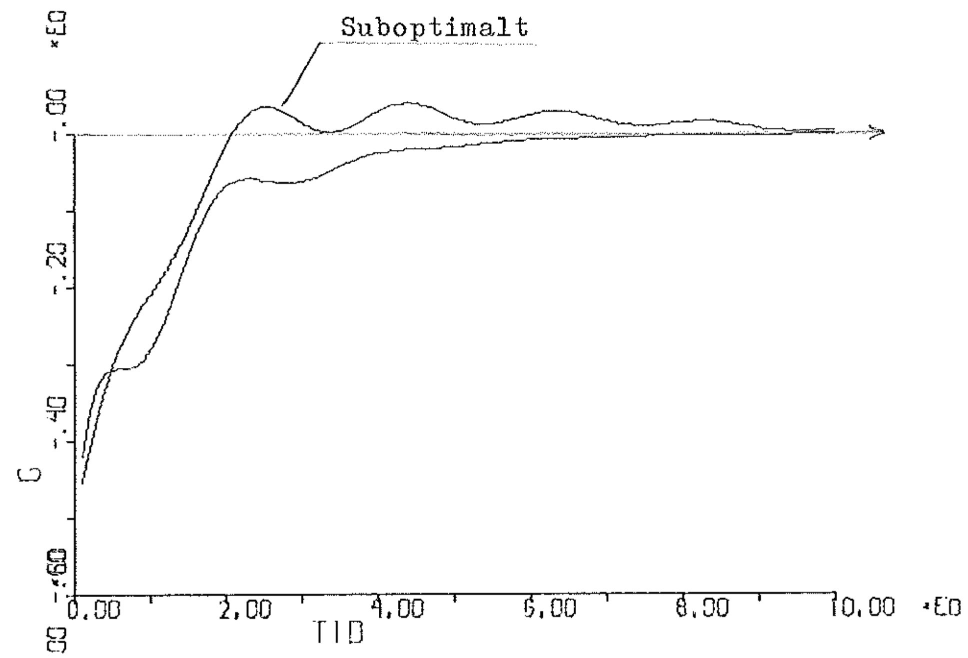

CF
TID
C
TID
VS-DEV
TID

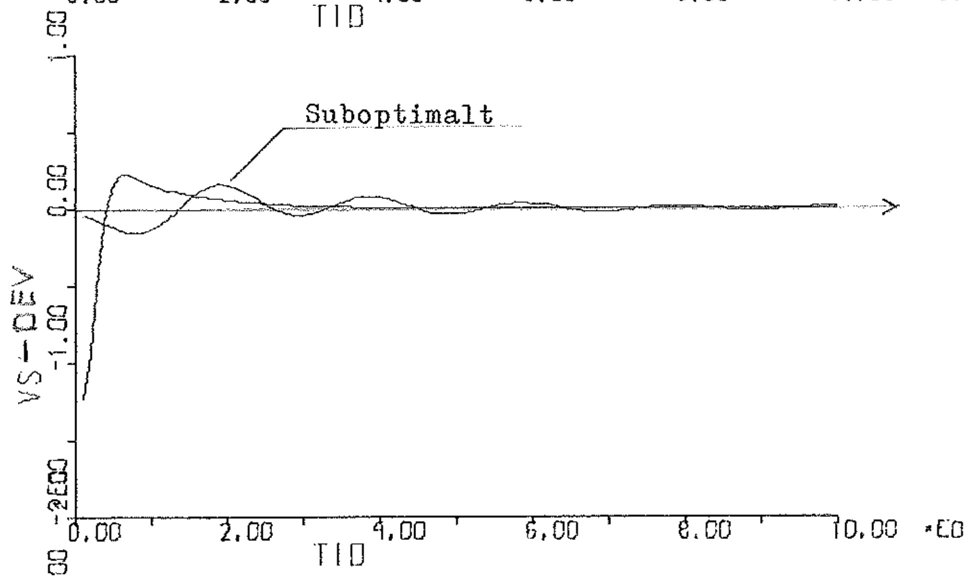

U2
TID

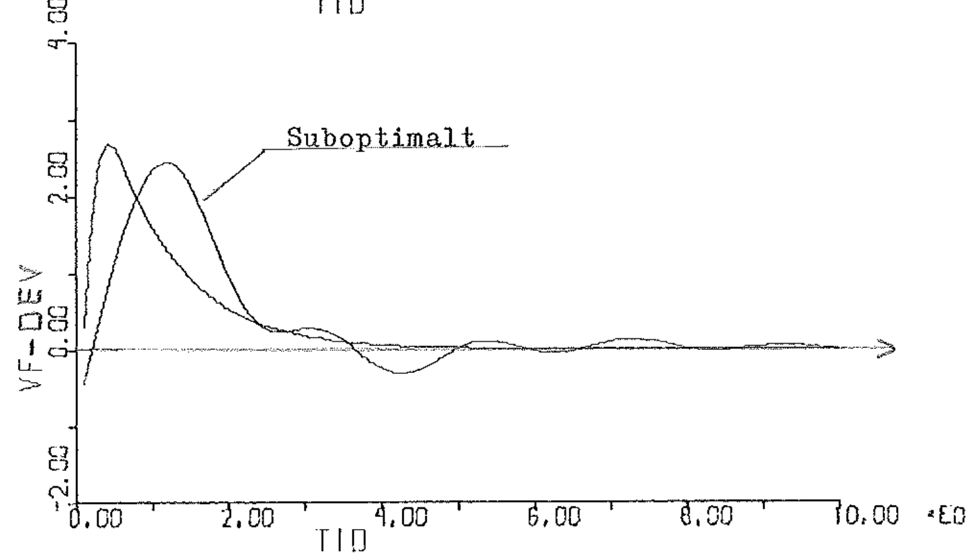

U1
TID

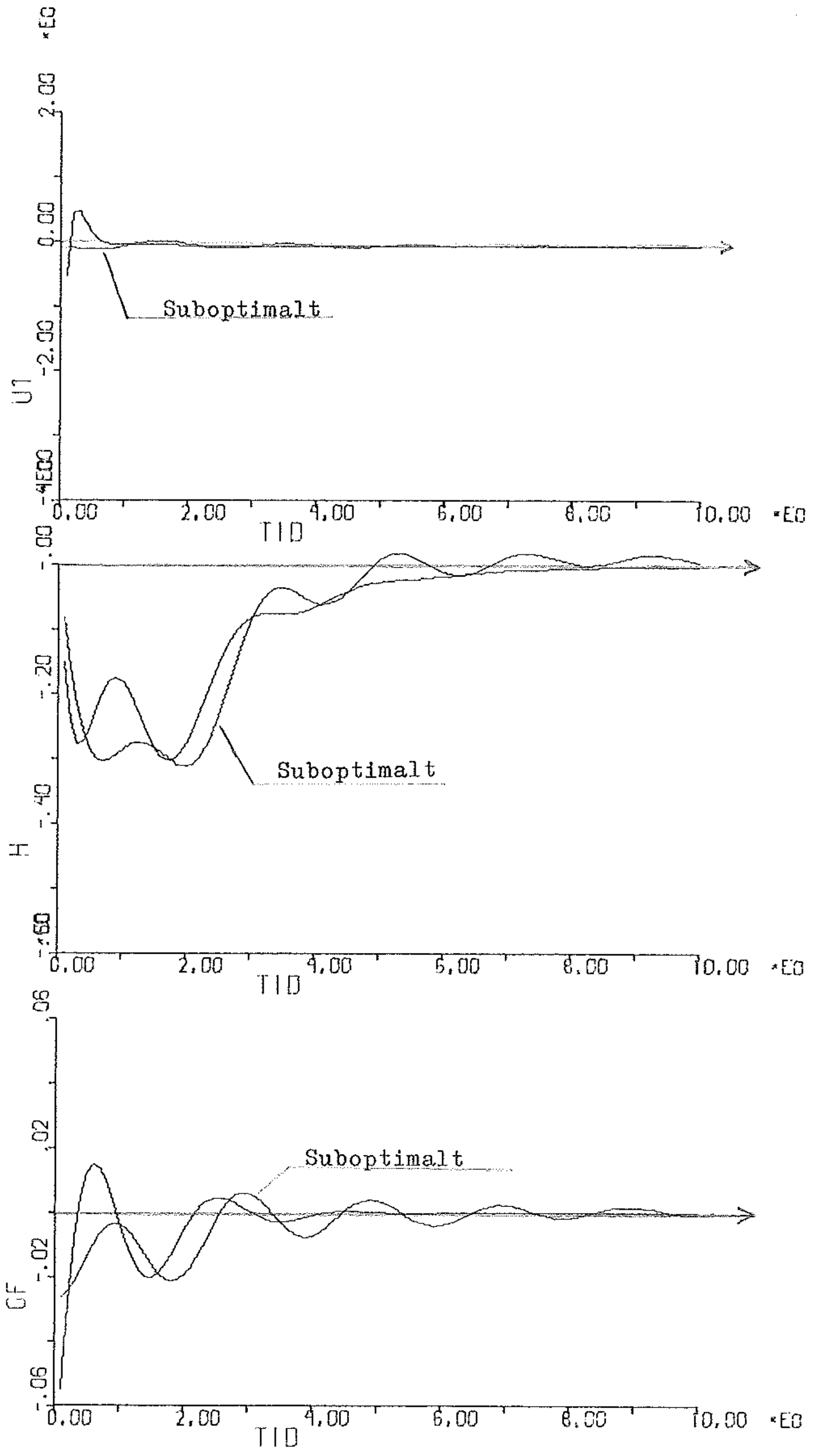

H
TID

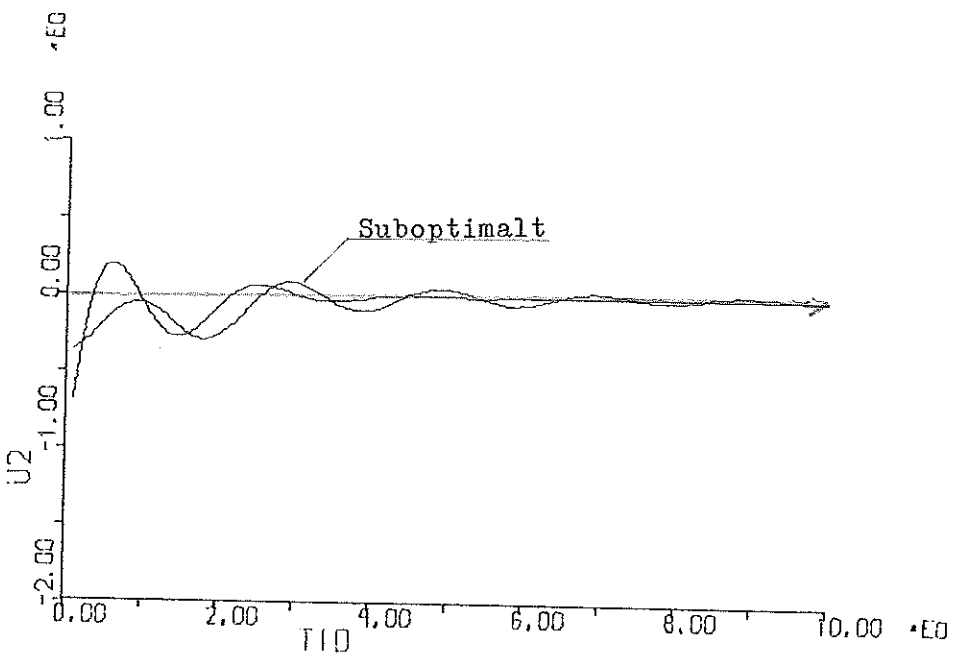

Suboptimalt
PSI-DEV
1.00
-1.00
-3.00
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
TID
Suboptimalt
HAST
.07
.02
-.02
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
TID
Suboptimalt
DELTA-DEV
.75
.25
-.25
-.75
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
TID


Suboptimalt
G
-.60
-.40
-.20
-.00
*E0
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
*E0
TID


Suboptimalt
VS-DEV
-2.00
-1.00
0.00
1.00
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
*E0
TID


Suboptimalt
VF-DEV
-2.00
0.00
2.00
4.00
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
*E0
TID


UT
2.00
0.00
-2.00
-4.00
*E0
Suboptimalt
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
*E0
TID
H
-.00
-.20
-.40
-.60
Suboptimalt
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
*E0
TID
GF
.06
.02
-.02
-.06
Suboptimalt
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
*E0
TID


Suboptimalt
U2
1.00
0.00
-1.00
-2.00
*E0
0.00
2.00
4.00
6.00
8.00
10.00
*E0
TID

PROGRAM HEAD:

```
      SUBROUTINE EIGP(A,N,IA,T,EVR,EVI,VECR,VECI,INDIC)
C
C     THIS SUBROUTINE FINDS ALL THE EIGENVALUES AND THE EIGENVECTORS OF
C     A REAL GENERAL MATRIX A OF ORDER N.FIRST IN THE SUBROUTINE SCALE
C     THE MATRIX IS SCALED SO THAT CORRESPONDING ROWS AND COLUMNS ARE
C     APPROXIMATELY BALANCED AND THEN THE MATRIX IS NORMALISED SO THAT
C     THE VALUE OF THE EUCLIDIAN NORM OF THE MATRIX IS EQUAL TO ONE.
C     THE EIGENVALUES ARE COMPUTED BY THE QR DOUBLE-STEP METHOD IN THE
C     SUBROUTINE HESQR.THE EIGENVECTORS ARE COMPUTED BY INVERSE ITERA-
C     TION IN THE SUBROUTINE REALVE,FOR THE REAL EIGENVALUES,OR IN THE
C     SUBROUTINE COMPVE,FOR THE COMPLEX EIGENVALUES.
C     REFERENCE,ALG.343,CACM,VOL11,NUMB.12,68.
C     AUTHOR,K.MORTENSSON 21/03-69.
C
C     A-MATRIX OF ORDER NXN (N MAX 20).
C     IA-DIMENSION PARAMETER.
C     T-NUMBER OF BINARY DIGITS IN THE MANTISSA OF SINGLE PRECISION
C     FLOATING-POINT NUMBER. (FOR UNIVAC 1108 T=27)
C     EVR-VECTOR OF DIMENSION N,CONTAINING THE REAL PARTS OF THE EIGEN-
C     VALUES.
C     EVI-VECTOR OF DIMENSION N,CONTAINING THE CORRESPONDING IMAGINARY
C     PARTS OF THE EIGENVALUES.
C     VECR-MATRIX OF ORDER NXN,CONTAINING THE REAL PARTS OF THE NORMA-
C     LIZED EIGENVECTORS.EIGENVECTOR NUMBER I IS FOUND IN THE FIRST N
C     POSITIONS OF COLUMN I.
C     VECI-MATRIX OF ORDER NXN,CONTAINING THE CORRESPONDING IMAGINARY
C     PARTS OF THE EIGENVECTORS.
C     INDIC-VECTOR OF DIMENSION N INDICATING THE SUCCESS OF THE SUBROU-
C     TINE AS FOLLOWS.
C     VALUE OF INDIC(I)   EIGENVALUE I   EIGENVECTOR I
C            0               NOT FOUND      NOT FOUND
C            1               FOUND          NOT FOUND
C            2               FOUND          FOUND
C     THE REAL EIGENVECTOR IS NORMALISED SO THAT THE SUM OF THE SQUARES
C     OF THE COMPONENTS IS EQUAL TO ONE.
C     THE COMPLEX EIGENVECTOR IS NORMALISED SO THAT THE COMPONENT WITH
C     THE LARGEST VALUE IN MODULUS HAS ITS REAL PART EQUAL TO ONE AND
C     THE IMAGINARY PART EQUAL TO ZERO.
C     THE ORIGINAL MATRIX A IS DESTROYED IN THE SUBROUTINE.
C
C     SUBROUTINE REQUIRED
C             SCALE
C             HESQR
C             REALVE
C             COMPVE
C
      DOUBLE PRECISION D1,D2,D3,PRFACT
C
      DIMENSION A(IA,IA),VECR(IA,IA),VECI(IA,IA),EVR( 1),EVI( 1),
     1INDIC( 1)
      DIMENSION IWORK(20),LOCAL(20),PRFACT(20),SUBDIA(20),WORK1(20),
     1WORK2(20),WORK(20)
C
```

PROGRAM HEAD:

```
C     PROGRAM LOCCO
C
C     COMPUTES THE OPTIMAL CONTROL LAW OF CONTINUOUS LINEAR DYNAMIC
C     SYSTEMS WITH QUADRATIC LOSS.
C     REFERENCE, MORTENSSON, LINEAR QUADRATIC CONTROL PACKAGE,
C     PART I - THE CONTINUOUS PROBLEM, REPORT 6802, LUND INSTITUTE OF
C     TECHNOLOGY, DIVISION OF AUTOMATIC CONTROL.
C     AUTHOR,K.MORTENSSON 29/01-68.
C
C     NR-IF NR .LT. 100, DATA CARDS FOR AN EXAMPLE IS FOLLOWING,
C     AND THE EXAMPLE IS EXECUTED. IF NR .GE. 100 THERE ARE NO MORE
C     DATA TO BE EXECUTED.
C     N-NUMBER OF STATES(MAX 10).
C     NU-NUMBER OF INSIGNALS(MAX 10).
C     ITIME-NUMBER OF EQUIDISTANT POINTS IN WHICH S AND L ARE COMPUTED.
C     THE FINAL TIME T1 IS NOT INCLUDED.
C     ITER-ITER=0 MEANS THAT THE FUNDAMENTAL MATRIX WILL BE COMPUTED
C     FOR EACH STEP,ITER≠1 MEANS THAT THE FUNDAMENTAL MATRIX IS COMPU-
C     TED ONLY FOR THE FIRST STEP AND THEN USED IN THE OTHER STEPS.
C     TDIF-TIME DIFFERENCE BETWEEN THE POINTS.
C     IPRINT-ONLY EVERY IPRINT POINT IS PRINTED.
C
C     SUBROUTINE REQUIRED
C            RICCE
C            MEXP7
C            GJRV
C            NORM
C
      DIMENSION A(10,10),B(10,10),Q0(10,10),Q1(10,10),Q2(10,10)
      DIMENSION S(10,10),UL(10,10),C(10,10)
C
```

PROGRAM HEAD:

```
      SUBROUTINE RK1ST(T,YIN,H,YE,N,FUNC)
C
C     SOLVES THE SYSTEM OF ORDINARY NON-LINEAR DIFFERENTIAL
C     EQUATIONS DX/DT=F(X,T) WITH FOURTH ORDER RUNGE-KUTTA ONE
C     STEP METHOD.
C     REFERENCE,REVISED REPORT ON ALGOL 60,CACM.
C     AUTHOR,K.MORTENSSON 15/01-68.
C
C     T-ACTUAL TIME.
C     YIN-ACTUAL VALUE OF THE VARIABLES X.
C     H-INTEGRATION STEP LENGTH.
C     YE-THE VALUE OF X AT TIME T+H.
C     N-NUMBER OF EQUATIONS (MAX 10).
C     FUNC- A SUBROUTINE XXX (WITH NO ARGUMENTS), WHICH COMPUTES
C     FUNCTION VALUE F(X,T)=DX/DT IN THE POINT (X,T). THE VARIABLES
C     T,X,DX/DT LIE IN A COMMON BLOCK CALLED /FUNCT/.
C
C     SUBROUTINE REQUIRED
C             (FUNC)
C
      DIMENSION YIN(1),YE(1),W(10),Z(10),A(5)
C
      COMMON/FUNCT/ TE,W,Z
C
```

3-P2-0

PROGRAM HEAD:

```
      SUBROUTINE MEXP7(A,B,N,IA,NOTRAC)
C
C     COMPUTES B=EXP(A) BY ORIGIN SHIFT AND SERIES EXPANSION USING 7
C     TERMS.
C     AUTHOR,K.MORTENSSON 15/11-67.
C
C     A-NXN-MATRIX.
C     B-NXN-MATRIX.
C     IA-DIMENSION PARAMETER.
C     NOTRAC=0 MEANS THAT NO TRACE
C     COMPUTATION WILL BE PERFORMED.
C     MAXIMUM ORDER OF A AND B =20.
C     THE MATRIX A IS DESTROYED.
C
C     SUBROUTINE REQUIRED
C            NORM
C
      DOUBLE PRECISION DTRAA,CC
C
      DIMENSION A(IA,IA),B(IA,IA),C(7,20,20)
C
```

PROGRAM HEAD:

```
C     PROGRAM SUBOP
C
C     PROGRAM FOR COMPUTING SUBOPTIMAL LINEAR CONTROL LAWS.
C     THE DEVIATION FROM THE FULL OPTIMAL LINEAR CONTROL LAW IS
C     TAKEN AS V=TRACE((S(L)-SOPT)*R0) WHERE SOPT IS THE SOLUTION
C     OF THE FULL OPTIMAL RICCATIEQUATION,S(L) THE SOLUTION OF
C     (A-B*L)T*S(L)+S(L)*(A-B*L)=-(Q1+LT*Q2*L) AND R0 THE COVARIANCE
C     MATRIX FOR THE INITIAL STATE.THE SYSTEM IS ASSUMED TO BE
C     DX/DT=A*X+B*U AND THE LOSS FUNCTION INT(XT*Q1*X+UT*Q2*U).
C     AUTHOR,K.MORTENSSON 25/08-68.
C
C     A-SYSTEM MATRIX OF ORDER NXN.
C     B-SYSTEM MATRIX OF ORDER NXNU.
C     Q1-LOSS FUNCTION MATRIX OF ORDER NXN.
C     Q2-LOSS FUNCTION MATRIX OF ORDER NUXNU.
C     SOPT-THE SOLUTION OF THE FULL OPTIMAL PROBLEM,ORDER NXN.
C     UL-ORDER NUXN.THE ELEMENTS OF UL SPECIFIED BY IX WILL BE USED AS
C     A STARTING POINT FOR THE MINIMIZATION.A SUITABLE CHOICE OF UL
C     IS THE FEEDBACK MATRIX FOR THE FULL OPTIMAL SYSTEM.
C     R0-COVARIANCE MATRIX FOR THE INITIAL STATE,ORDER NXN.
C     IX-IX(I,J) IS SET 1 IF FEEDBACK IS DESIRED FROM STATE J TO
C     CONTROL VARIABLE I,0 OTHERWISE.ORDER NUXN.
C     NR- IF NR .LE. 99,DATA CARDS FOR A PROBLEM TO BE SOLVED IS
C     FOLLOWING.IF NR .GT. 99 NO MORE PROBLEMS ARE TO BE SOLVED.
C     NEWA,NEWB,NEWQ1,NEWQ2,NEWSOP,NEWUL,NEWR0,NEWIX-ARE SET 0 IF THE
C     PREVIOUS VALUES OF THE CORRESPONDING PARAMETERS ARE TO BE USED,
C     1 IF NEW VALUES ARE TO BE READ.
C     IPRINT-IF IPRINT=1,ALL STEPS IN THE MINIMIZATION ROUTINE ARE
C     PRINTED.IF IPRINT=0,ONLY THE OPTIMAL SOLUTION IS PRINTED.
C     MAX DIMENSION OF N AND NU=8.
C     THE PARAMETERS THAT MUST BE READ FOR EVERY SET OF DATA ARE-
C     NR
C     N,NU,NEWA,NEWB,NEWQ1,NEWQ2,NEWSOP,NEWUL,NEWR0,NEWIX
C     NEW VALUES FOR A,B,Q1,Q2,SOPT,UL,R0,IX (OPTIONAL)
C     IPRINT
C
C     SUBROUTINE REQUIRED
C             XFUM
C             XFUNC
C             XSCAP
C             XMONI
C             ATPAQ
C             MIART
C             EIGS
C
      DIMENSION A(8,8),B(8,8),Q1(8,8),Q2(8,8),SOPT(8,8),C(8,8),D(8,8)
      DIMENSION SL(8,8),R0(8,8),UL(8,8),IX(8,8),ULX(64),VLX(8),VL(8,8)
      COMMON/SYSTEM/ N,NU,A,B,Q1,Q2,R0,SOPT,IX
C
```