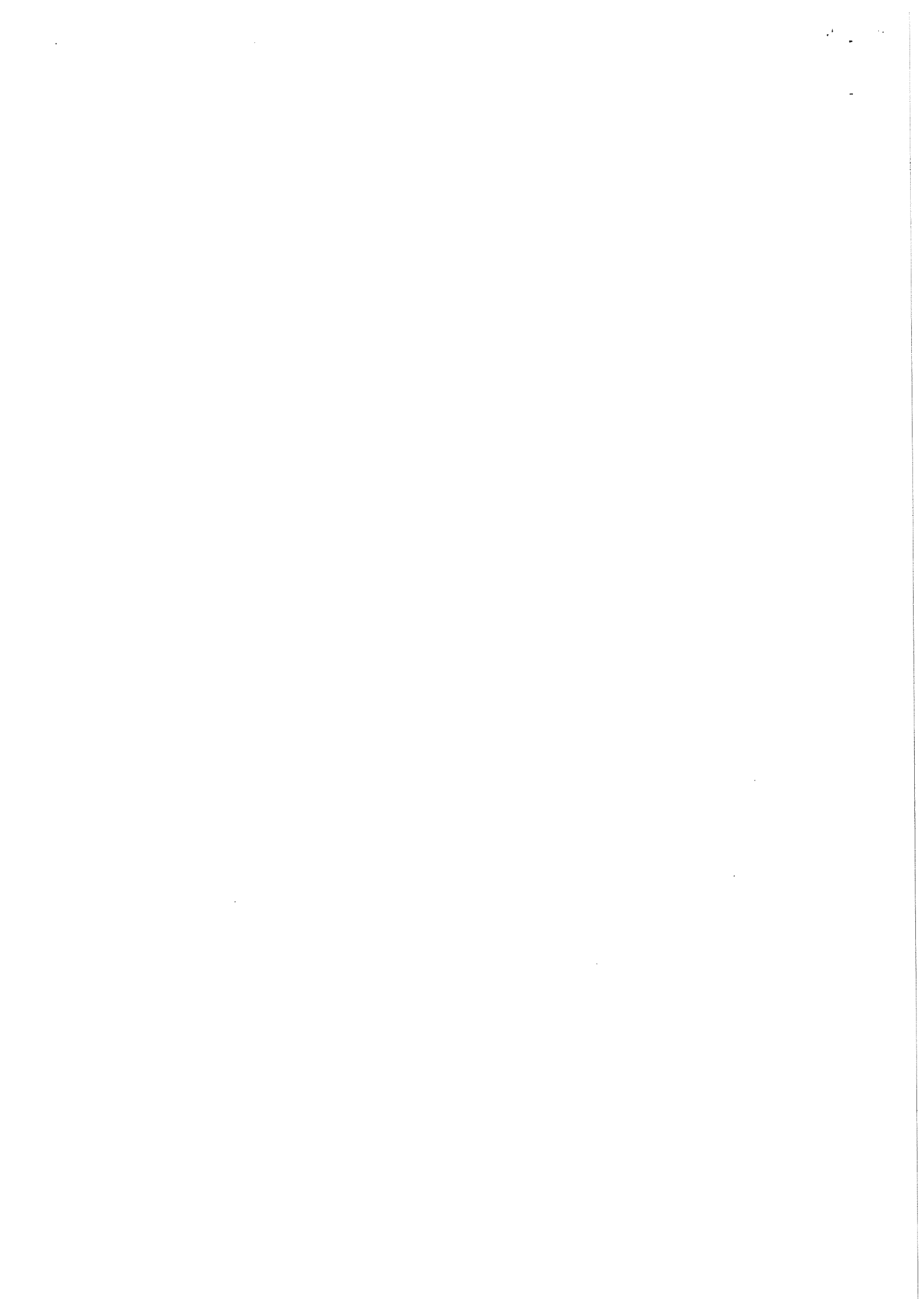


Numerisk lösning av ett optimalstyrproblem med evolutionsmetoden

Anders Ahlén
Göte Solbrand
Mikael Sternad

Oktober 1982



INNEHALL	SID
1. Problembeskrivning	1.
2. Evolutionsmetoden	4.
3. Beskrivning av systemekvationerna och simuleringsförfarandet	10.
4. Utvärdering av evolutionsmetoden	12.
5. Pendlingsdämpande körning till maximal hastighet	18.
6. Pendlingsdämpande körning till förutbestämt mål	27.
7. Slutsatser och diskussion	37.
8. Referenser	39.
Appendix 1: Simuleringsdata	
Appendix 2: Programlistor	

SAMMANFATTNING

En heuristisk optimeringsmetod, evolutionsmetoden, har studerats. Metoden, som har inspirerats av den Darwinistiska utvecklingen genom naturligt urval, är enkel att implementera. Den är speciellt effektiv vid minimering av kriteriefunktioner som innehåller diskontinuiteter samt för problem där många parametrar skall bestämmas. Metoden tillämpas på ett optimalstyrproblem. Det gäller där att på minimal tid föra en rörlig tralla med hängande pendlande last till ett givet sluttillstånd. Jämförelse görs med två publicerade metoder för beräkning av lastpendlingsdämpande styrning av traverskranar: Dels en enkelt beräkningsbar suboptimal bang-zero-bang styrning och dels en tidsoptimal styrning.

1. PROBLEMBESKRIVNING

Metoder för optimal styrning av traverskranar har tidigare studerats av bl a Mårtensson [1]. En tillfredsställande nästan optimal lösning har presenterats av Sternad [4]. I denna rapport beskrivs hur en enkel metod, evolutionsmetoden, kan användas för optimal styrning. Två optimeringsuppgifter studeras och jämföres med tidigare presenterade lösningar.

Problem 1

En traverskran startar i vila med lasten hängande mitt under kranen, se fig 1.1. Med lämpligt vald horisontell acceleration av kranen skall denna fås att så snabbt som möjligt uppnå maximal hastighet med så liten restpendling hos lasten som möjligt. Under accelerationen förkortas slinglängden, dvs lasten hissas upp. Styrsignalen, trallans acceleration, är begränsad.

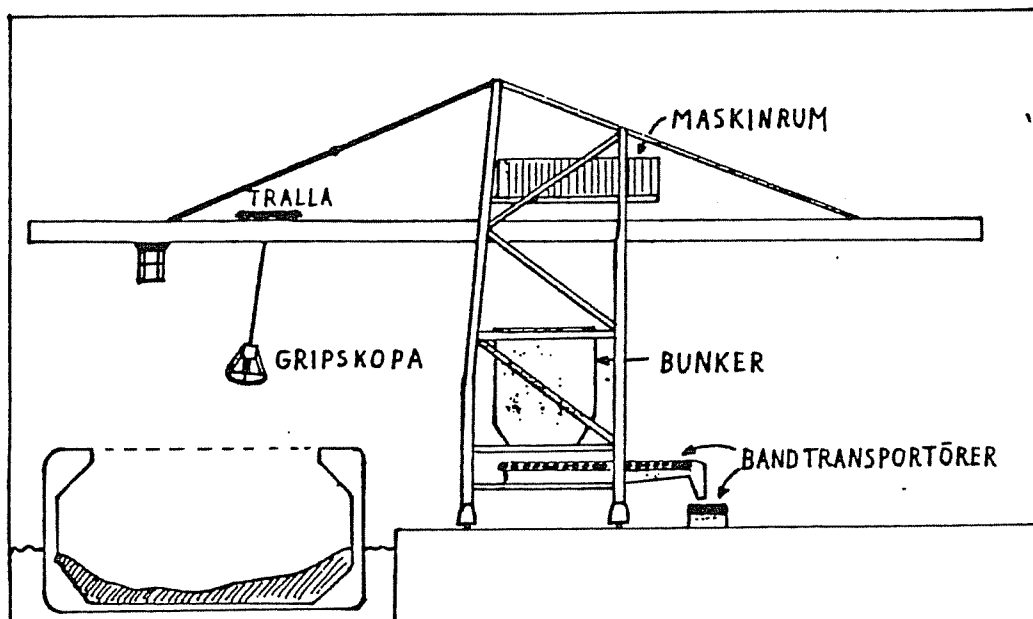


fig 1.1

Problem 2

Från vila skall traverskranen med last på kortast möjliga tid förflyttas en bestämd sträcka. Vid målet skall lasten ha minimal restpendling. Även här skall lasten hissas upp. Både trallaccelerationen och trallhastigheten är begränsade.

Tillståndsekvationerna för detta system finns härledda i [4] avsnitt 5. Ekvationerna presenteras i denna rapport i avsnitt 3. Som styrstrategi ansättes Bang-Bang-styrning. Styrsignalen är då maximal acceleration respektive maximal retardation hos trallan. När maximal hastighet har uppnåtts är accelerationen noll. De parametrar som skall bestämmas är då omslagstidpunkterna. Vidare antas lasten lyftas med konstant hastighet

Mårtensson [1] löser problem 2 på ett icke lineariserat system. Han utvidgar tidigare kända metoder för numerisk lösning av optimalstyrningsproblemet i Maximumprincipformuleringen ([2], kapitel 7) för att klara av begränsningar hos både styrvariabler och tillståndsvariabler. Problemet löses med differentiell dynamisk programmering. Sluttillståndet (ingen lastpendling, trallans slutläge uppnått) är förutbestämt.

Sternad [4] löser problem 2 med Bang-Zero-Bang-styrning av en lineariserad modell. Vidare tillåtes att lasten har en (väl kontrollerad) utpendling vid slutläget.

Metoden i [4] är enkel och ger korta beräkningstider (under 1 s), men körtiderna blir ej helt optimala. Metoden i [1] löser optimeringsproblemet men den är komplicerad och tidskrävande att implementera samt ger långa beräkningstider (1-10 min).

Problemet kan också tänkas formuleras som ett linjärvadratisk optimeringsproblem där styrenergien ($\int_0^t u^2 dt$) skall minimeras. Vid styrning av hamnkranar är tidsåtgången av stort ekonomiskt intresse, medan energiåtgången är mindre intressant. Den linjärvadratiske formuleringen löser alltså ett felaktigt ställt problem. I detta fall måste man också ignorera begränsningarna i trallhastighet och trallacceleration.

Den väg vi valt att angripa problemet på är att direkt minimera något kriterium J genom att för olika insignaler u simulera systemet

$$\dot{x} = f(x,u) \quad 0 \leq t \leq t_f$$

Med en sådan formulering ger begränsade styr- och tillståndsvariabler inte upphov till några större problem. Begränsningarna byggs helt enkelt in som ett par villkorssatser i simuleringsrutinen. Med detta angreppssätt kan man inte ha specificerad sluttid eller exakt givna sluttillstånd. Avvikelser från önskad sluttid och sluttillstånd får istället straffas i kriteriefunktionen J . Den kan lämpligen vara en kvadratisk funktion av lastpendlingshastigheten vid sluttiden, sluttiden och trallans läge vid sluttiden (se avsnitt 5).

J blir alltså en funktion av parametrarna hos styrsignalen (omslagstiderna hos bangbang-trallaccelerationen). Det finns många minimeringsmetoder att välja bland (steepest descent, konjugerande gradientmetoden osv). En speciell heuristisk sökmetod fångade dock vårt intresse: Evolutionsmetoden. Denna metod, som har inspirerats av den Darwinistiska utvecklingen genom naturligt urval, beskrivs i nästa avsnitt.

2. EVOLUTIONSMETODEN

Den biologiska utvecklingen är ett resultat av mutationer och naturligt urval. Detta bildar grunden för den optimeringsmetod, beskriven bl a av Rechenberg [6], som vi undersökt och använt.

Förädlingsstrategi [(μ, λ)-evolutionsstrategi]

Låt μ individer vara föräldrar till λ barn ($\mu \leq \lambda$). Välj ut de enligt något kriterium μ bästa individerna och låt dessa bli föräldrar till nästa generation av λ barn. Vid urvalet kan de μ bästa individerna antingen sökas bland både föräldrar och barn eller enbart bland barnen.

Om valet sker bland både föräldrar och barn finns risk att utvecklingen avstannar eller, i optimeringstermer, att man fastnar i ett lokalt minimum. I det följande betraktas endast strategier där urvalet sker enbart bland barnen. (En tidig tillämpning av evolutionsmetoden gjordes av P.H. Winston på IBM 1960 [7]. Han lät datorprogram för damspel som använde något olika strategier spela mot varandra. Den vinnande strategin fick sedan spela mot en variant av sig själv. Metoden var alltså en (1,1)-evolutionsstrategi, där den bästa av föräldrarna och barnet valdes.)

(1, λ)-evolutionsstrategi

Ett specialfall av förädlingsstrategin fås om den bästa individen får bli ensam förälder till nästa generation. Denna metod kan användas som sökalgoritm vid följande typ av optimeringsproblem:

Bestäm parametervektorn $P^T = (p_1 \dots p_n)$
så att $J(p_1 \dots p_n)$ minimeras under givna bivillkor.

För att lösa optimeringsproblemet ansättes en begynnelsekattning $P_{0,n}$. Därefter bildas en ny generation skattningar $P_{x,n}$ ur

$$P_{x,n} = P_{0,n} + Z \quad x = 1, \dots, \lambda$$

där

$$Z^T = (z_1 \dots, z_n) \quad \text{och } z_i = N(0, s^2)$$

Den parameterskattning $P_{i,n}$ som ger lägsta värdet på kriteriet J väljes som $P_{0,n}$ för bildande av en ny generation skattningar. Förfarandet upprepas tills J har minimerats.

Problemet är att välja lämplig standardavvikelse s . Väljer man för litet s i början, kan man fastna i ett eventuellt lokalt minimum, medan för stort s gör att nya skattningar fjärrmar sig från optimum. Det är också rimligt att anta att s bör avta ju närmare man befinner sig den optimala lösningen. Dessutom kommer s att påverka konvergensthastigheten.

Som mått på godheten hos den nya generationen skattningar anges i [3] talet φ = väntevärdet av hur mycket den bästa parameterskattningen har närmat sig optimum i parameterområdet.

$$\varphi_{1,\lambda} = c_{1,\lambda} \cdot s - \frac{n \cdot s^2}{2 \cdot R_E}$$

där n = antalet parametrar

$R_E = \|P_i - P_{opt}\|$ (skattningens (obekanta) avstånd till optimum)

s = standardavvikelse

$c_{1,\lambda}$ = konvergensparameter

För $c_{1,\lambda}$ gäller $c_{1,\lambda} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\lambda}{2^{\lambda-1}} \int_{-\infty}^{+\infty} z \cdot e^{-z^2} \{1 - \text{erf}(z)\}^{\lambda-1} dz$

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt.$$

Se även tabell 1.

tabell 1.1

λ	$c_{1,\lambda}$	λ	$c_{1,\lambda}$	λ	$c_{1,\lambda}$	λ	$c_{1,\lambda}$	λ	$c_{1,\lambda}$
1	0,0000000	2	0,5641896	3	0,8462844	4	1,0293754	5	1,1629645
6	1,2672064	7	1,3521784	8	1,4236003	9	1,4850131	10	1,5387527
11	1,5864363	12	1,6292275	13	1,6679901	14	1,7033814	15	1,7359133
16	1,7659912	17	1,7939418	18	1,8200316	19	1,8444813	20	1,8674748
21	1,8891677	22	1,9096921	23	1,9291615	24	1,9476739	25	1,9653145
26	1,9821578	27	1,9982693	28	2,0137070	29	2,0285223	30	2,0427610
31	2,0564643	32	2,0696690	33	2,0824086	34	2,0947132	35	2,1066100
36	2,1181240	37	2,1292780	38	2,1400927	39	2,9505873	40	2,1607791
41	2,1706845	42	2,1803183	43	2,1896943	44	2,1988253	45	2,2077231
46	2,2163989	47	2,2248628	48	2,2331245	49	2,2411930	50	2,2490767
51	2,2567835	52	2,2643207	53	2,2716955	54	2,2789143	55	2,2859833
56	2,2929084	57	2,2996951	58	2,3063486	59	2,3128738	60	2,3192755
61	2,3255580	62	2,3317255	63	2,3377821	64	2,3437314	65	2,3495771
66	2,3553226	67	2,3609712	68	2,3665259	69	2,3719896	70	2,3773652
71	2,3826553	72	2,3878624	73	2,3929891	74	2,3980376	75	2,4030100
76	2,4079086	77	2,4127353	78	2,4174922	79	2,4221810	80	2,4268035
81	2,4313615	82	2,4358566	83	2,4402905	84	2,4446646	85	2,4489804
86	2,4532393	87	2,4574428	88	2,4615921	89	2,4656886	90	2,4697334
91	2,4737279	92	2,4776731	93	2,4815702	94	2,4854204	95	2,4892246
96	2,4929839	97	2,4966994	98	2,5003719	99	2,5040025	100	2,5075922
101	2,5111417	102	2,5146520	103	2,5181238	104	2,5215582	105	2,5249558
106	2,5283175	107	2,5316440	108	2,5349360	109	2,5381943	110	2,5414196
111	2,5446125	112	2,5477738	113	2,5509040	114	2,5540038	115	2,5570739
116	2,5601147	117	2,5631269	118	2,5661109	119	2,5690675	120	2,5719970
121	2,5749000	122	2,5777770	123	2,5806284	124	2,5834547	125	2,5862564

Med normerade storheter fås

$$\varphi^* = \frac{\varphi \cdot n}{R_E}$$

$$s^* = \frac{s \cdot n}{R_E}$$

Vilket ger

$$\varphi_{1,\lambda}^* = c_{1,\lambda} \cdot s^* - \frac{1}{2} s^{*2}$$

φ^*/λ är ett mått på förhållandet mellan konvergenshastigheten hos metoden och mängden beräkningar som måste utföras i varje evolutionssteg.

En plottning av $\frac{\varphi^*}{\lambda}$ som funktion av s^* visas i figur 2.1.

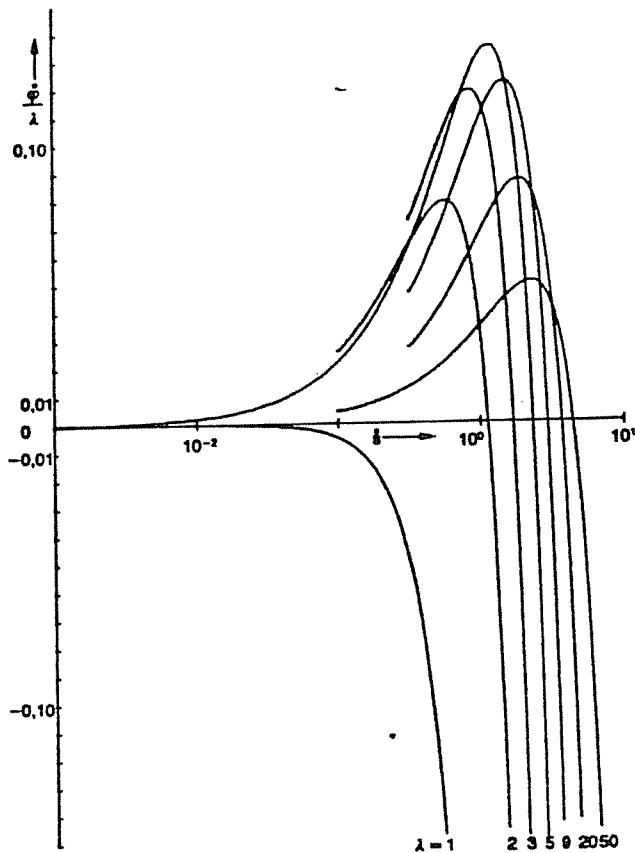


fig 2.1

Av figuren framgår att en (1,1)-evolutionsstrategi (dvs $\lambda=1$, vilket är liktydigt med en slumpvandring i parameterrummet), har godhetstalet noll. För $\lambda > 1$ finnes ett område ($\varphi^* > 0$) för vilket nya skattningar i genomsnitt ger någon skattning som närmar sig optimum. Detta område kallas evolutionsfönster.

Av figuren framgår också att maximal absolut konvergenstakt (=förbättring per steg/beräkningstiden per steg $\sim \varphi^*/\lambda$) ges med λ mellan 3 och 9.

Det optimala värdet på standardavvikelsen är

$$s_{opt} = \frac{s_{opt}^* \cdot R_E}{n} = \frac{c_{1,\lambda} \cdot R_E}{n}$$

Under optimeringens gång måste s ändras så att s^* är optimal eller åtminstone ligger i evolutionsfönstret. När vi närmar oss optimum avtar R_E och därmed s_{opt} .

Adaptiv steglängdsändring

Den optimala evolutionssteglängden varierar, varför s bör vara en variabel. Enligt [3] är ett lämpligt val att låta 1/3 av den nya generationen bildas med $s_{i+1} = \alpha \cdot s_i$, 1/3 med $s_{i+1} = s_i$ och 1/3 med $s_{i+1} = \frac{1}{\alpha} s_i$, där α är ett tal mellan 1,1 och 2,0. Se Figur 2.2.

Den vinnande strategin kommer med stor sannolikhet att tillhöra den tredjedel av barnstrategierna vars S_{i+1} ligger närmast evolutionsfönstrets mitt. Denna standardavvikelse blir då utgångspunkten S_i för variationerna hos S i nästa generation.

Valet av standardavvikelsen s_0 för bildande av första generationen har stor betydelse för konvergensthastigheten. Som tumregel för val av s_0 anges

$$s_0 = \frac{L \cdot c_{1,\lambda}}{\sqrt{6n}}$$

där L = (uppskattade) medelvärdet av systemparametrarnas avvikelse från optimala värden.

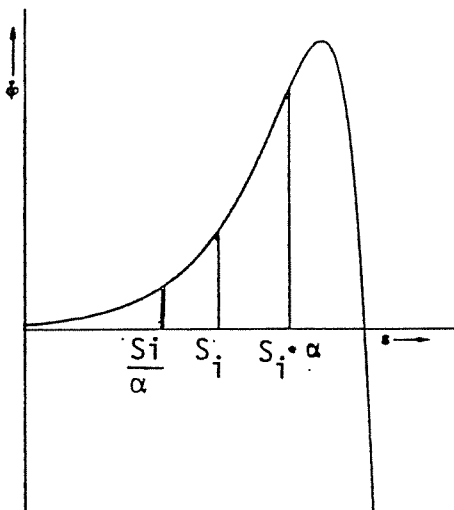


fig 2.2

Den optimeringsmetod som beskrivits ovan är enkel att tillämpa på problem där många parametrar skall bestämmas. Vi har därför valt evolutionsmetoden för att bestämma optimal styrstrategi vid styrning av traverskranen.

Ett programpaket för test av evolutionsmetoden vid lösning av de beskrivna optimeringsproblemen har utvecklats. Programpaketets struktur framgår av figur 2.3.

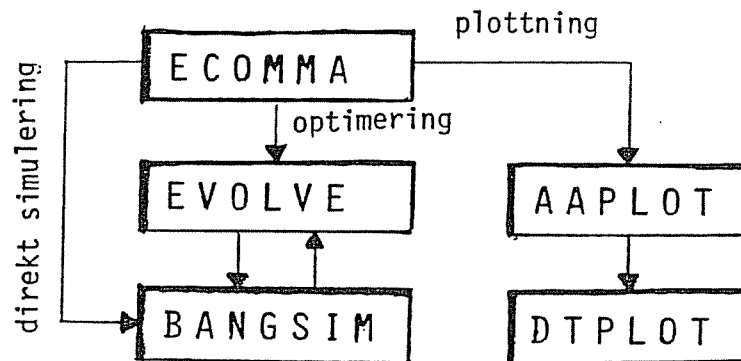


fig 2.3

- | | |
|---------|---|
| ECOMMA | utgör huvudprogram och sköter kommandoavkodning |
| EVOLVE | bestämmer den nya generationen parameterskattningar och beräknar efter simuleringar av systemet vilket parameter-val som ger lägsta förlustfunktionen |
| BANGSIM | simulerar systemet och returnerar variablernas värden i sluttillståndet |
| AAPLOT | styr programpaketet DTPLLOT |
| DTPLLOT | är ett befintligt plotpaket. |

Antalet parameterskattningar λ i varje ny generation har valts till 9. Vidare har begränsningar införts så att standardavvikelsen s ej understiger 0,0066. Anledningen är att omslagstiderna tillåtes anta endast diskret värden med ett intervall på 0,01 s. Om denna begränsning ej införs kan metoden fastna i områden i parameterrummet där gradienten är liten.

Se vidare programutskrifter i appendix 2.

3. BESKRIVNING AV SYSTEM EKVATIONERNA OCH SIMULERINGSFÖRFARANDET.

Bang-Bang strategi används för trallacceleration och linhissning. Den använda modellen utgörs av ett antal differential-ekvationer som löses med en tvåpunkts metod (där felet avtar som h^2). För vidare detaljer se [4].

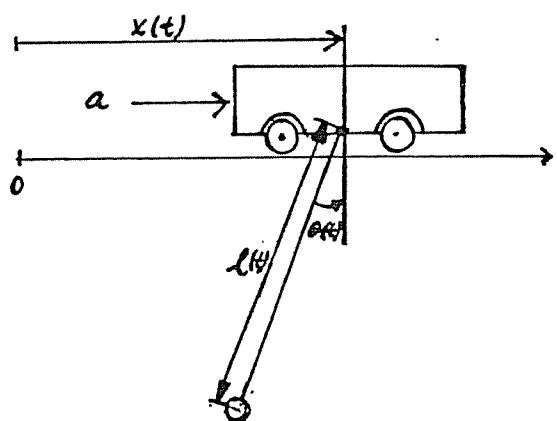


fig 3.1

- θ = vinkel
- $\dot{\theta}$ = vinkelhastighet
- $\ddot{\theta}$ = vinkelacceleration
- X = trallans läge
- V = trallans hastighet
- a = trallans acceleration
- l = linans längd
- \dot{l} = linans hastighet
- \ddot{l} = linans acceleration
- h = steglängd

Vinkelaccelerationen ges av [4].

$$\ddot{\theta}(t) = -\frac{1}{l(t)} \left(2 \dot{l}(t) \dot{\theta}(t) + a(t) \cos[\theta(t)] + g \sin(\theta(t)) \right)$$

ur denna ekvation fås vinkelhastighet och vinkelläge enligt

$$\dot{\theta}(t+h) = \dot{\theta}(t) + h \ddot{\theta}(t)$$

$$\theta(t+h) = \theta(t) + h \dot{\theta}(t+h)$$

Omslagstiderna för linaccelerationen räknas ut i en särskild rutin (ALIN) som levererar accelerationsförfarandet $\ddot{l}(t)$.

$$\ddot{l}(t) = \pm \ddot{l}_{\max}$$

linhastighet och linläge fås då enligt

$$\dot{l}(t+h) = \dot{l}(t) + h \cdot \ddot{l}(t)$$

$$l(t+h) = l(t) + h \dot{l}(t+h)$$

Omslagstiderna för max trallacceleration/retardation ges av en särskild rutin (EVOLVE).

Om trallhastigheten uppnår maxvärdet sätts accelerationen = 0.

$a(t)$ - given

trallans hastighet och läge fås av.

$$v(t+h) = v(t) + h \cdot a(t)$$

$$x(t+h) = x(t) + hv(t+h).$$

Steglängden varierar och är antingen h eller $hh = 10 \times h$, där h givet ($h=0.01$ s). Nära omslagstiderna används den kortare steglängden, i övrigt används den längre. Steglängden för plottningen är NT ($= hh = 0.1$ s).

Genom att använda denna typ av variabel steglängd uppnås fyra villkor.

- 1) Den långa steglängd som normalt används, $hh = 0,1$ s är tillräckligt liten för att integrationsfelet under en körning ska bli försumbart liten.
- 2) De är tillräckligt stor för att simuleringarna ska gå snabbt, vilket inte saknar betydelse. (10 s körning med 3 omslagpunkter kräver 97 steg med lång steglängd och 30 steg med kort steglängd. Ett evolutionssteg kräver 9 simuleringar. En evolutionsoptimering kräver mellan 20 och 60 evolutionssteg, d v s totalt 22860-91440 steg).
- 3) Den korta steglängden används i ett intervall av längd hh ($=0,1$ s) som omger en accelerationsändring. Detta garanterar att tidpunkten för accelerationsändringen fastställs med tillräckligt hög precision h ($=0,01$ s).
- 4) Plottningen blir enkel. Simuleringsresultat för trallhastighet och lastpendlingsvinkel för varje 0,1 s-intervall läggs in i strängar. Detta sker alltså för varje steg då man använder lång steglängd, och för var 10:e steg då den korta steglängden används.

Andra simuleringsmetoder, t ex Runge-Kutta med variabel eller med fast steglängd hade krävt mer omfattande programmering för att uppfylla de fyra villkoren. De hade inte gett oss några klara fördelar som hade kunnat motivera merarbetet.

4. UTVÄRDERING AV EVOLUTIONSMETODEN

4.1. Testkörning med två parametrar

Testkörningen utgörs av en bang-bangacceleration, med två omslagpunkter, upp till max. hastighet, som uppnås vid tiden t_f . Tiderna för de båda omslagen är parametrar i strategin (se Fig. 5.1), max. hastighet = 4 m/s, accelerationen = $\pm 1 \text{ m/s}^2$.

Linlyft sker från 23,5 m till 11 m linlängd. För detaljer se avsnitt 5.

Kriteriet som skall minimeras straffar lastpendlingsvinkeln och vinkelaccelerationen vid sluttiden samt sluttiden själv. Vi har valt

$$J = 10^6 \cdot g \cdot \theta(t_f)^2 + 10^6 \cdot l(t_f) \cdot \theta(t_f)^2 + 10^3 (t_f - 5)^2$$

(Beteckningarna är desamma som i avsnitt 3).

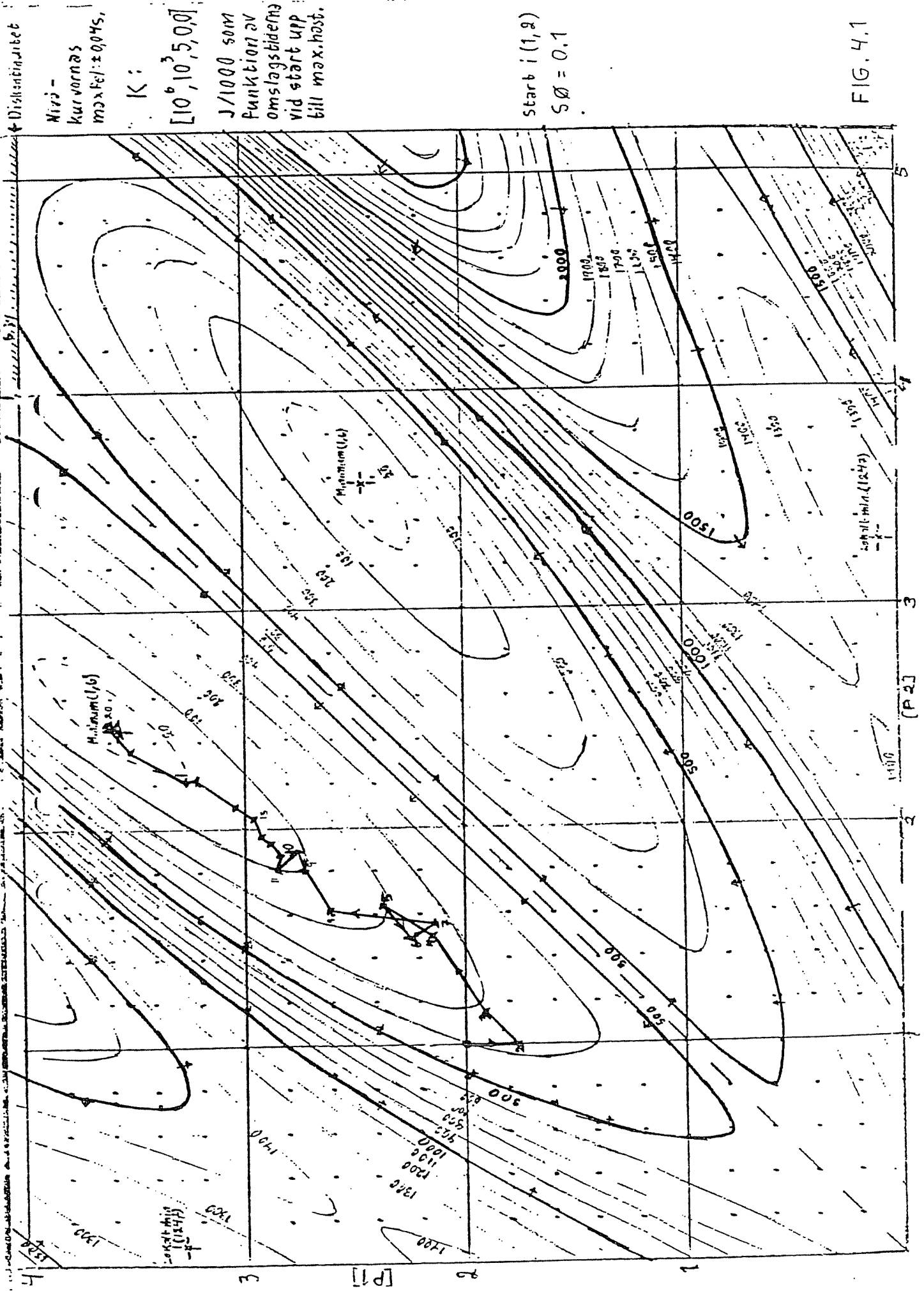
I Kap. 5 motiveras närmare valet av J-kriterium. Här ska vi koncentrera oss på hur väl metoden minimerar det givna kriteriet.

Nivåkurvor för $10^{-3} \cdot J$ som funktion av omslagstidpunkterna t_1 och t_2 (räknade i sekunder från starttiden) är inlagda i fig. 4.1. och 4.2. Symmetrin i figurerna m.a.p. $t_1 = t_2$ beror på att simuleringsrutinen Bangsim ordnar parametrarna med den minsta först.

Alla (t_1, t_2) med $t_1 \geq 4 \text{ s}$ och $t_2 \geq 4 \text{ s}$ ger samma resultat, ty då får man en avbrottslös acceleration upp till max. hastighet. Alla områden i fig. 4.1., 4.2. vars nivå ligger ovanför nivån för $(t_1, t_2) = (4,4)$ $\Rightarrow J \cdot 10^{-3} = 639$ ger alltså t o m sämre resultat än en maximal acceleration där ingen hänsyn tas till lastpendlingen.

I fig. 4.1 ser vi två minima: $(t_1, t_2) = (2.45, 3.57)$ och $(3.57, 2.45)$ samt två lokala minima: $(t_1, t_2) = (0.09, 3.29)$ och $(3.29, 0.09)$.

I Fig. 4.1 är en körning med start i (1.2) inlagd. För detta enkla problem konvergerar metoden på ca 20 evolutionssteg. En gradientmetod skulle dock ha tagitsig fram betydligt raskare. I fig. 4.2 är en körning med start i den elakt valda punkten (4,1) inlagd. Begynnelsestegstandardavvikelsen $S\emptyset = 0.2$ är visserligen för liten, men p g a den adaptiva steglängdsändringen förstoras steglängden. Metoden missar därför det lokala minimat, men fångas i de båda stora "dalarna" som ligger runt de båda absoluta min. punkterna.



↑ Diskretisiering
 Nivå -
 kurvornas
 max fel: ± 0,0045,

K:
 $[10^3, 10^3, 5, 0, 0]$

J/1000 som
 funktion av
 omslagsbiderna
 vid start upp
 till max.hast.

start i (1,2)
 $S\sigma = 0.1$

FIG. 4.1

Distansarbete

Nivå -
kurvernäs
max fel: ± 0,045,

K:

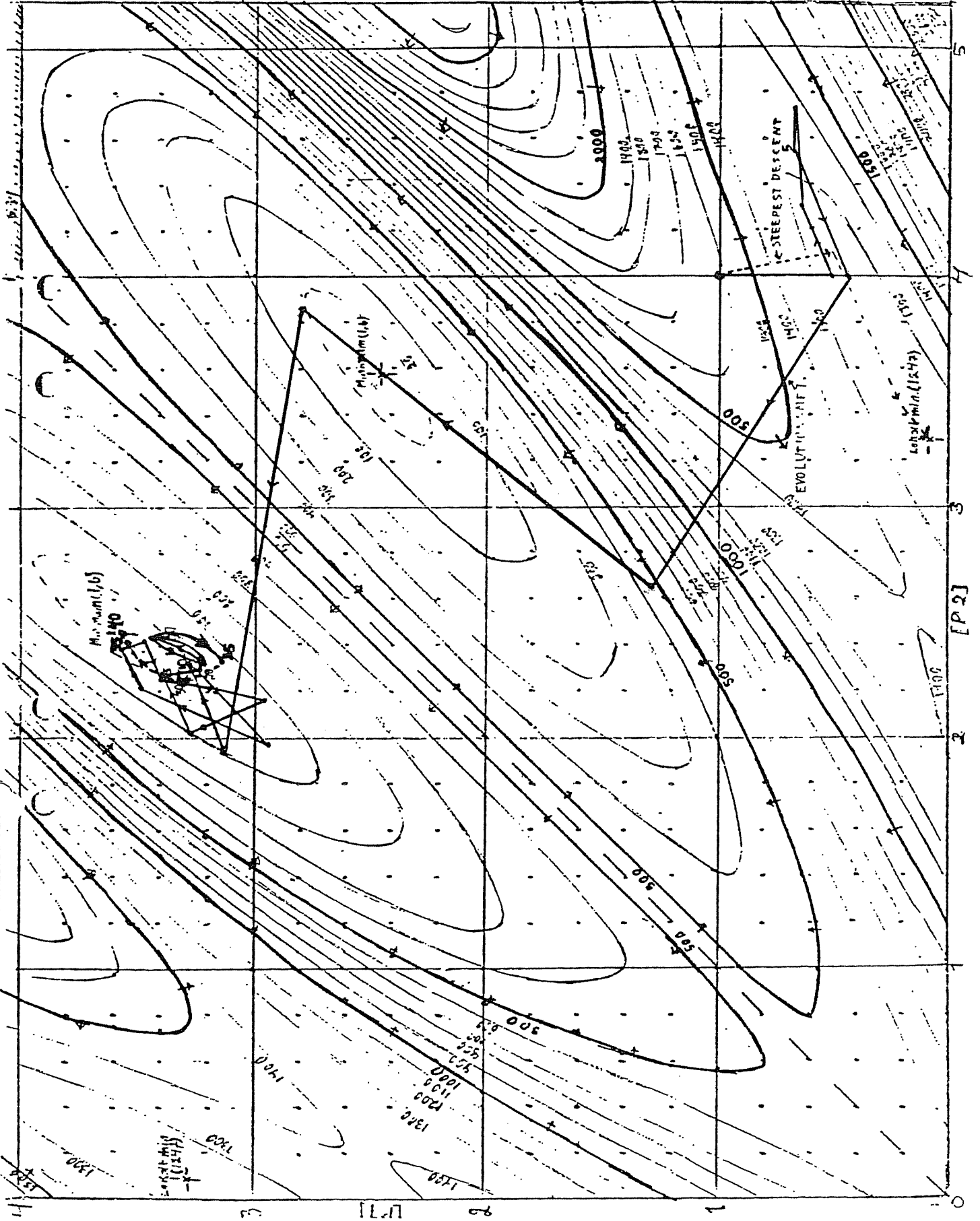
[10⁶, 10³, 5, 00]

J/1000 som
funktion av
omslagsbidena
vid start upp
bill max. hast.

START I
(4,1)

SØ = 0.2

FIG. 4.2



Efter 25 steg minskar evolutionssteglängden hastigt och efter 40 steg har metoden konvergerat i ett absolut minimum. I Fig. 4.3 är resultatet samt J och steglängden som funktion av antalet evolutionssteg plottade. I Fig. 5.3 visas en annan körning med samma startpunkt men med $S\emptyset = 0.1$.

I Fig. 4.2 är en simulering med steepest descentmetoden inlagd. Den konvergerar raskt och tveklöst mot ett lokalt minimum.

Ska man anförtro sina optimeringsproblem åt en metod som ibland, och då speciellt i exemplet i fig. 4.2, mest liknar en slumpvandring? Har man ett problem med få parametrar och konvex kriteriefunktion så är andra metoder definitivt bättre. Lättheten att skriva ett program för evolutionsmetoden upphäver då inte nackdelen med dess långsamhet.

Har man däremot ett problem med en komplicerad kriteriefunktion med lokala minima, sadelpunkter, diskontinuiteter, brus eller andra besvärligheter så är evolutionsmetodens förmåga att "se bortom horisonten" mycket värdefull. Ingen har ännu strikt definierat villkoren för att evolutionsmetoden ska konvergera. Man vet dock att kontinuitet hos J är ett för starkt villkor [3]. Brus i J stör gradientmetoder mer än evolutionsmetoden, som ju inte lägger så stor vikt vid det absoluta värdet av J , endast var någonstans bland "dotterpunkterna" det är minst.

Vi har i litteraturen sett påståenden om att evolutionsmetoden ska vara tidseffektivare än gradientmetoder för problem med ett stort antal parametrar. Beräkningsarbetet i varje steg växer ju med antalet dimensioner i parameterutrymmet för gradientmetoder, medan det förblir i stort sett oberoende av antalet parametrar för evolutionsmetoden.

Vi har dock inte kontrollerat dessa (i och för sig mycket rimliga) påståenden.

4.2. Sammanfattning av metodens egenskaper

Vi utförde ca 40 evolutionsoptimeringar när vi löste de båda ursprungliga uppgifterna. (Pendlingsdämpande acceleration till max. hastighet, avsn. 5, och pendlingsdämpande körning till fixerat mål, avsn. 6.). Antalet parametrar varierar mellan 2 och 7. De slutsatser som kan dras om metoden ur dessa körningar sammanfattas nedan:

Konvergens: Metoden konvergerar alltid inom 50 evolutionssteg. Den befinner sig oftast mycket nära minimum redan efter 20 steg. (Stämmer med exemplet i [3]).

I endast två fall konvergerade metoden mot ett lokalt minimum (se appendix I). I flera fall verkade den kunna ta sig ur lokala minima (sadel-punkter?).

Snabbhet: Ett evolutionssteg som innebär simulering av och "naturligt urval" mellan dotterstrategier med typiskt 10 s modellkörtdid (= 100 - 150 simuleringssteg) tog ca 4 s.

Våra körtider visade sig vara kortare än Mårtenssons (han angav 1-10 min cpu-tid per optimering). Några exakta jämförelser har vi dock inte gjort eftersom vi körde ett timesharing system, där körtiden starkt beror på antalet användare.

Steglängd: Adaptiva steglängdsändringen fungerar mycket effektivt. $\alpha = 1,5$ har valts. Införandet av en minimal steglängdsstandardavvikelse $S = 0,0066 S$ var dock nödvändig. Annars fastnar metoden lätt i områden med liten gradient. Steglängdens beteende överensstämde bra med exemplen i [3].

Väl av antalet dotterstrategier: $\lambda = 5$ är optimalt enl. [3]. Vi valde $\lambda = 9$ som ger snabbare konvergens, räknat i antal steg. Att välja de bästa av föräldrar och barn är mindre lyckat. Det ger visserligen strängt avtagande J , men leder lätt till att metoden fastnar (även detta nämndes i [3]). På funktioner som är eller kan antas konvexa är dock medtagande av föräldrastrategin en fördel, då det leder till snabbare konvergens.

Slumptal: Vi gjorde en simulering där rektangelfördelade slumptal användes istället för normalfördelade. För att modifiera en föräldrastrategi används istället $x \in R \left[\frac{-S_i}{0,577}, \frac{S_i}{0,577} \right]$ där S_i = standardavvikelse för motsvarande normalfördelning.

Fördel: Bör ge snabbare konvergens (färre slumptal ligger nära 0.)

Nackdel: Bör ge sämre möjligheter att ta sig ur lokala minima genom att något barn "hamnar bortom backkrönet", ty rektangelfördelningen har inte den "svans" av stora slumptal som normalfördelningen har.

I simuleringen fick vi mycket riktigt snabbare konvergens med rektangelfördelade slumptal. Ur endast en simulering kan dock inga säkra slutsatser dras. Fortsatta undersökningar skulle behövas.

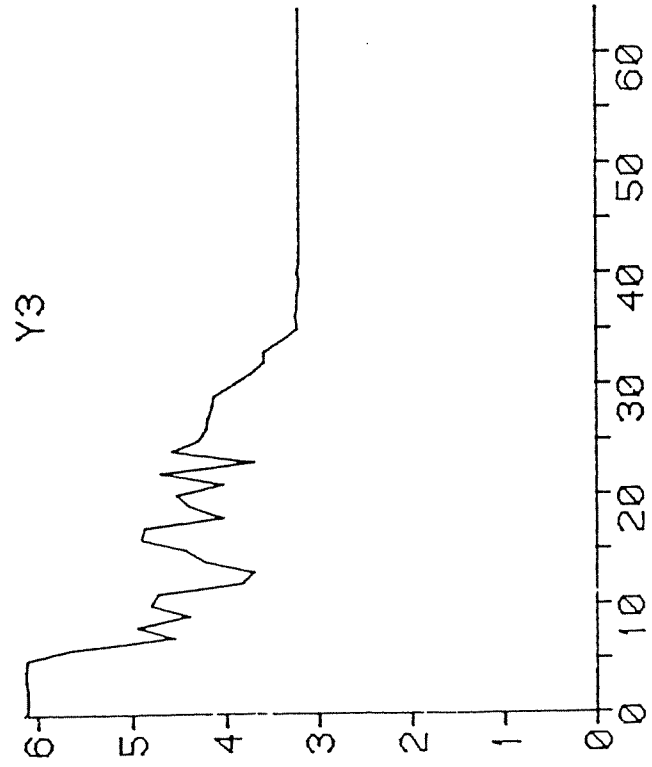
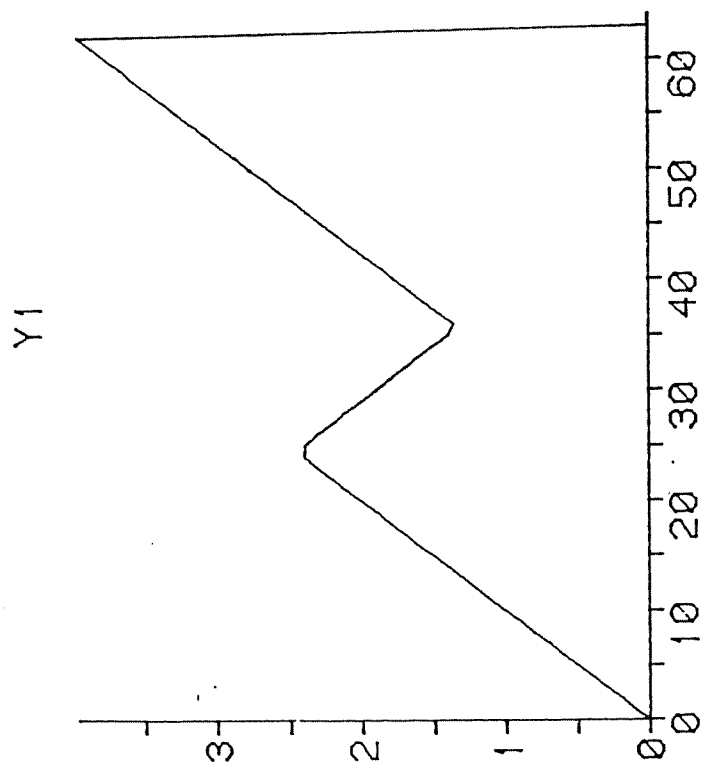
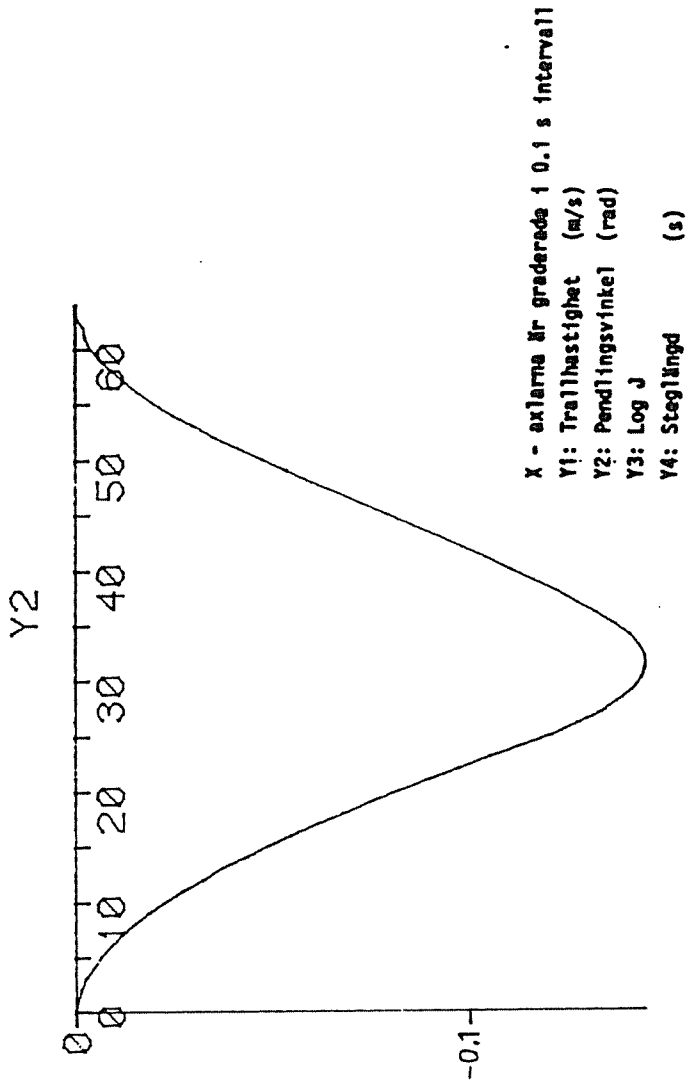


FIG. 4.3

5. PENDLINGSDÄMPANDE KÖRNING TILL MAXIMAL HASTIGHET.

I denna uppgift ska trallan på så kort tid som möjligt köras från "nolläge" till maxhastighet under bivillkoret att pendlingen ska vara "mycket liten" då maxhastigheten är uppnådd. Vi betraktar trallaccelerationen som insignal.

Det är känt [2], [5] att med bang-bang strategi krävs det minst två omslagspunkter för att uppfylla ovannämnda önskemål. Körningen kommer typiskt att se ut som fig. 5.1.

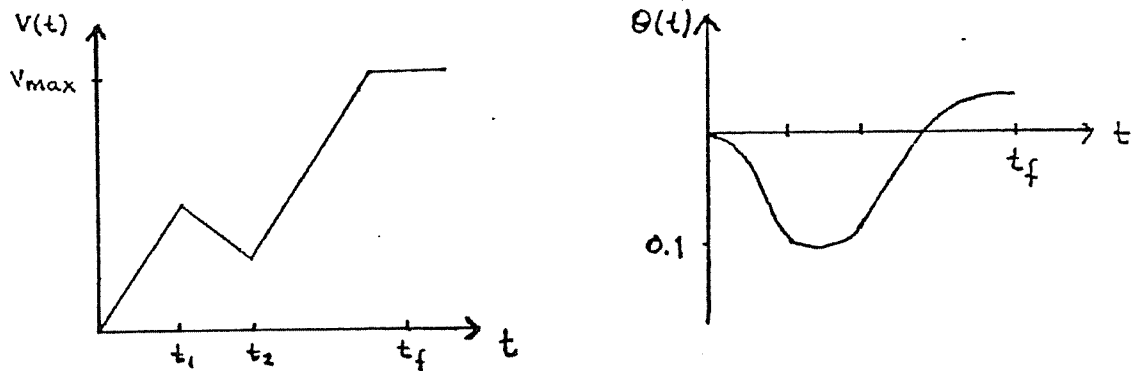


fig 5.1

Bestäm alltså t_1 och t_2 så att t_f blir minimal och bivillkoret är uppfyllt.

För att uppnå detta ansätts en kostnadsfunktion J som minimeras under bivillkor av systemekvation.

$$J = k_1 g \theta(t_f)^2 + k_1 l (t_f) \dot{\theta}(t_f)^2 + k_2 (t_f - k_3)^2 + k_4 (x(t_f) - l)^2$$

De två första termerna svarar mot att man straffar pendlingsenergin vid sluttiden och den tredje straffar avvikelsen från fix sluttid.

Förhållandet k_2/k_1 talar om vilken vikt man lägger vid restpendlingsenergin respektive sluttiden. Hur detta samband ser ut åskådliggörs av fig. 5.7. Man ser här att om kvoten ökar så minskar sluttiden och pendlingsenergin ökar. Minskar man kvoten så minskar pendlingsenergin och sluttiden ökar.

Kostnaden för sluttiden beskrivs av termen $k_2 (t_f - k_3)^2$ där k_3 är ideal eller önskad sluttid. Med $k_3 \neq 0$ fås bättre känslighet m.a.p. små variationer i sluttiden. På samma sätt beskriver termen $k_4 (x(t_f) - k_5)$ kostnaden för slutläget hos trallan. k_5 är här önskat slutläge.

Fig. 5.2 visar optimerat resultat då initialvärdena är $P_I [1, 4]$. $K = [10^6, 1, 0, 0, 0]$ och $S\emptyset = 0.1$ ($S\emptyset =$ initial steglängd). De optimala omslagspunkterna blev $P_0 = [2.46, 3.59]$, man ser att detta val ger mycket fin pendlingsdämpning och att steglängden svänger in ganska snabbt.

Fig. 5.3 har samma förutsättningar som fig. 5.2 men med $K = [10^6, 10^3, 5, 0, 0]$.

Här ser man att metoden kan råka illa ut om kombinationen av initialtidpunkter och initialsteglängd är "oturligt" vald. Steglängden har ju ökat från 0.1 till 1.14 på 6 evolutioner (=iterationer). Efter ungefär 50 evolutioner har emellertid steglängden "lugnat ner sig" och metoden hittar optimum snällt. Även här har vi god pendlingsdämpning vid sluttiden som i detta fall blev $P_0 = [2.45, 3.57]$.

Fig. 5.4 visar vad som händer om vi utvidgar antalet omslagstider till fyra st.

$$P_I = [2, 2.9, 5.5, 6.5]$$

$$K = [10^6, 10^3, 5, 0, 0]$$

$$S\emptyset = 0.3$$

I detta fall hittade metoden den optimala två-omslagsstrategin genom att knuffa ut t_3 och t_4 utanför sluttiden. De optimala tiderna blev här $P_0 = [2.43, 3.55, 6.39, 7.22]$ varav de två sista tiderna negligeras.

Det faktum att parametertider kan "försvinna bortom sluttiden" medför att kriteriefunktionen J innehåller diskontinuiteter. Evolutionsmetoden verkar dock klara av diskontinuiteterna utan problem.

Fig. 5.5 visar vad som händer om vi utvidgar antalet omslagstider till sex st.

$$P_I = [2.08, 4.56, 3.94, 4.0, 2.89, 4.21]$$

$$K = [10^6, 10^3, 5, 0, 0]$$

$$S\emptyset = 0.3$$

Här hittade metoden ett lokalt minimum med ungefär samma "pendling" vid sluttiden.

De optimala tiderna blev $P_0 = [2.12, 2.76, 4.9], [4.6], [2.86, 3.16]$. Vidare är det intressant att notera att tiderna här tenderar att "smälta ihop" till två omslagstider.

Fig. 5.6 illustrerar hur två tider "smälter ihop" och hur två skickas i väg utanför sluttiden. Vi kan alltså notera att vid fler än två omslagstider så använder sig metoden av sammansmältning och utknuffning av icke önskade omslagspunkter. Notera vidare $\theta(t)$.

Vi har även jämfört Bangbang-startmetoden med en bang-zero-bang-start av ASEA-typ [ref. 4]. Resultatet är att en optimal bang-zero-bangstart är obetydligt långsammare än en optimal bang-bang start. ASEA-metodens resultat ligger mycket nära optimum.

Utdrag ur appendix 1, sid. 1.

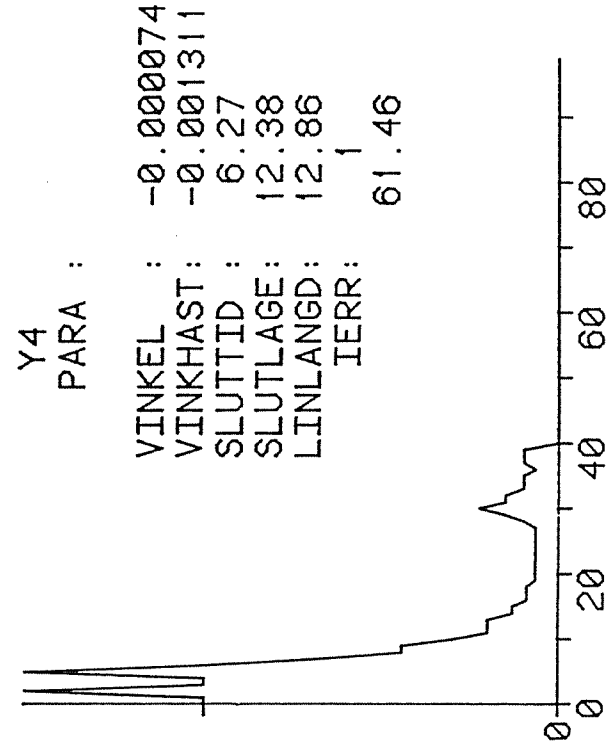
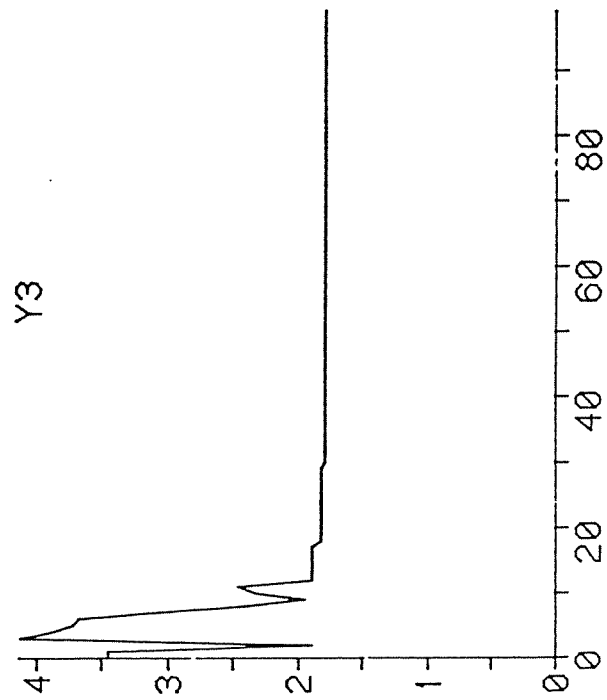
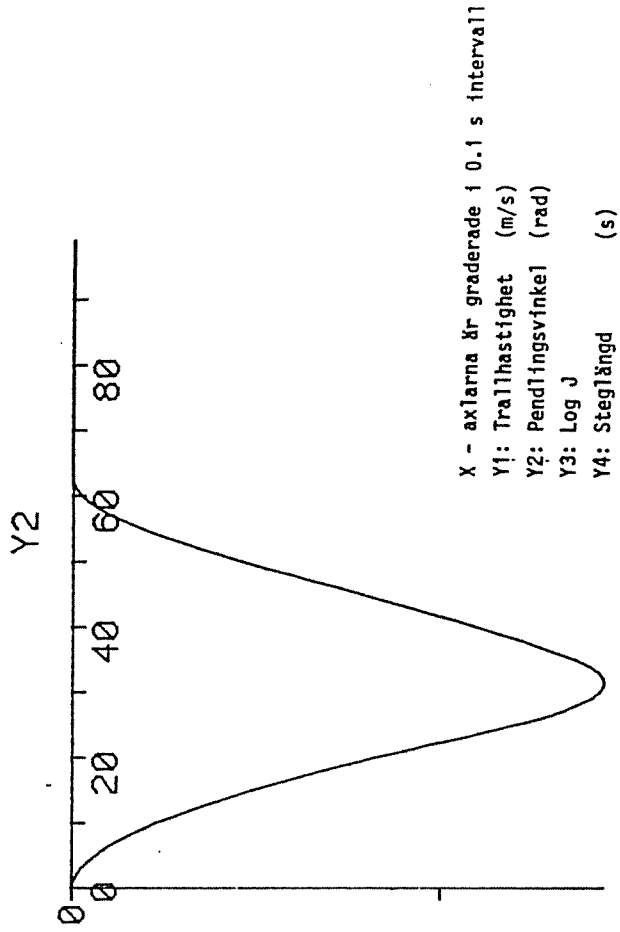
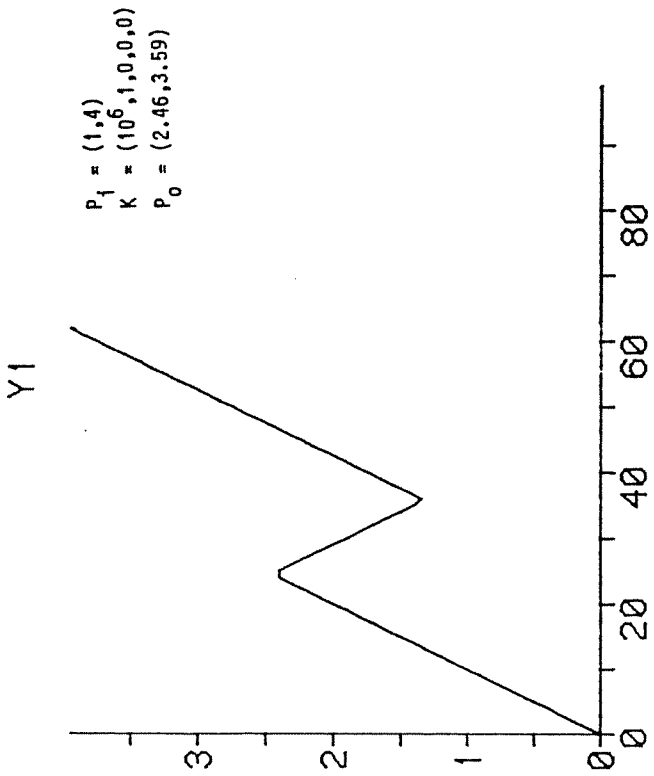
	t_1	t_2	t_f	$\theta(t_p)$	$\dot{\theta}(t_p)$
Optimal bang-bang-start (Fig. 5:4)	2,45	3,57	6,25	-0,0017	0,0009
Optimal bang-zero-bang start:	1,90	4,16	6,29	-0,0067	0,0076
ASEA bang-zero-bang start: (avrundar till tiondels sekunder)	1,8	4,1	6,30	-0,0147	0,0038

Jämför med den idag vanligaste i praktiken förekommande pendlingsdämpande accelerationsmetoden, Siemens metod ([4], avsn. 2, [5]). Enl. denna metod ska man accelerera med konstant trallacceleration under en naturlig pendlingsperiod för lasten $\left(\approx 2\pi \cdot \sqrt{\frac{\bar{L}}{g}} \right)$, där \bar{L} är medellinlängden under accelerationen).

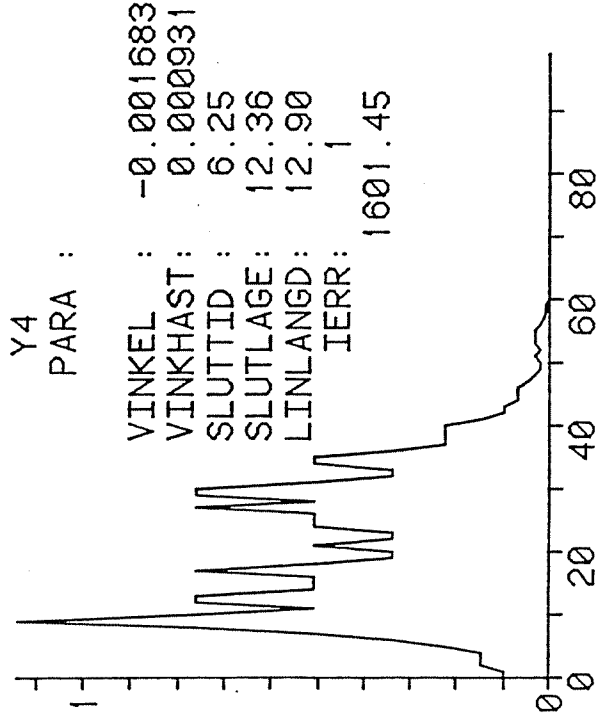
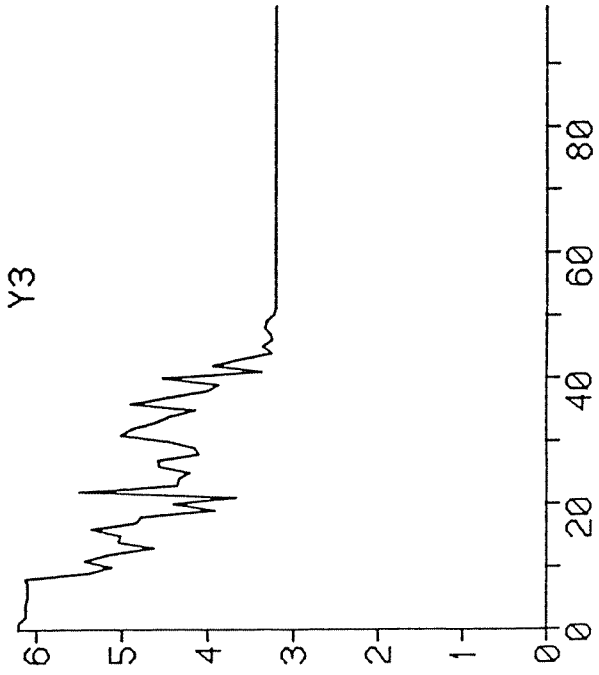
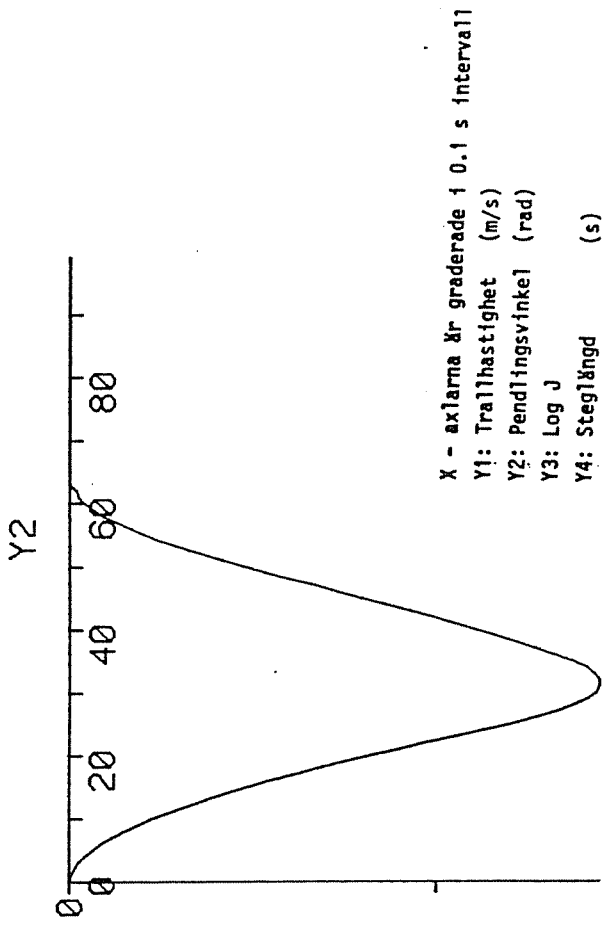
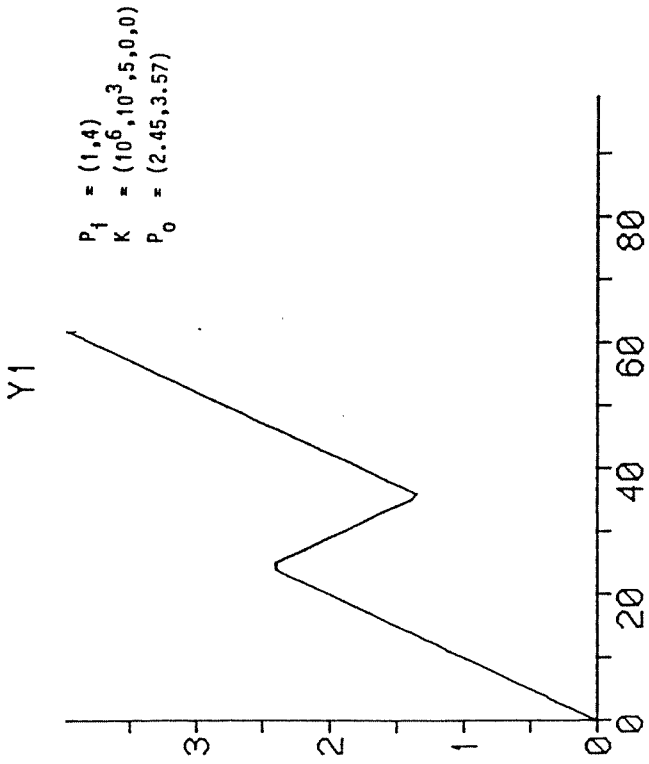
Med denna metod blir t_f i vårt exempel 8,4 s.

Jämför även med den minimala accelerationstiden 4 s (ingen pendl. dämpning).

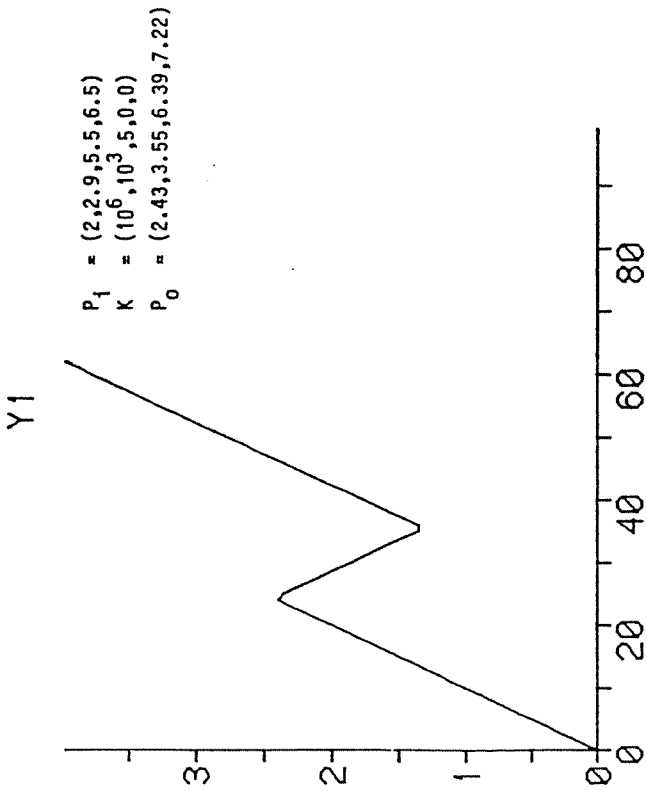
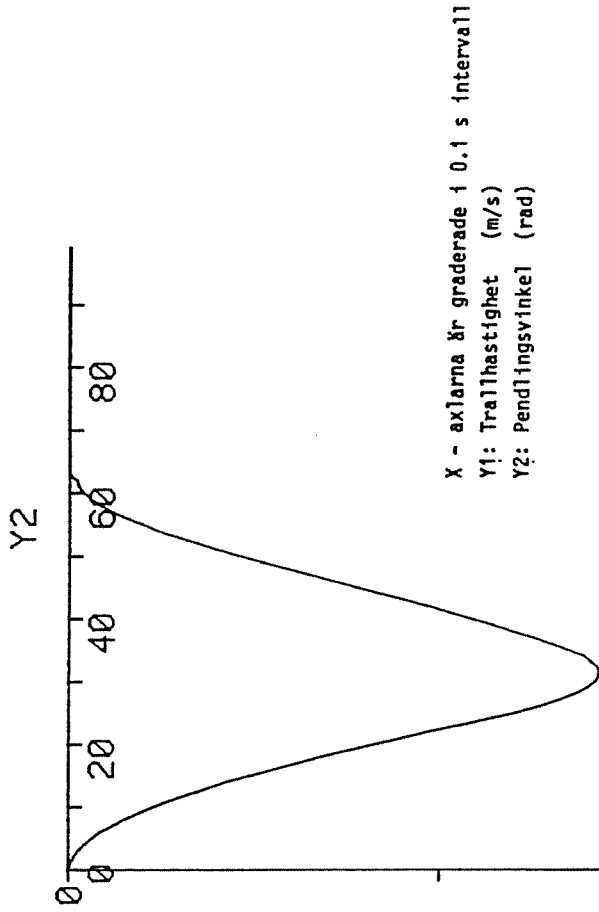
För vidare simuleringsresultat se appendix 1.



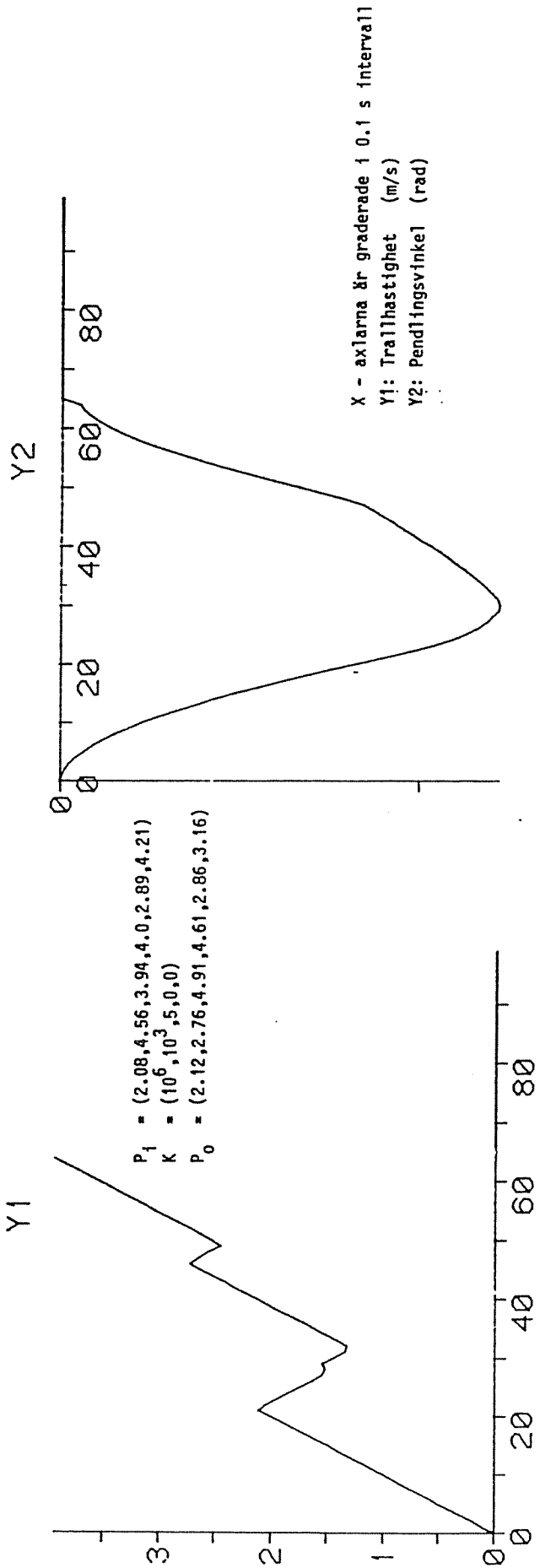
--fig 5.2--



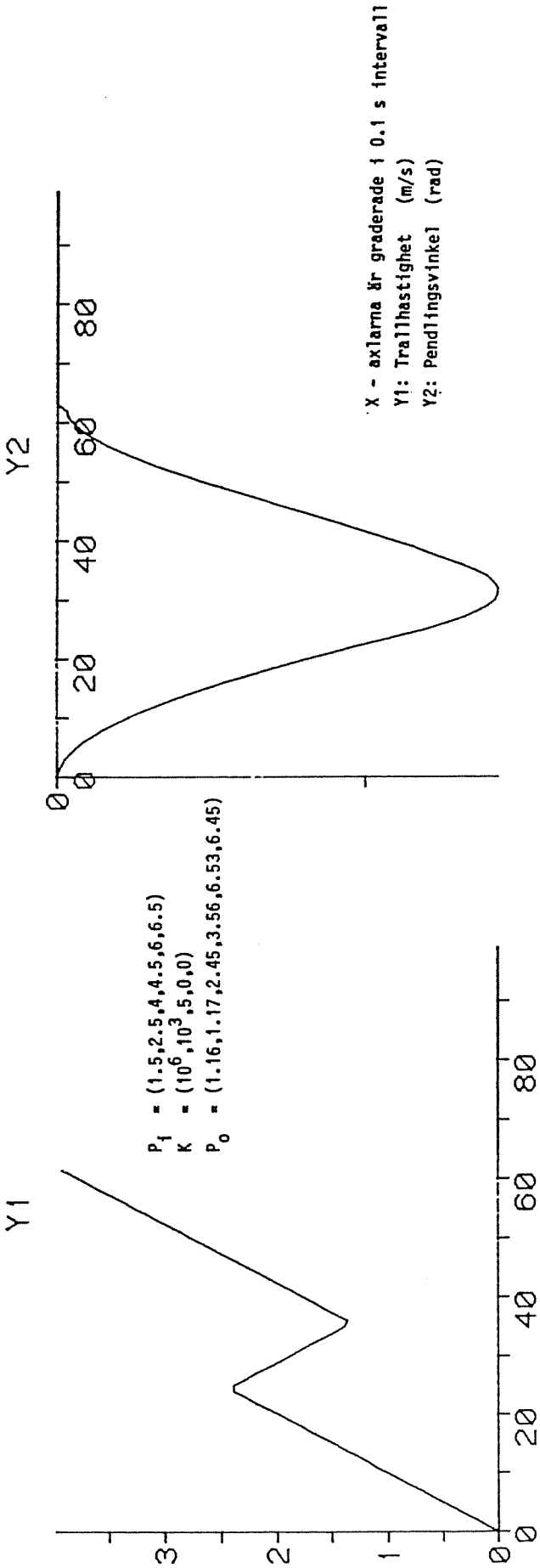
--fig 5.3--



PARA :
 VINKEL : -0.001795
 VINKHAST : 0.002340
 SLUTTID : 6.25
 SLUTLAGE : 12.43
 LINLANGD : 12.90

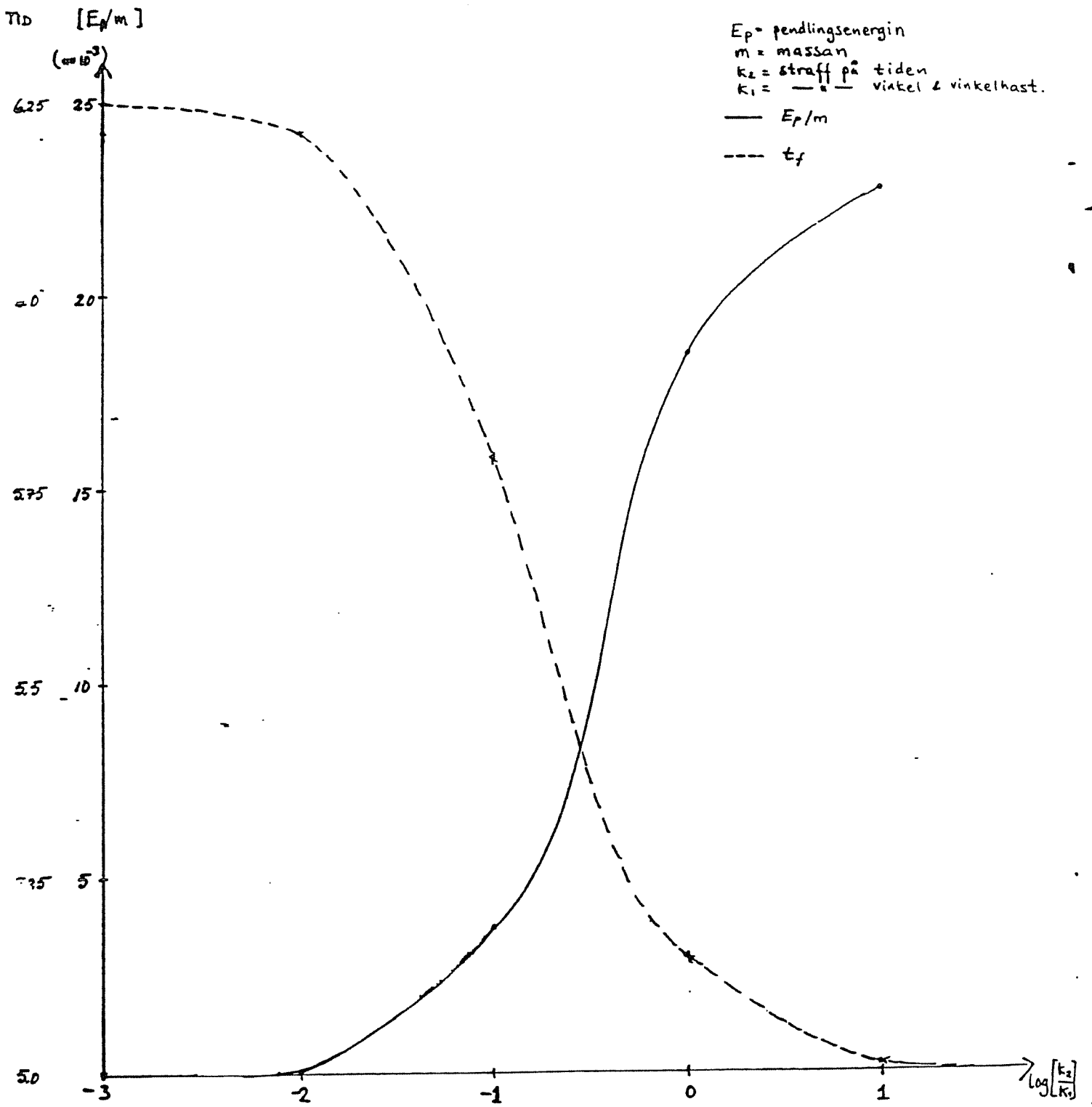


--fig 5.5--



PARA :
 VINKEL : -0.002506
 VINKHAST : 0.003390
 SLUTTID : 6.25
 SLUTLAGE : 12.42
 LINLANGD : 12.91

--fig 5.6--



--fig 5.7--

6. PENDLINGSDÄMPANDE KÖRNING TILL FÖRUTBESTÄMT MÅL

Tre trallaccelerationsstrategier undersöktes och jämfördes:

- 6.1. ASEA:a körstrategi enl. [4], körexempel enl. [4], avsn. 6, sid. 42. Pendlingsdämpande acceleration. Retardation som svänger fram lasten (gripskopan) på ett kontrollerat sätt.
- 6.2. Som i 6.1, men Bangbang-acceleration istället för ASEA:s Bang-zero-bang acceleration.
- 6.3. Bang-bang körning, dels med 7, dels med 5 omslagpunkter. Kör-exempel från Mårtensson [1]. Vi jämför med Mårtenssons resultat.

6.1. Evolutionsoptimering av ASEA:s körstrategi

Trallan åker 17,5 m. Trallhastigheten och lastpendlingens vinkelhastighet ska vara ≈ 0 vid målet, där dock lasten pendlar framåt en (ospecificerad) vinkel θ .

Max trallhastighet är visserligen 4 m/s, men under körningen uppnås endast 3,2 m/s p g a den korta åksträckan. Max trallacceleration 1 m/s². En "överretardation" på 1,09 m/s² används vid inbromsningen. Linlyft sker från 23,5 m till 11 m linlängd. Lyfthastigheten 2 m/s retarderar sedan med 0,8 m/s².

Fig. 6.1, 6.2. och 6.3 beskriver en körning enl. beräkningar i [4]. Omslagsparametrar [1,40, 3,80, 7,00] ger sluttiden t_f ($= t_g$ i fig. 6.2.) = 9,94s. (Tidpunkten då maxhastighet 3,2 m/s uppnås räknas inte som parameter. Den är ju fixerad av de andra tiderna).

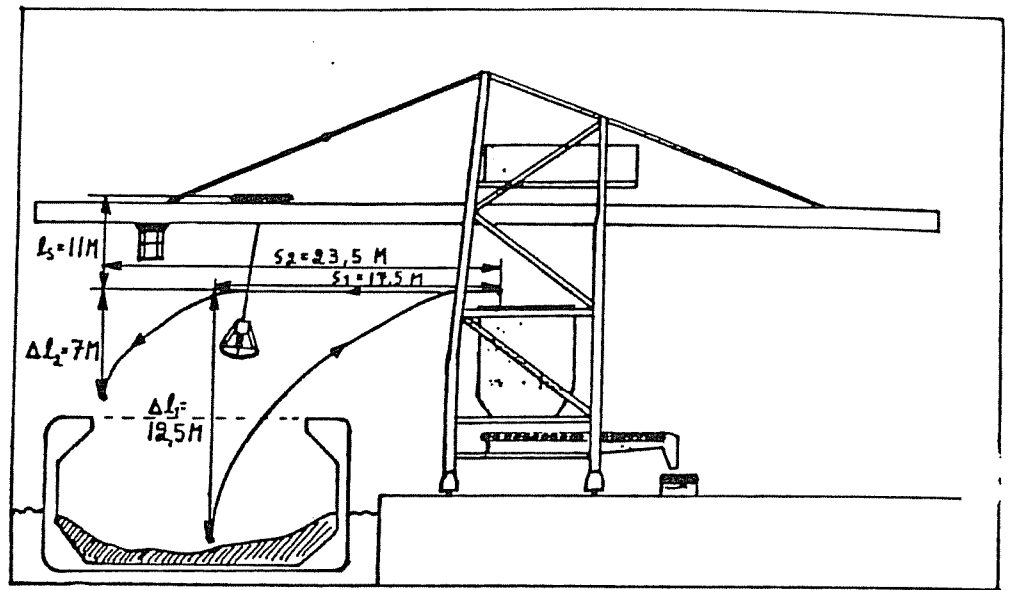
Parametervärdena optimerades sedan med evolutionsmetoden. De optimerade omslagstiderna [1.81, 4.40, 6.24] ger $t_f = 9,57$ s, $x(t_f) = 17,49$ m ; $\theta(t_f) = -0,00014$ rad/s, se fig. 6.4.

Kriteriet som skulle minimeras var

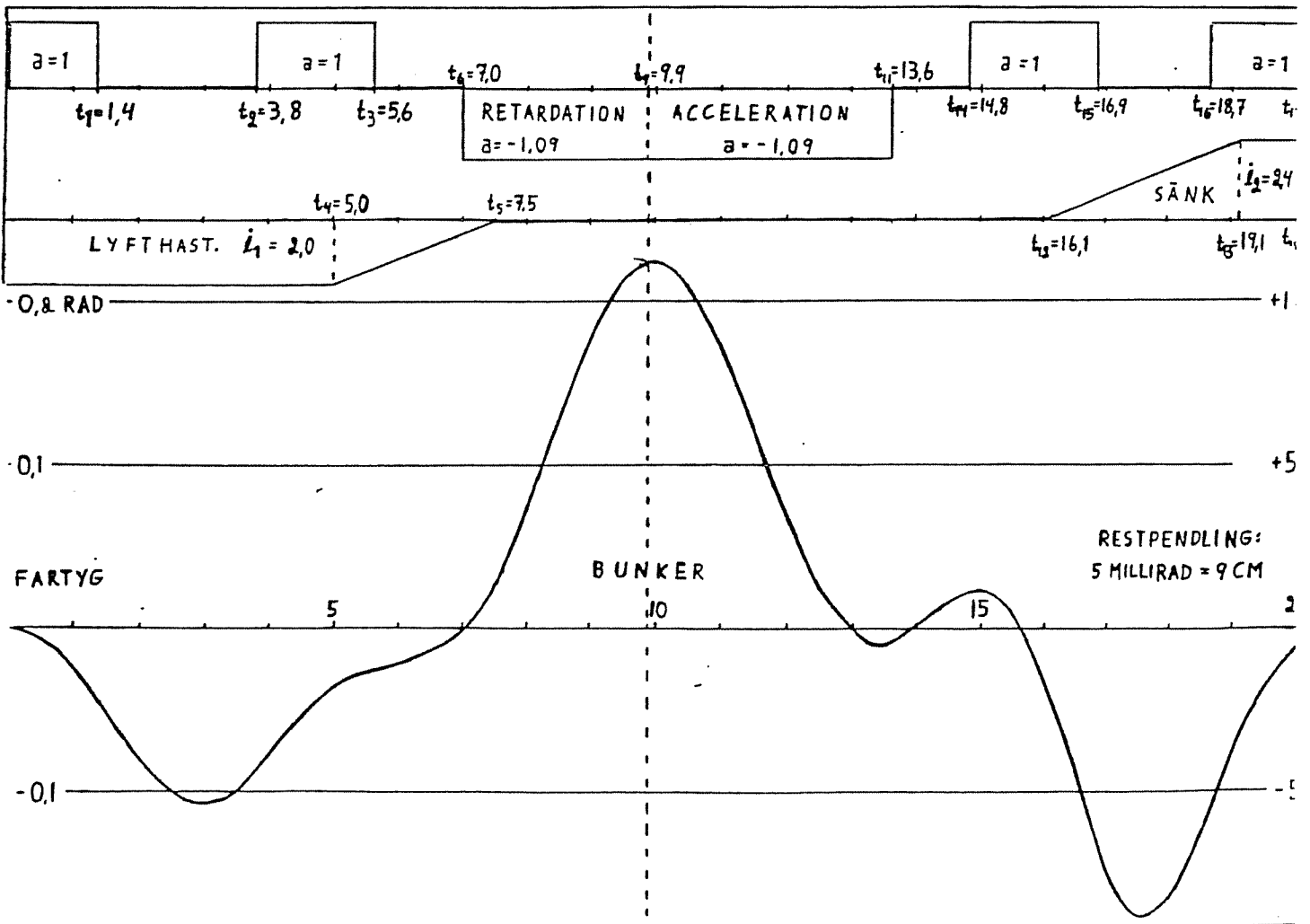
$$J = k_1 \cdot x(t_f)^2 + k_2 \cdot \dot{\theta}(t_f)^2 + k_3 \cdot (t_f - k_3)^2 + k_4 \cdot (x(t_f) - k_5)^2$$

Pendlingsvinkeln θ straffas alltså inte i avsn. 6.1 och 6.2 (däremot i 6.3).

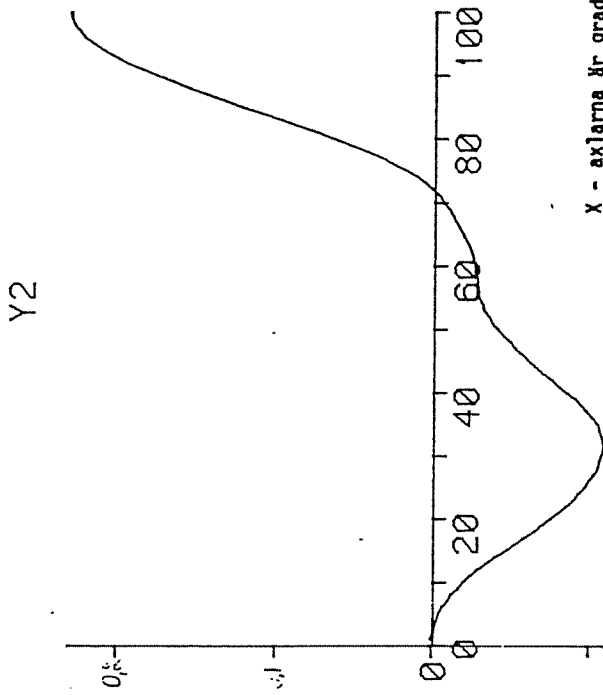
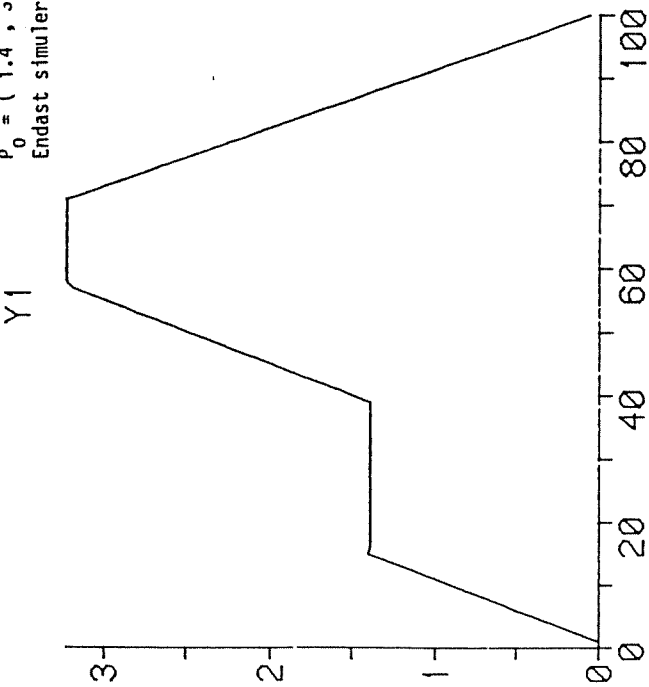
Figur 6.1. Kör och lyftsträckor.



Figur 6.2 Beräkningsresultatet. Trallaccelerationen, sänkhastigheten och lastpendlingen som funktion av tiden.



--fig 6.2
p₀ = (1.4 , 3.8 , 7.0)
Endast simulering.

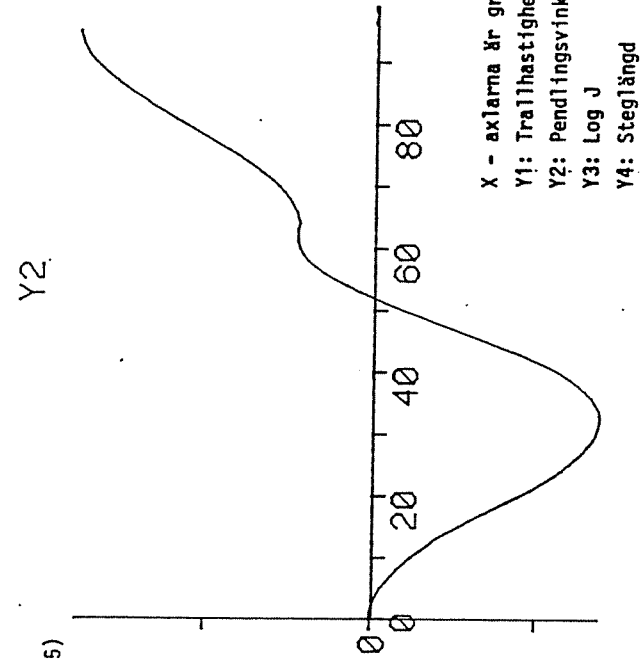


X - axlarna är graderade i 0.1 s intervall
 Y1: Tralhastighet (m/s)
 Y2: Pendlingsvinkel (rad)

VINKEL : 0.229584
 VINKHAST: -0.003686
 SLUTTID : 9.94
 SLUTLAGE: 17.78
 LINLANGD: 10.08

--fig 6.4--

$P_1 = (1.4, 3.8, 7.0)$
 $K = (10^6, 10^4, 8, 510^5, 17.5)$
 $P_0 = (1.81, 4.40, 6.24)$

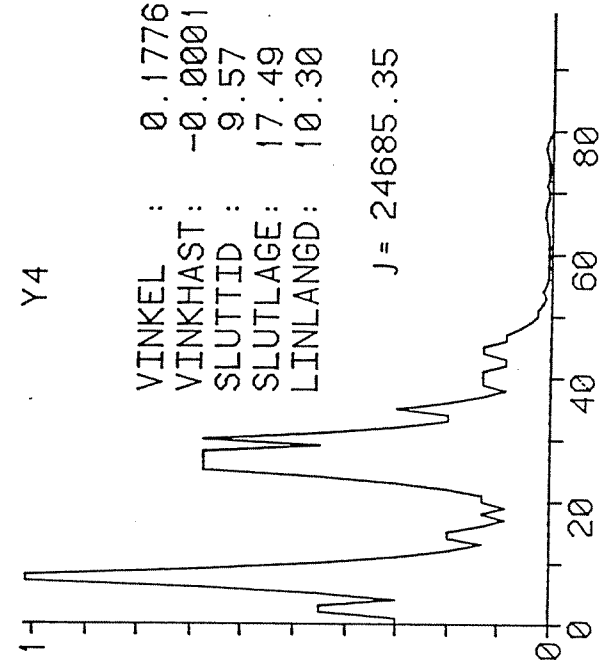


Y2

X - axlarna är graderade i 0.1 s intervall
 Y1: Trajlhastighet (m/s)
 Y2: Pendlingsvinkel (rad)
 Y3: Log J
 Y4: Steglängd (s)

Y3 --fig 6.5--

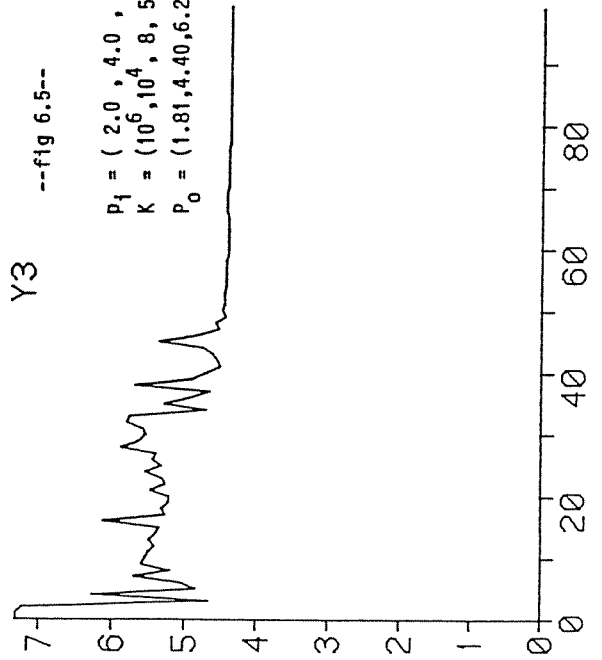
$P_1 = (2.0, 4.0, 8.0)$
 $K = (10^6, 10^4, 8, 510^5, 17.5)$
 $P_0 = (1.81, 4.40, 6.24)$



Y4

VINKEL : 0.177659
 VINKHAST: -0.000145
 SLUTTID : 9.57
 SLUTLAGE: 17.49
 LINLANGD: 10.30

 J = 24685.35



(Med kriterievektorn $K = (k_1, k_2, k_3, k_4, k_5) = (10^6, 10^4, 8, 5 \cdot 10^5, 17.5)$) blev $J = 24685$. Ursprungligen var $J = 76973$, se vidare appendix A2).

ASEA-strategin kunde alltså snabbas upp 0,37 s i detta exempel genom en evolutionsoptimering. Detta har följande orsak: ASEA-strategin bygger på att trallaccelerationsfasen i sig själv ska vara pendlingsdämpande, d v s $\theta \approx 0$ mellan t_3 och t_6 i fig. 6.2. Detta implicita bivillkor som kostar körtid ignoreras av den optimerade trallåkstrategin, som därför kommer fram fortare. (Sensmoral: Extra bivillkor måste betalas!)

För att testa evolutionsmetoden gjorde vi en start i $[2, 4, 8]$ som låg långt från optimum. Metoden hittade dock lätt det optimum som beskrivs ovan. I fig. 6.5 har $\log J$ och standardavvikelsen hos den vinnande dotterstrategin, s plottats för 80 evolutionssteg.

6.2. Är bangbang-körning snabbare än bang-zero-bang?

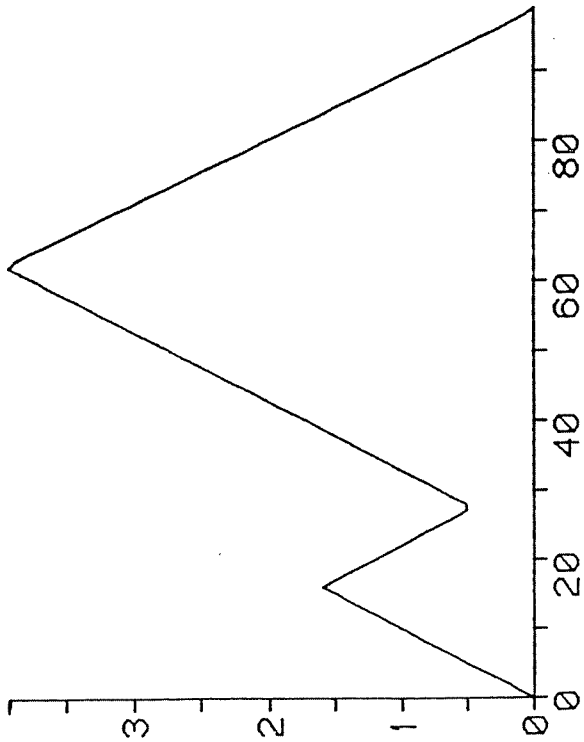
För ett minimaltidsproblem där systemet är linjärt och insignalen är begränsad så är den optimala styrstrategin av bangbang-typ, d v s styrsignalen antar alltid något begränsningsvärde ([2], p 111).

Är det självklart att detta även gäller för vårt kranproblem? Nej. Dels är problemet olinjärt (variabel linlängd, cos och sintermer bestämmer pendelvinkelaccelerationen). Dels är en av tillståndsvariablerna, trallhastigheten, begränsad.

Vi gjorde körningar som var identiskt lika de i avsn. 6.1, förutom att bang-zero-bang accelerationen hade bytts ut mot en bang-bang acceleration. Dessa strategier optimerades med evolutionsmetoden. Resultat: (se Fig. 6.6.).

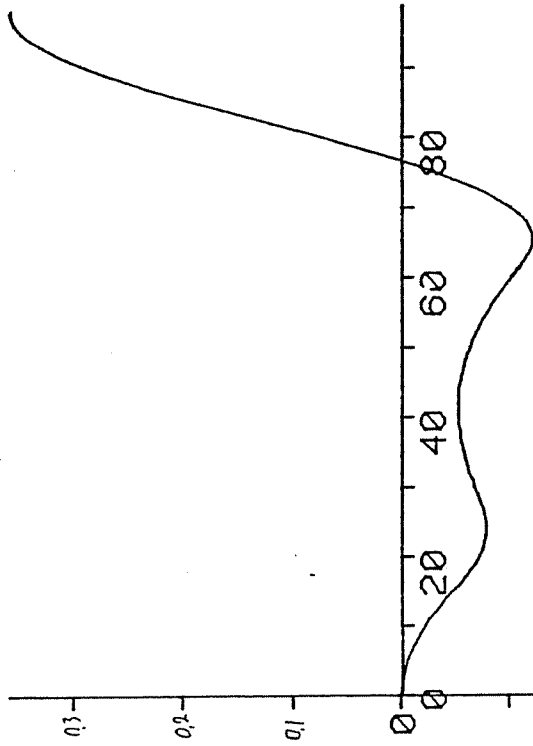
Med kriterievektorn $K = [10^6, 2 \cdot 10^4, 8, 5 \cdot 10^5, 17,5]$ blev körtiden 9,85. Jämför Bang-zero-bangtiden 9,57 s. Försök att väsentligt minska sluttiden ledde bara till att de övriga slutvillkoren (vinkelhastighet och läge) blev sämre uppfyllda.

Bang-zero-bang-strategin verkar alltså vara fördelaktigare än bang-bang strategin för detta problem.



--fig 6.6--

$P_i = (1.57, 2.73, 6.28)$
 $K = (10^6, 210^4, 8, 510^5, 17.5)$
 $P_o = (1.60, 2.74, 6.23)$



X - axlarna Nr graderade i 0.1 s intervall
 Y1: Tralhastighet (m/s)
 Y2: Pendlingsvinkel (rad)

VINKEL : 0.357225
 VINKHAST : -0.003040
 SLUTTID : 9.85
 SLUTTLAGE : 17.49
 LINLANGD : 11.01

6.3. Bangbang-körningar. Jämförelse med Mårtenssons exempel

I detta exempel ska både vinkel och vinkelhastighet vara ≈ 0 vid målet. Lasten får dock pendla under körningen. Körtiden ska vara minimal.

Trallåksträcka 20 m.

Max. trallhast. 1,4 m/s. Max. trallacceleration 0,46 m/s². Lyft från 11 m till 6 m linlängd. Hissningshastighet = 0 vid t = 0. Max. hissningshastighet 0,5 m/s. Max. hissningsacceleration 0,61 m/s².

De resultat som tidigare erhållits för detta exempel är: ([4], avsn. 7)

Tabell 6.1.

Körtid (s)	Körtid	Kommentar
17,3	Ren minimaltidskörning	Ingen lastpendlingsdämpning
18,12	Mårtenssons optimala metod	Se Fig. 6.7.
18,6	ASEA I	se [4], avsn. 7. $\theta(t_f) \neq 0$ $\ddot{\theta}(t_f) \approx 0$.
19,1	ASEA II	se [4], avsn. 7. $\theta(t_f) \approx 0$ $\dot{\theta}(t_f) \approx 0$.
20,1	Siemens metod	Acc och retardationstider = tider för en pendlingsperiod. $\theta(t_f) = \pi$, $\dot{\theta}(t_f) = 0$.

Vi optimerade följande två typer av körstrategier:

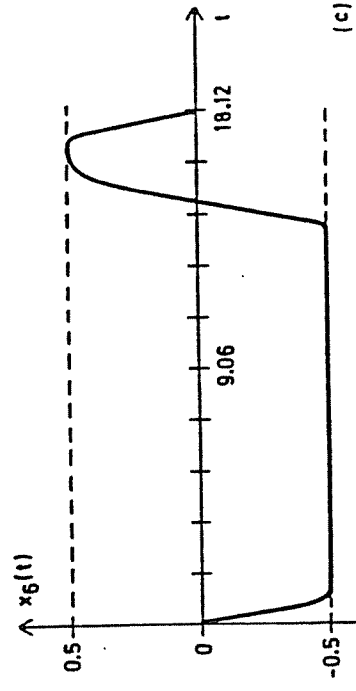
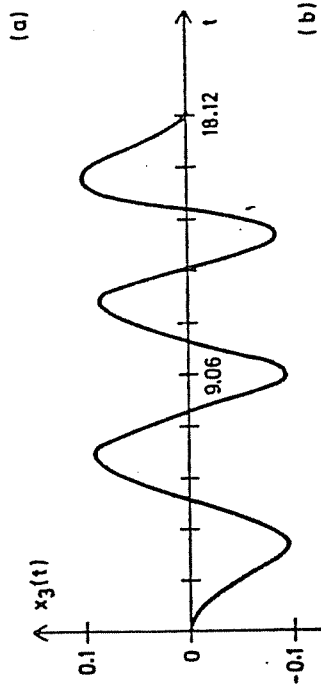
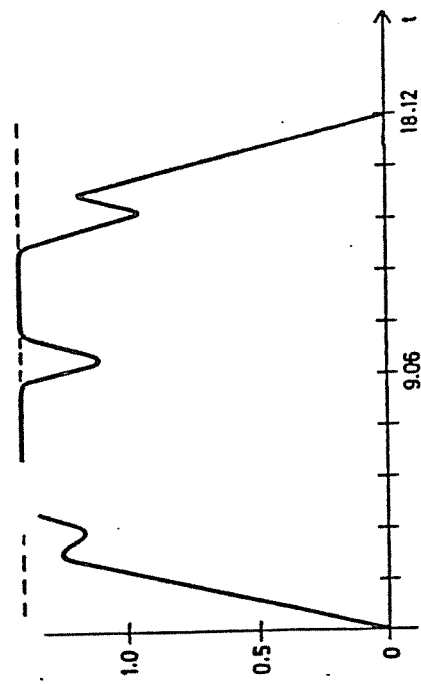
- a) 7-omslags bangbang-strategier som närmast liknar Mårtenssons optimala strategi. Se Fig. 6.9.

Med $J = k_1 \cdot 9,82 \cdot \theta(t_f)^2 + k_1 \cdot \dot{\theta}(t_f)^2 + k_2(t_f - k_3)^2 + k_4(x(t_f) - k_5)^2$ och $K = [10^6, 10^3, 17, 5 \cdot 10^5, 20]$ så fås körningen i fig. 6.8, som ger liten restpendling och som uppnår målet $x(t_f) = 20,00$ m exakt. Sluttiden $t_f = \underline{18,23}$ s är dock 0,11 s större än Mårtenssons optimala tid 18,12 s. Skillnaden är visserligen liten, men är omöjlig att eliminera. Straffas sluttiden hårdare så blir restpendlingen oacceptabelt stor.

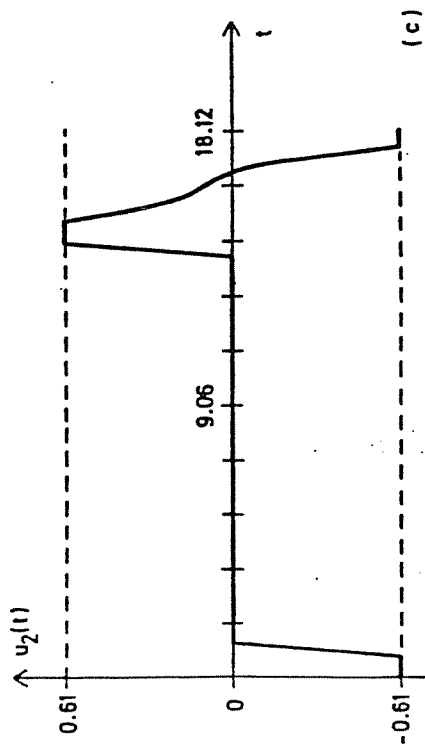
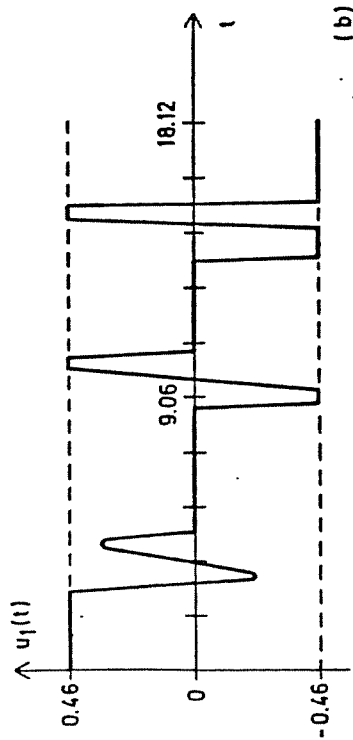
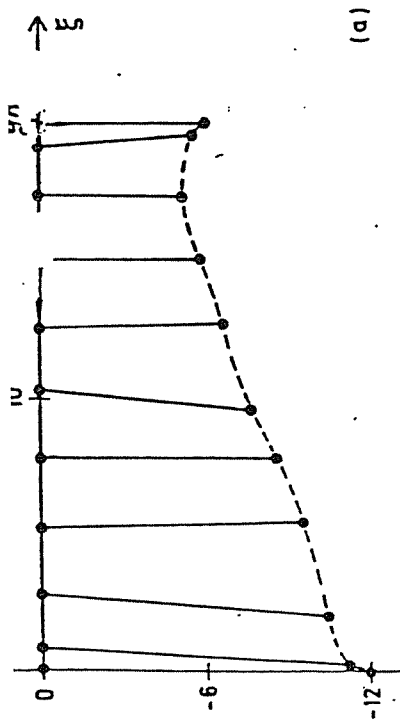
- b) 5 omslags bangbang-strategier utan retardationsfas i körningens mitt.
Se fig. 6.8.

Med kriterievektorn $K = [10^6, 10^4, 17, 10^5, 20]$ så fås $t_f = \underline{18,30}$,
vilket är en obetydligt sämre sluttid än tiden för 7-omslagsstrategin
i a).

Samtliga körningar är redovisade i appendix 1.



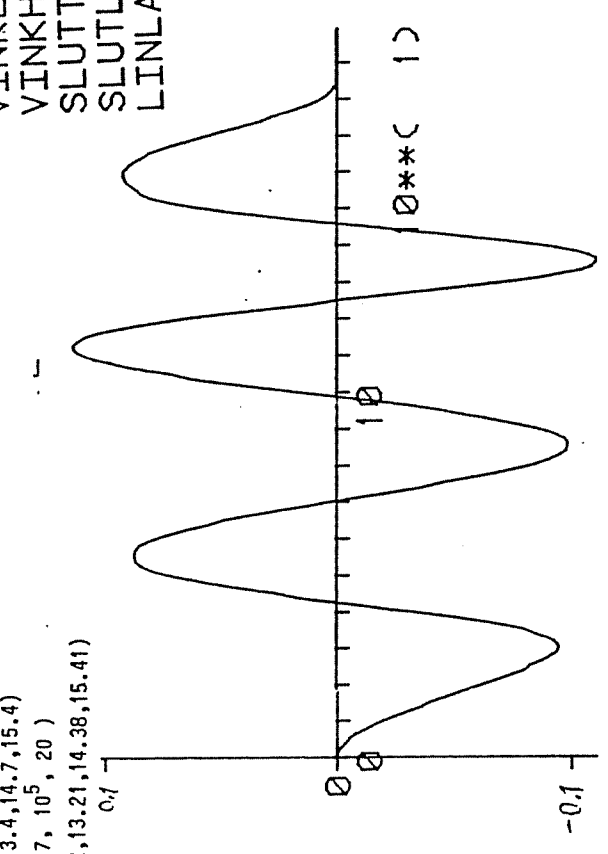
Computed optimal solution for $t_f = 18.12$ secs.
 a) - trolley velocity ($x_2(t)$).
 b) - angular deviation ($x_3(t)$).
 c) - winching velocity ($x_6(t)$).



Computed optimal solution for $t_f = 18.12$ secs.
 a) - movements of the trolley and the load. The distance between two successive points is 1.812 secs.
 b) - acceleration of the trolley ($u_1(t)$).
 c) - acceleration of the winch ($u_2(t)$).

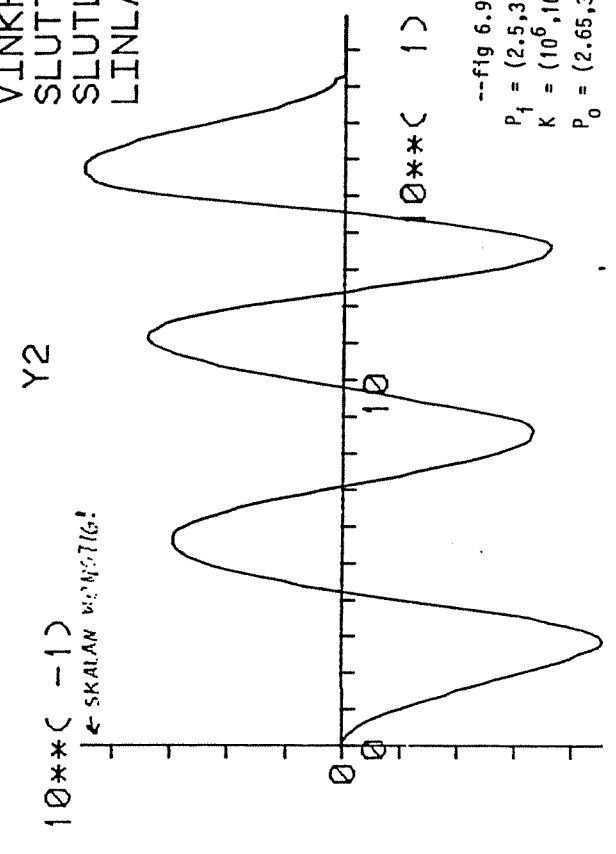
$P_1 = (2, 6, 13.4, 14.7, 15.4)$
 $K = (10, 10^4, 17, 10^5, 20)$
 $P_0 = (2.87, 4.12, 13.21, 14.38, 15.41)$

VINKEL :
 -0.007002
 VINKHAST :
 18.30
 SLUTTID :
 19.94
 SLUTTLAGE :
 6.12



X - axlarna är graderade i 0.1 s intervall
 Y1: Trallhastighet (m/s)
 Y2: Pendlingsvinkel (rad)

VINKEL :
 0.003324
 VINKHAST :
 0.001148
 SLUTTID :
 18.23
 SLUTTLAGE :
 20.00
 LINLANGD :
 6.12



--fig 6.9--

$P_1 = (2.5, 3.6, 8.7, 9.6, 13.4, 14.7, 15.8)$
 $K = (10^6, 10^3, 17, 510^5, 20)$
 $P_0 = (2.65, 3.66, 8.81, 9.27, 13.70, 14.42, 15.47)$

7. SLUTSATSER OCH DISKUSSION

Evolutionsmetoden

Evolutionsmetoden (=EM) kommer mest till sin rätt vid optimering med många parametrar. Exekveringstiden ökar då förhållandevis lite med parameterantalet i jämförelse med t ex en gradientmetod. (Man behöver bara göra några extra loopar för att generera flera slumpstal). Diskontinuiteter i objekt funktionen skulle göra en gradientmetod "galen" medan EM är tillsynes helt okänslig för detta.

Vidare tycks EM ha en större förmåga att hitta det globala minimumet oavsett startpunkt, se fig. 4.2, 4.3 och 5.3, medan en gradient metod ofelbart fastnar i lokala minima. Har man att minimera en konvex funktion, så är gradient metoder överlägsna, ty de konvergerar på färre steg. EM kan dock i detta fall förbättras genom att välja den bästa av "föräldrar" och "barn".

Optimeringsproblemen

Evolutionsoptimerade bang-bang eller bang-zero-bang strategier skulle möjligen kunna användas praktiskt för lastpendlingsdämpande traverskranstyrning, trots den relativt långa beräkningstiden. Man skulle i så fall utföra evolutionsoptimering i förväg av många olika körningar (olika körsträckor, olika hissningssträckor) och sedan lägga in resultat i kranstyrdatorns minne. Relativt lite minnesutrymme skulle krävas, eftersom bangbangstyrstrategier bestäms av endast några få omslagstider.

Vi har nu inte i första hand syftat till att få fram praktiskt användbara kranstyrmetoder. Vi har varit mer intresserade av att allmänt studera optimala bangbang-strategiers egenskaper. Evolutionsmetoden har visat sig vara en enkel och pålitlig metod att optimera sådana styrstrategier.

Sternads bang-zero-bang styrmetod (som används av ASEA) har visat sig vara obetydligt långsammare än evolutionsoptimerade bangbang-strategier. Evolutionsoptimerade bang-zero-bang strategier visade sig t o m vara bättre än bangbang-strategier i exemplet i avsn. 6.1 och 6.2. (Jfr. Fig. 6.5 och 6.6). Vi har med evolutionsoptimering tagit fram en bangbang-approximation till Mårtenssons styrstrategi, använd på ett speciellt körexempel ur [1]. Framtagningen av denna strategi (Fig. 6.9) tog mindre datortid än Mårtenssons optimeringstid.

Vi har även studerat vad som händer om onödigt många omslagstider används i optimeringens startapproximation. Det visade sig i avsn. 5 att vissa omslagstider då "smälter ihop" och tar ut varandra, medan andra får sådana värden att de blir betydelselösa. Slutresultatet blir att de onödiga parametrarna "oskadliggörs" medan resten antar optimala värden. (Vid dessa undersökningar hade vi god nytta av evolutionsmetodens förmåga att klara av diskontinuiteter. Det fanns nämligen åtskilliga sådana hos J).

Förslag till fortsatta undersökningar av och med evolutionsmetoden

- Hur fungerar evolutionsmetoden i rum med många ($\gg 10$) dimensioner?

Frågan skulle kunna belysas genom att man angrep något av följande problem:

- . Kranstyrningsproblem, där trallaccelerationen i varje 0.1 s-intervall får vara en parameter. Antalet parametrar blir då ca 250.
- . Input estimation problem där output error metoden används:

Bestäm insignalen till ett system i t ex 100 diskreta tidpunkter genom att med evolutionsmetoden minimera avvikelserna mellan en verklig uppmätt utsignal och en utsignal som orsakas av den gissade insignalen.

- Förbättras evolutionsmetodens egenskaper om rektangelfördelade slumpantal används istället för normalfördelade?
- Evolutionsmetoden skulle kunna jämföras med olika gradientmetoder m.a.p. beräkningstider, speciellt för problem med många parametrar.
- Evolutionsmetoden kan prövas som en output error metod för off-line identifiering.

8. REFERENSER

- [1] Mårtensson, K. New Approaches to Numerical Solutions of Optimal Control Problems.
Institutionen för reglerteknik, Lunds tekniska högskola.
Rapport 7206, mars 1972, Studentlitteratur.

- [2] Bryson, A.E., Ho, Y.C.
Applied Optimal Control.
Wiley 1979.

- [3] Muth, C.,
Einführung in die Evolutionsstrategie
Regelungstechnik 9 (1982) p. 297-303.

- [4] Sternad, M.
Programmerad lastväg med pandlingsdämpning för gripskropekrantar
Examensarbete i reglerteknik 1981.
Intern ASEA-rapport IMU 1-057.

- [5] Meyer, S., Zimmerman, W., Siemens A.G.
Selbsttätige kompensation der Lastpendelungen bei Katzfahran-
trieben
Siemens-Zeitschrift Vol. 45 (1971), No. 10, p, 750-753.

- [6] Rechenberg, I.
Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach
Prinzipien der biologischen Evolution.
Frommann-Holzboog, Stuttgart 1973.

- [7] Waltz, D.L.
Artificial Intelligence
Scientific American, Okt. 1982, p. 101-122.

P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	SØ	NMAX	J	θ	θ	t _f	x _f	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
5	3.5		BANG-BANG				10 ⁶	1				0.1	40		-0.0017	0.0009	6.25		2.45	3.57					
5	3.5						10 ⁶	1				0.03	40	2.21	-0.0001	-0.0013	6.27		2.45	3.58					
	2						10 ⁶	1				0.1	40	474	0.0001	0.0061	6.23		2.48	3.59					
	4						10 ⁶	1				0.2	100	13	0.00112	0.0003	6.27		2.46	3.59	min 3				
	2						10 ⁶	10				0.2	50	407	0.0113	0.0034	6.27		2.46	3.59					
	3						10 ⁶	100				0.2	50	3945	0.0113	0.0034	6.27		2.46	3.59					
	3						10 ⁶	100	6			0.2	50	29	9.007	0.0013	6.27		2.45	3.58					
	3						10 ⁶	10 ⁵	6			0.2	50		0.0097	0.0083	6.17		2.44	3.52					
	3						10 ⁶	10 ³	5			0.1	50	1601	-0.0016	0.0009	6.25		2.45	3.57	(inritad i nivåkurvor)				
	3						10 ⁶	10 ⁴	5			0.1	50	15000	-0.0050	0.0052	6.21		2.45	3.55					
	3						10 ⁶	10 ⁵	5			0.1	50	10 ⁴	-0.0516	0.0332	5.79		2.40	3.29					
	3						10 ⁶	10 ⁶	5			0.1	50	209·10 ³	-0.1321	0.0317	5.15		2.30	2.87					
	3						10 ⁶	10 ⁷	5			0.1	50	228·10 ³	0.1487	0.0252	5.01		2.26	2.76					
.8			BANG-ZERO-BANG												-0.0147	0.0038	6.30		1.8	4.1	ASEA Bang-zero-bang				
.8	4.1						10 ⁶	10 ⁴	5			0.02	50	17830	-0.0067	0.0076	6.29		1.90	4.16	Optimal Bang-zero-bang				
.8	4.1						10 ⁶	10 ³	5			0.02	50	1881	-0.0004	0.0004	6.37		1.89	4.23					
.8	4.1						10 ⁶	3·10 ⁴	5			0.02	50	47887	-0.0203	0.0163	6.16		1.90	4.03					

	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	SØ	NMAX	J	θ	θ'	t _f	X _f	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	
4	3.8	7.0	<u>BANG-ZERO-BANG</u>				10 ⁶	5·10 ³	9	10 ⁴	17,5	0.02	40	2386				9.69	17.52	1.63	4.04	6.75				
53	4.04	6.75	omstart fr.ovan				10 ⁶	5·10 ³	9	10 ⁴	17,5	0.01	40	1883				9.60	17.41	1.75	4.26	6.66				
53	4.04	6.75					10 ⁶	10 ⁴	8	10 ⁴	17,5	0.01	40	23000				9.55	17.42	1.87	4.48	6.61				
87	4.48	6.61	omstart fr.ovan				10 ⁶	10 ⁴	8	5·10 ⁵	17,5	0.01	40	24000				9.54	17.49	1.92	4.55	6.60			Bäst!	
4	8	8	"vild start"				10 ⁶	10 ⁴	8	5·10 ⁵	17,5	0.3	50	25359				9.58	17.49	1.82	4.33	6.64			Hittar lätt	
4	8	8	"				10 ⁶	10 ⁴	8	5·10 ⁵	17,5	0.3	80	24685				9.57	17.49	1.81	4.40	6.24			optimum	
3	7	<u>BANG-BANG</u>																								
			(a=-1.09 vid inbromsning)																							
57	2.73	6.28	omstart				10 ⁶	10 ⁴	8	5·10 ⁵	17,5	0.1	50	36569	0.363	-0.0028	9.91	17.50	1.57	2.73	6.28					
6	2.74	6.23	omstart				10 ⁶	2·10 ⁴	8	5·10 ⁵	17,5	0.02	50	68595	0.3572	-0.0029	9.85	17.49	1.6	2.74	6.23					
6	2.74	6.23	omstart				10 ⁵	3·10 ⁴	8	5·10 ⁵	17,5	0.02	50	90436	0.3558	-0.0134	9.73	17.47	1.62	2.70	6.11				Bäst!	
3	6	6	7	8	<u>BANG-BANG</u>		10 ⁷	5·10 ³	8	5·10 ⁴	17,5	0.3	50	32690	0.1332	-0.0742	9.8	17.5	1.78	2.67	4.86	6.79	7.79			
3	6	6	7	8	omstart		10 ⁷	5·10 ³	8	5·10 ⁴	17,5	0.3	50		-0.0010	0.0009	9,72	17.42	2.18	2.84	4.77	6.61	7.36			

	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	SØ	NMAX	J	θ	θ'	f	x _f	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
	1.19	3.5	4.5	BANG-BANG			10 ⁶	10 ³	5			0.1	60		0.0004	0.0017	6.63		1.26	1.69	3.37	4.25			
	2.9	5.5	6.5	Körn. till max hastigh.			10 ⁶	10 ³	5			0.2	60	4884	0.0027	0.0012	7.19		2.01	3.06	5.64	6.18			
	2.9	5.5	6.5				10 ⁶	5·10 ³	5			0.3	60	7914	-0.0018	0.0023	6.25		2.43	3.55	6.39	7.22			
	3	2.5	3.4	3.6			10 ⁶	5·10 ³	5			0.3	50	8112	-0.0032	0.0039	6.25		2.22	2.57	3.67	2.90			
	3	2.5	3.4	3.6	3.7	4.0	10 ⁶	5·10 ³	5			0.5	60	10881	-0.0041	0.0041	6.45		2.08	4.56	3.94	4.0	2.89	4.21	
	3.8	4.56	3.94	4.0	2.89	4.21	10 ⁶	5·10 ³	5			0.3	50	11339	-0.0047	0.0013	6.49		2.12	2.76	4.91	4.61	2.86	3.16	
															lokalt min; ger ungefär samma				restpendling.						
	3.8	4.56	3.94	4.0	2.89	4.21	10 ⁶	5·10 ³	5			0.3	50	9630	-0.0072	-0.0007	6.35		2.24	2.76	2.85	3.35	4.65	4.8	
	4	2.71	2.85	3.35	4.65	4.8	10 ⁶	5·10 ³	5			0.03	100	8116	0.0017	0.0014	6.27		2.4	2.71	2.77	3.56	4.57	4.6	
															Hittade opt. 2 pkt strategin s=0.01										
	4	2.71	2.77	3.56	4.57	4.6	10 ⁶	5·10 ³	5			0.03	120	7794	-0.0021	0.0038	6.23		2.35	2.68	2.81	3.58	4.56	4.57	
															ung. 2: oms1. strategin				S = 0.0067						
	5	2.5	4	4.5	6	6.5	10 ⁶	5·10 ³	5			0.3	60	8022	-0.0025	0.0034	6.25		1.16	1.17	2.45	3.56	6.53	6.45	
															smälter ihop				knuffas ut						

P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	S ₀	NMAX	J	θ	θ'	τ _f	X _f	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	
Utgångsapproximationer av Mårtenssons optimala strategi (Initialkörning:)																									
5	3,6	8,7	9,6	13,4	14,7	15,4	10 ⁶	10 ³	17	5·10 ⁵	20	0,1	50	1597	-0,0532	0,0287	17,83	18,72	2,5	3,6	8,7	9,6	13,4	14,7	15,4
5	3,6	8,7	9,6	13,4	14,7	15,4	10 ⁶	5·10 ³	17	1·10 ⁵	20	0,1	50	8611	0,0025	-0,0028	18,29	19,96	2,54	3,66	8,72	9,26	13,80	14,58	15,31
5	3,66	8,72	9,26	13,80	14,58	15,31	10 ⁶	10 ⁴	17	5·10 ⁴	20	0,03	30	17302	0,0056	-0,0059	18,26	19,87	2,53	3,60	8,75	9,37	13,75	14,62	15,31
5	3,6	8,7	9,6	13,4	14,7	15,4	10 ⁶	10 ³	17	5·10 ⁵	20	0,1	30	1765	0,0048	-0,0020	18,23	20,00	2,65	3,66	8,81	9,27	13,70	14,72	15,47
5	3,6	8,7	9,6	13,4	14,7	15,4	10 ⁶	5·10 ³	17	1·10 ⁵	20	0,3	70	9602	0,013	-0,0058	18,36	19,96	2,42	2,78	8,25	9,93	13,13	13,43	15,31
(Lokalt minimum!)																									
Utgångskörning på Mårtenssons exempel med fem omslagpunkter. (Ingen inbromsning mitt i körningen, till skillnad från ovan).																									
5	3,6	13,4	14,7	15,4			10 ⁶	10 ⁴	17	1·10 ⁵	20	0,3	50	22407	0,0035	0,0120	18,45	19,95	2,81	4,19	13,18	14,29	15,42		
5	4,19	13,18	14,29	15,41			10 ⁶	10 ⁴	17	1·10 ⁵	20	0,01	20	17617	0,0016	-0,007	18,3	19,94	2,87	4,12	13,21	14,38	15,41		
(dåligt)																									

