Eindhoven University of Technology

MASTER

Faseregeling van het Eindhovense A.V.F. cyclotron

Reumers, R.

Award date:
1975

Link to publication

Disclaimer
This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Download date: 23. Jun. 2025

Faseregeling van het Eindhovense A.V.F. Cyclotron.

Afstudeerverslag

R.Reumers.

De werkzaamheden zijn verricht o.l.v.

ir. G.C.L. van Heusden

prof. dr. ir. H.L. Hagedoorn

Technische Hogeschool Eindhoven
Afdeling Der Technische Natuurkunde

Eindhoven, april 1975.

INHOUD

	Samenvatting	pag. 2
Hoofdstuk 1	Inleiding	" 3
Hoofdstuk 2	Het fasehoek meetsysteem	" 5
	2-1 Inleiding	" 5
	2-2 Het meetsysteem	" 6
	2-3 Absolute faseijking	" 10
Hoofdstuk 3	De faseregeling	" 14
	3-1 Inleiding	" 14
	3-2 Kleinste kwadratenregeling van de fase	" 15
Hoofdstuk 4	Theoretisch model van de faseregeling	" 24
	4-1 Inleiding	" 24
	4-2 Systeembeschrijving in de toestandsruimte	" 24
	4-3 Voorbeelden van de toestandsbeschrijving van enkele onderdelen van het regelsysteem.	" 28
	4-4 Enkele rekenresultaten	" 32
Hoofdstuk 5	Metingen	" 39
	Referenties	" 43
	Appendix A	
	Appendix B	
	Appendix C	

Samenvatting

Voor de instelling van een A.V.F. cyclotron is de fase van de versnelde deeltjes ten opzichte van de hoogfrequent versnelspanning een belangrijke grootheid.

Als onderdeel van het automatiseringsproject van het Eindhovense A.V.F. cyclotron is dan ook een faseregeling ontworpen. Daartoe worden de fases op een vijftal interne stralen gemeten en via het CAMAC dataverwerkingssysteem in een DEC PDP-9 computer ingevoerd. De bereikte gevoeligheid van het meetsysteem is 50 nA.voor de interne bundelstroom en 1° voor de fase.

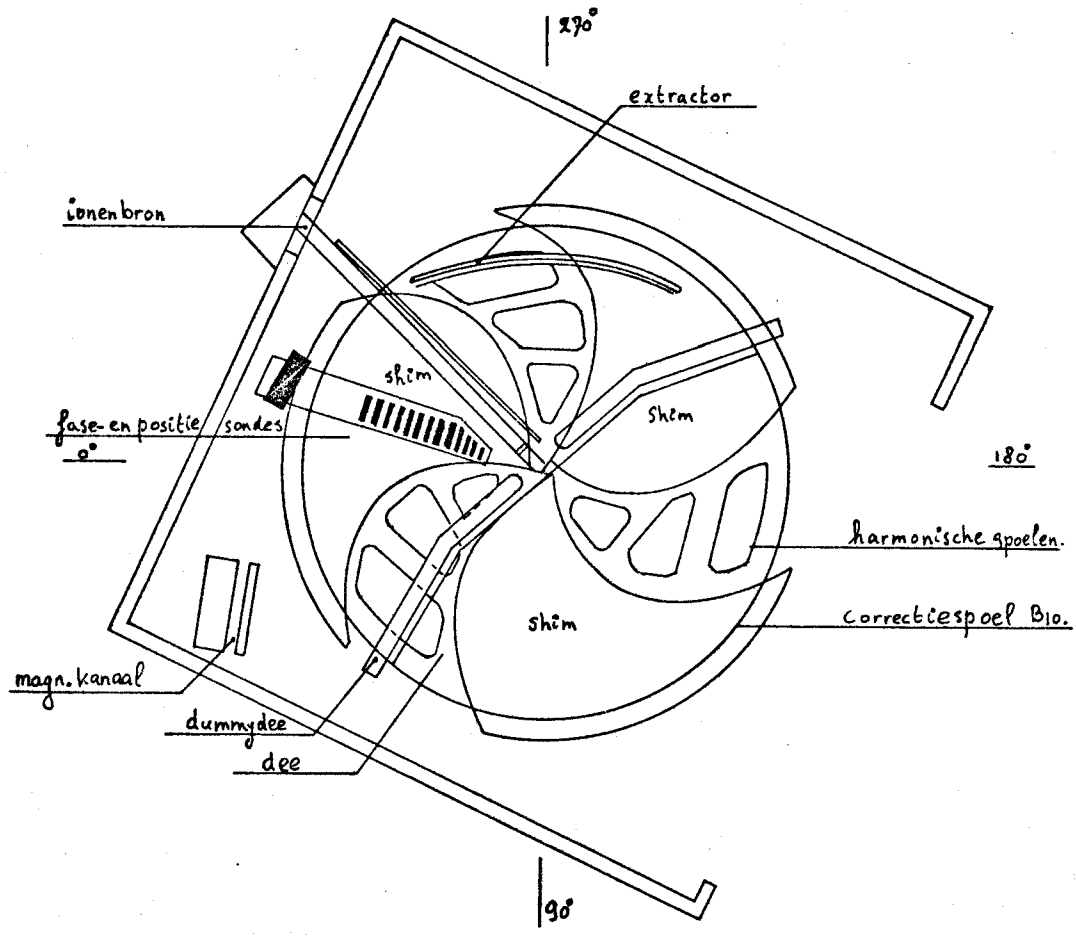
Uit het verschil tussen gewenste- en gemeten fases berekend de computer de magneetveld correcties die uitgevoerd moeten worden om dat verschil te minimaliseren. Via CAMAC worden de instellingen van de correctie-spoelen B_4, B_6, en B_{10} gecorrigeerd.

Van het faseregelsysteem is een mathematisch model gemaakt met behulp van de beschrijvingswijze in de toestandsruimte.

Achtereenvolgens worden het fasemeetsysteem, de faseregeling, het model in de toestandsruimte en enkele metingen met en aan de faseregeling beschreven.

1 Inleiding

Het Eindhovense A.V.F. cyclotron en het bijbehorende bundelgeleidingssysteem zijn elders reeds uitgebreid beschreven. (ref.1)
De versneller heeft o.a. een pooldiameter van 1.30 m., een drievoudig symmetrisch magneetveld, tien stel concentrische correctie spoelen (B_1 t/m B_{10} , drie stel harmonische spoelen (A_{11} t/m A_{32}), een versnelelectrode van 180°, een hoog frequent (H.F.) versnelspanning (variabel van 5 tot 23 MHz) en een extractor. Zie figuur 1.1.



figuur 1.1 Doorsnede van het mediaanvlak van het isochroon cyclotron van de T.H. Eindhoven.

Het bundelgeleidingssysteem bevat een energieanalyse systeem bestaande uit twee 45° afbuigmagneten, één ingangs- en één uitgangsspleet en een quadrupool triplet.

Het doel van het automatiseringsproject is het eenmaal door de operator globaal ingestelde cyclotron met behulp van een computer in een optimale instelling te brengen en te handhaven. In het verleden is hiertoe het verband tussen bundeleigenschappen en cyclotron parameters bepaald. Beschouwt men kleine variaties dan mogen de verbanden lineair verondersteld worden .Ze kunnen worden weergegeven in een variatiematrix.

Voor de automatische regeling van het cyclotron wordt een groot aantal bundeleigenschappen continu gemeten zonder de bundel te onderbreken. De voor dit verslag relevante eigenschap is:
- De fasehoek van de versnelde ionen t.o.v. de H.F. versnelspanning als functie van de straal binnen het cyclotron.

In dit verslag wordt de faseregeling behandeld. Te regelen grootheden hierbij zijn de fasehoeken van de ionen op de verschillende stralen. De fasehoeken worden met behulp van de concentrische correctiespoelen gecorrigeerd.

Via het CAMAC dataverwerkingssysteem meet de computer de fasehoeken. Via datzelfde systeem voert hij ook de berekende correcties uit.

Het CAMAC-systeem is een systeem dat door de E.S.O.N.E. -commissie (European Standards of Nuclear Electronics) in de tweede helft van de jaren zestig ontwikkeld werd, teneinde een standaardisatie van de koppeling van experimenten aan computers te bewerkstelligen.

Het meetsysteem wordt behandeld in hoofdstuk 2, het regelsysteem in hoofdstuk 3. In hoofdstuk 4 wordt een mathematisch model van de faseregeling beschreven. In datzelfde hoofdstuk staan ook enkele resultaten van de berekeningen aan dat model. In hoofdstuk 5 worden die rekenresultaten nog vergeleken met de in de praktijk uitgevoerde metingen. In dit hoofdstuk komt ook nog een meting van de faseregeling gecombineerd met een energiespreidings meting, uitgevoerd met het energie analyse systeem, aan de orde.

2 Het fasehoek meetsysteem

2-1. Inleiding

In een drievoudig symmetrisch magneetveld met gemiddelde magnetische inductie $\langle B_z(r)\rangle$ is de hoekfrequentie ω_α van de geladen deeltjes gelijk aan (ref.2):

$$\omega_\alpha(r) = \frac{Ze\langle B_z(r)\rangle}{m}\left\{1+\sum_n\left(\frac{A_n^2}{2(n^2-1)}+\frac{A_nA_n'}{2(n^2-1)}+\frac{B_n^2}{2(n^2-1)}+\frac{B_nB_n'}{2(n^2-1)}\right)\right\} \qquad (2\text{-}1.$$

waarin A_n, B_n de fouriercoëffecienten zijn van een n-voudig symmetrisch veld.

$m = m_o\,(1-v^2/c^2)^{-1/2}$ = massa van het deeltje.

m_o = rustmassa.

v = snelheid van het deeltje.

c = lichtsnelheid in vacuüm.

Z = ionisatiegraad van het deeltje.

e = eenheidslading.

$\langle B_z(r)\rangle$ = de gemiddelde verticale B-component.

r = de straal.

Men noemt een veld isochroon wanneer de deeltjes een omloopfrequentie hebben die onafhankelijk van de straal is. Men streeft ernaar om de deeltjes rond de top van de versnelspanning te versnellen, de fasehoek is dan ongeveer nul. Teneinde een zo goed mogelijk isochroon veld te maken of om een veld te maken waarbij de deeltjes als functie van de straal een gewenst faseverloop volgen, zijn paarsgewijs boven en onder het mediaanvlak tien concentrische correctiespoelen (B_1 t/m B_{10}) aangebracht. Wanneer de omloopfrequentie niet gelijk is aan de frequentie van de H.F. wisselspanning ontstaat een fasefout per omwenteling gegeven door (ref.2):

$$\Delta \sin\varphi = \frac{\omega_\alpha(r)-\omega_{HF}}{\omega_{HF}}\cdot 2\pi \qquad (2\text{-}1.2)$$

In ons geval zijn de afwijkingen van de fase zo klein dat formule (2-1.2) benaderd kan worden door :

$$\Delta\varphi \approx \frac{\omega_\alpha(r) - \omega_{HF}}{\omega_{HF}} \cdot 2\pi \qquad (2\text{-}1.3)$$

Door integratie over de omwentelingen is de fase φ van de bundel als functie van de straal te berekenen.
Volgens formule (2-1.1) geldt voor kleine variaties:

$$\Delta\omega_\alpha \approx \frac{Ze\,\Delta\langle B_z(r)\rangle}{m} \qquad (2\text{-}1.4)$$

Samen met formule (2-1.3) is dan het verband tussen fase en magneetveld gelegd.

Ten behoeve van de automatische regeling van het cyclotron is het wenselijk om de fase van de deeltjes op een aantal stralen tegelijk en continu te kunnen meten. Het meetsysteem is hoofdzakelijk door F. Schutte en J. Marchand (ref.1,3,4) ontwikkeld.

Aan het meetsysteem is een systeem toegevoegd waarmee het L.F. bundelsignaal*) per meetkanaal een willekeurig aantal graden in fase kan worden verschoven. Dit systeem (het analoge schuifregister) maakt het mogelijk fasefouten ten gevolge van verschillen in H.F. versterkers, filters en leidingen te compenseren.
Een korte beschrijving van dit zes-kanaals analoge schuifregister volgt in par.2-2.
In Appendix A wordt een uitgebreide beschrijving gegeven.

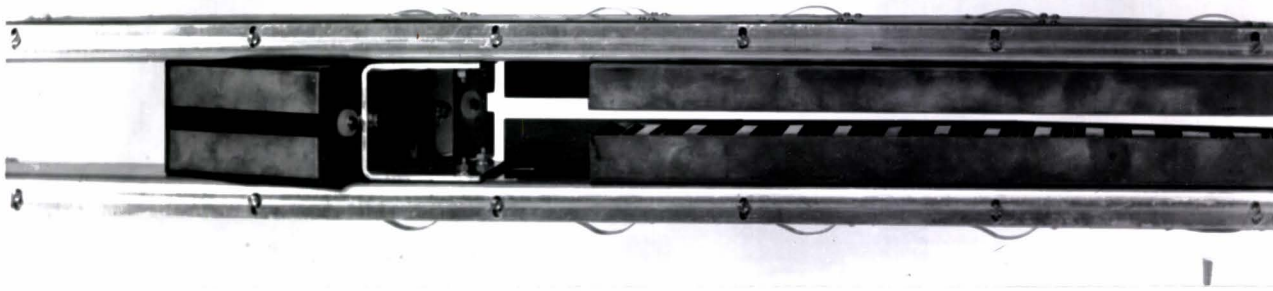
2-2. Het meetsysteem

De stroom van de interne bundel en de fasehoek ten opzichte van de H.F. versnelspanning worden gemeten met behulp van electrostatische oppiksondes die de bundel niet onderbreken.

Deze zgn. fasesondes zijn op een meetbalk gemonteerd (zie figuur 2.1) en bevinden zich paarsgewijs 8 mm boven en onder het mediaanvlak (z = 0 vlak).

*) Zie par. 2-2

De sondes zelf zijn platte koperen plaatjes en hebben een constante oppervlakte van 450 mm^2 en zijn op 13 verschillende stralen aangebracht: Van een straal van 225 mm oplopend met 25 mm tot een straal van 525 mm. Om electrostatische oplading van sonde en bakje, waarin de sonde zich bevindt, te voorkomen zijn deze via een 1,5 MΩ weerstand met de meetbalk verbonden.

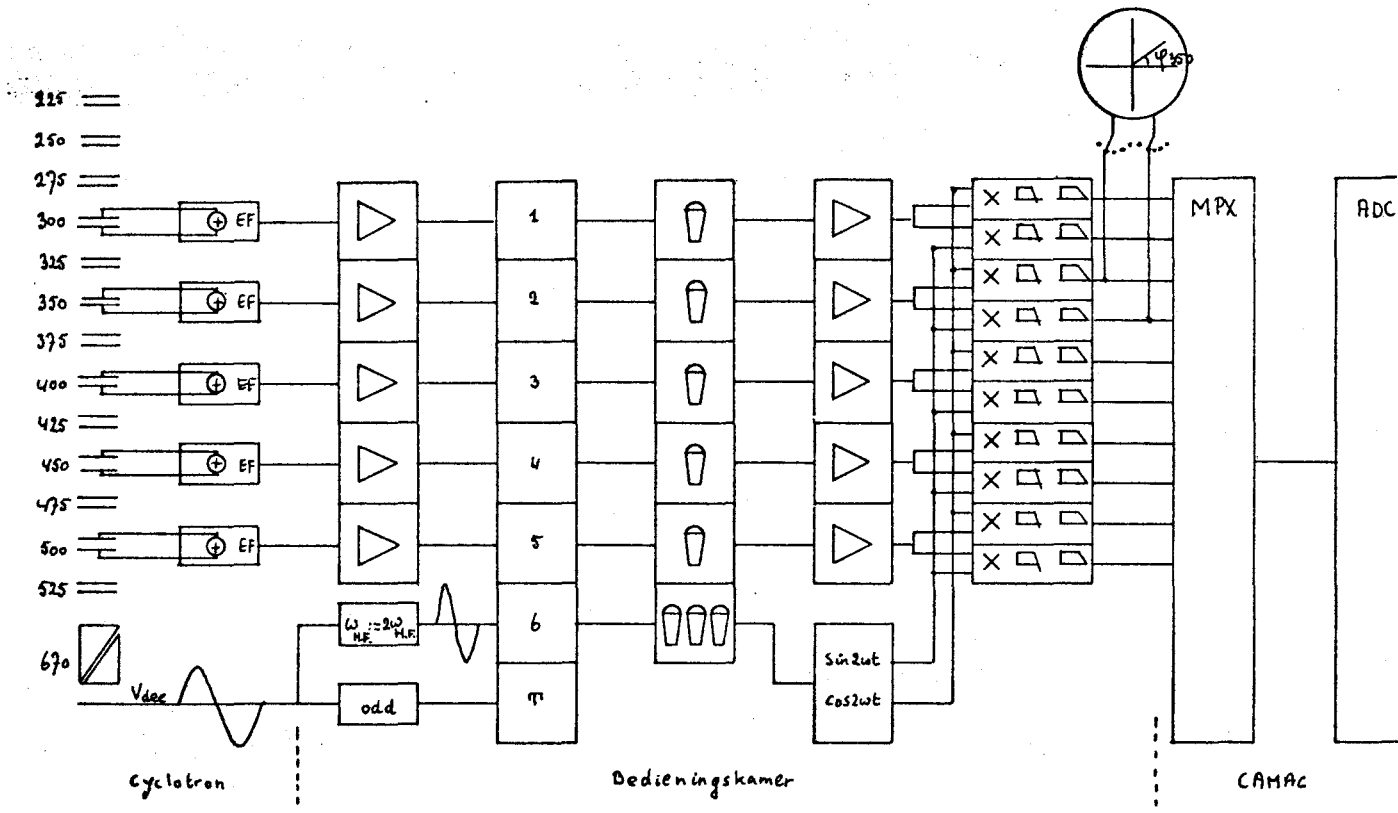


figuur 2.1. De meetbalk met sondes.

Twee driehoekige sondes, de zgn. positie sondes zijn direct achter de extractor op een straal van 670 mm geplaatst. Hun afmetingen zijn 55 x 125 mm en bevinden zich eveneens 8 mm boven en onder het mediaanvlak.

De signaal verwerking van de fasesondes is schematisch weergegeven in figuur 2.2. Eventueel kunnen twee kanalen gebruikt worden voor de verwerking van de signalen van de positie sondes. Het signaal verwerkingssysteem kan in drie stukken worden opgesplitst: Een hoogfrequent gedeelte, een zes-kanaals samplesysteem en een laagfrequent (L.F.) correlatie gedeelte.

In het H.F. gedeelte worden de signalen van elk stel sondes opgeteld en via een emittor volger naar een versterker en het sample-systeem in de bedieningskamer gezonden. De signalen van vijf paar sondes worden aan vijf ingangen van het sample-systeem aangeboden. De overige sondes kunnen eventueel via een multiplexer, die automatisch of met de hand bediend kan worden, met een sampleeenheid worden verbonden. Voor de faseregeling van het cyclotron kan met vijf sondes worden volstaan. In hoofdstuk 3 wordt hier nader op ingegaan. Er is gekozen voor de sondes op de volgende stralen; r = 300, 350, 400, 450 en 500 mm.



figuur 2.2. Electronische signaal verwerking voor het meten van de stroom en de fase van de bundel in het cyclotron.

Tenslotte wordt aan het zesde en laatste kanaal van het sample-systeem de in frequentie verdubbelde versnelspanning aangeboden. Vervolgens worden de naar lagere frequenties getransformeerde signalen gecorreleerd met twee, onderling 90° in fase verschillende signalen die afgeleid zijn van het referentie signaal. De correlatie producten bezitten informatie over fase en amplitude van de bundelsignalen.
Stel dit laagfrequente bundelsignaal als:

$$U_{in}(t) = \hat{U}_1 \cos(2\omega t + \varphi_2) \qquad (2\text{-}2.1)$$

En de referentie signalen als:

$$u_{s,ref.}(t) = \hat{u}_0 \sin 2\omega t \qquad (2\text{-}2.2)$$

$$u_{e,ref.}(t) = \hat{u}_0 \cos 2\omega t \qquad (2\text{-}2.3)$$

Dan geldt aan de uitgangen van de correlatoren:

$$u_s(t) = u_{in}(t) * u_{s,ref}(t) = \tfrac{1}{2}\hat{u}_1\hat{u}_0 \{\sin(4\omega t + \varphi_2) + \sin\varphi_2\} \qquad (2\text{-}2.4)$$

$$u_e(t) = u_{in}(t) * u_{e,ref}(t) = \tfrac{1}{2}\hat{u}_1\hat{u}_0 \{\cos(4\omega t + \varphi_2) + \cos\varphi_2\} \qquad (2\text{-}2.5)$$

Met als gelijkspannings-componenten:

$$\bar{u}_s(t) = \tfrac{1}{2}\hat{u}_2 \sin\varphi_2 \qquad (2\text{-}2.6)$$

$$\bar{u}_e(t) = \tfrac{1}{2}\hat{u}_2 \cos\varphi_2 \qquad (2\text{-}2.7)$$

waarin: $\hat{u}_2 = \hat{u}_1\,\hat{u}_0$.

Met behulp van de A.D.C. in het CAMAC - systeem worden de meetwaarden in de computer ingelezen. Deze bepaalt hieruit de fase en de intensiteit van de tweede harmonische component van de bundelsignalen uit de volgende relaties:

$$\varphi_2 = \arctan\left(\bar{u}_s/\bar{u}_e\right) \qquad (2\text{-}2.8)$$

$$\hat{u}_2 = 2\sqrt{\bar{u}_s^2 + \bar{u}_e^2} \qquad (2\text{-}2.9)$$

De twee gelijkspannings-componenten uit formule (2-2.6) en (2-2.7) kunnen via een door J.P.F. Marchand ontwikkelt systeem (ref. 3) ook rechtstreeks als vector met fase φ_2 en amplitude $\hat{u}_2$ op een oscilloscope worden weergegeven. Deze visuele voorstelling is een hulpmiddel bij de instelling van het cyclotron en bij de absolute faseijking zoals die in par. 2-3 beschreven zal worden. Ten behoeve van de faseijking is per meetkanaal een analoog schuifregister tussengevoegd.
Het analoge schuifregister is een regelbare vertragingslijn die frequentie en amplitude onafhankelijk werkt en is uitgevoerd met emmertjes geheugens (type M 31, Philips).

Het emmertjes geheugen bevat cellen die bestaan uit een transistor en een geheugen condensator (ref.5.6). De bemonsterde signaalwaarden zijn als ladingen opgeslagen in de condensatoren en de transistoren verzorgen op bevel van de schuifpulsen het doorschuiven van deze informatie. Dit gebeurt door lading te verplaatsen in de richting tegengesteld aan de voortplantingsrichting van het signaal. Gebruikt als vertragingslijn kan een signaal met bandbreedte B een tijd T vertraagd worden door een emmertjes geheugen met n = 4 BT cellen. Een voordeel is dat dezelfde schakeling voor grote en kleine bandbreedte bruikbaar is en dat de vertragingstijd continu kan worden gevarieerd met de schuiffrequentie.

Het emmertjes geheugen volgens het type M 31 bevat 32 cellen. De frequentie van de L.F. bundelsignalen is $\approx$ 1 kHz. De schuiffrequentie is variabel van 60-100 kHz. Voor de vijf fase meetkanalen (één emmertjes geheugen per kanaal) komt dit neer op een fase verschuiving van 75°. Voor het referentie signaal (drie emmertjes geheugens) is dat 225°.

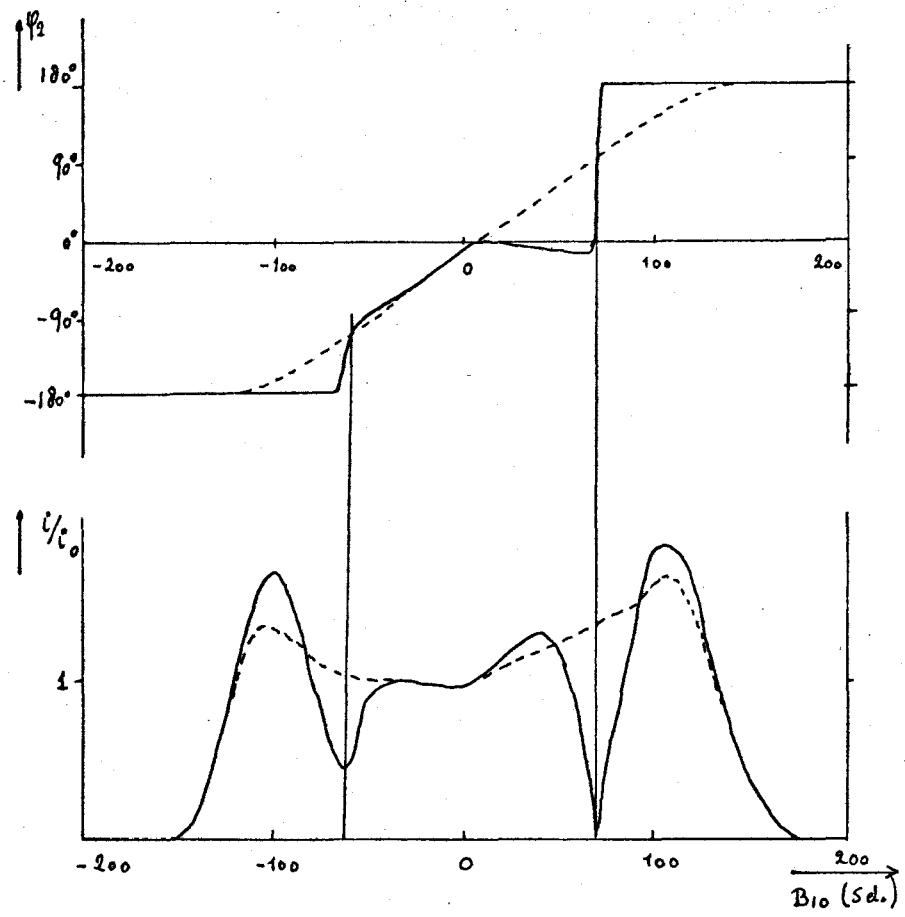
2-3. Absolute faseijking.

Met behulp van het in par. 2-2. beschreven meetsysteem zijn o.a. de afhankelijkheden van de stroom en de fasehoek van de instelling van de correctie spoelen gemeten. In figuur 2.3 worden de afhankelijkheden van de instelling van B_{10} gegeven voor de sondes op een straal van 300 mm bij een protonen bundel van 20 MeV. Aan de hand van deze meting zal het principe van de absolute faseijking duidelijk gemaakt worden (ref.7).

In het gebied van -30 schaaldelen (sd.) $< B_{10} <$ + 10 sd., -één sd. $B_{10} \approx 24\ \mu T$ - blijft de isochronie afwijking van de deeltjes op elke straal kleiner dan de extratorstraal, $r_{extr.} = 520$ mm kleiner dan 90°, zodat de deeltjes in principe de extractor kunnen bereiken en kunnen worden geëxtraheerd.

In het gebied waar $B_{10} < -30$ sd. en $B_{10} > 10$ sd. is de afwijking van het isochrone magneetveld zo groot geworden dat de bundel slechts een straal r max < r extr. kan bereiken en vervolgens wordt vertraagd.

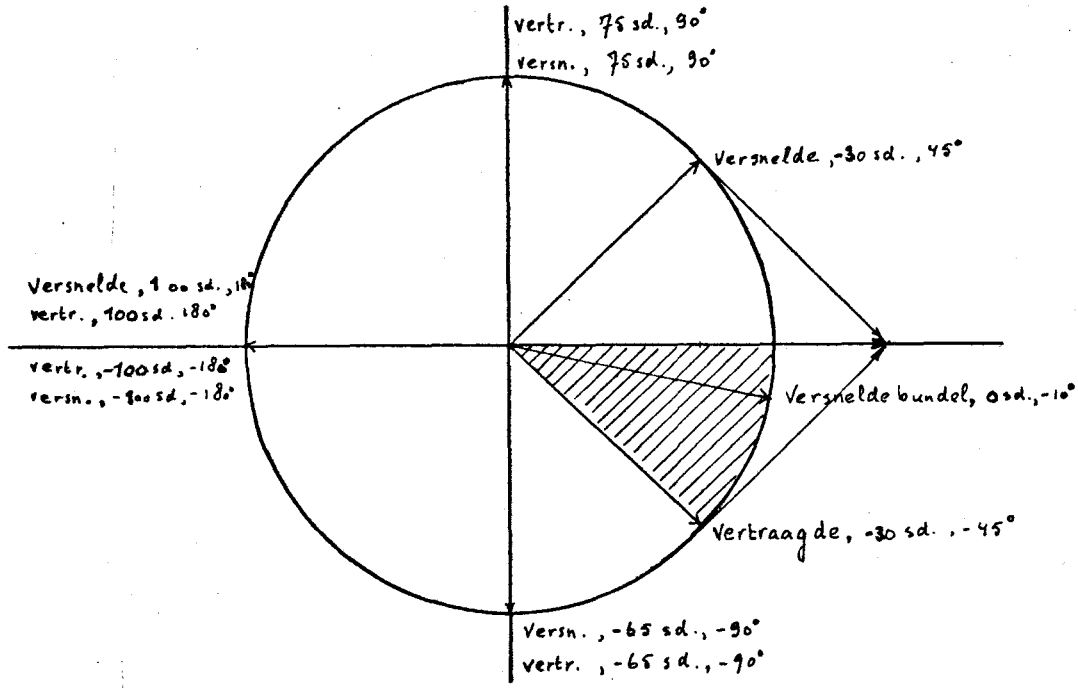
In dat geval bestaat het sondesignaal op elke straal r<r max uit twee bijdragen, namelijk de versnelde en de vertraagde bundel



figuur 2.3 Stroom en fasehoek op r = 300 mm als functie van het hoofdmagneetveld voor 20 MeV. potronen.
---------- r = 300 mm met target op 325 mm.
_____ r = 300 mm.

en wordt in figuur 2.3 voorgesteld door de getrokken lijn.
De versnelde bundel is in figuur 2.3 voorgesteld door de gestippelde lijn en is gemeten door het interne target direct achter de desbetreffende sondes te plaatsen, waardoor de bundel na de sonde te zijn gepasseerd wordt opgevangen. De versnelde en de vertraagde bundel hebben gelijke maar tegengestelde fasehoeken. Immers het magneetveld dat het versnelde deeltje ondervindt tussen r_{sonde} en $r_{max.}$ is gelijk aan het magneetveld dat het vertraagde deeltje ziet tussen $r_{max.}$ en r_{sonde}.

Met behulp van een vectordiagram (figuur 2.4), waarin de amplitude en de fase van de tweede harmonische component van het sondesignaal op r = 300 mm worden gerepresenteerd kan figuur 2.3 worden verklaard.



figuur 2.4 Vectordiagram van de tweede harmonische component van het sondesignaal op r = 300 mm met de instelling van B_{10} en de (tweede harmonische) fasehoek als parameters.

Het gearceerde gebied is het gebied waarbinnen geen bundel terugkeert en derhalve de bundel kan worden geëxtraheerd. Er worden geen stroomverliezen verondersteld.

Als B_{10} kleiner dan - 30 sd. of groter dan + 10 sd. wordt, moet de vector van de vertraagde bundel worden opgeteld bij die van de versnelde bundel met tegengestelde fase φ_2, versn.. Dit impliceert dat de vectorsom een tweede harmonische fasehoek φ_1 van 0° of $\pm$ 180° bezit. De sprongen in figuur 2.3 treden op wanneer de versnelde bundel een fase (φ_2) heeft van $\pm$ 90°. Deze punten blijken zeer nauwkeurig gedefinieerde punten voor de absolute faseijking te zijn, als men ervan uitgaat dat men in staat is om de vertraagde bundel te onderscheppen vlak achter de sonde waarvan men de fase wil ijken. De radiale positie van het target in het cyclotron is echter onbekend.

Bij de absolute faseijking wordt dan ook gebruik gemaakt van de gebieden zoals in figuur 2.3 links van - 75 sd. en rechts van + 75 sd.. φ_1 maakt dan een fasesprong van 180°. Maakt men B_{10} nog kleiner (- 200 sd.) resp. groter (+ 200 sd.) dan zal de intensiteit afnemen bij gelijkblijvende fase. De vector op de oscilloscope wijst dan ook in één richting, alleen de lengte veranderd. De richting waarin de vector wijst moet dan samenvallen met de x-as. Is dit niet het geval dan bestaat de mogelijkheid om met het analoge schuifregister dit te bewerkstelligen.

Volgt men deze procedure voor elk meetkanaal dan kan men kanaal voor kanaal ijken op 0°.

Een vector met een fase van 90° op de oscilloscope representeert een faseverschuiving van 45° van de versnelde deeltjes t.o.v. de H.F. versnelspanning in het cyclotron terplaatse van de meetsonde.

3 De Faseregeling

3-1 Inleiding

Zoals in de inleiding (hoofdstuk 1) reeds is aangegeven is het doel van het automatiseringsproject: Het eenmaal door de operator globaal ingestelde cyclotron met behulp van de computer in de optimale instelling te brengen en te handhaven. Op dit moment beschikt men daartoe over twee automatische regelingen:
1/ De faseregeling.
2/ Regeling op maximaal extractie rendement (Puls-Unit).

De regeling op maximaal extractie rendement vormt het afstudeerwerk van P. Kooy. Te zijner tijd wordt hiervan een intern rapport geschreven. Zie ook ref. 1.

Ten behoeve van de faseregeling kan de fase op vijf verschillende stralen continu gemeten worden met de capacitieve oppiksondes en het daaraan gekoppelde meetsysteem. Via het CAMAC-systeem worden de analoge signalen in digitale vorm in de computer ingelezen. Deze berekent uit de sinus en cosinus component volgens formule (2-2.8) en (2-2.9) de fase en intensiteit (amplitude) van de bundel ter plaatse van de sonde. (r_{sonde}).

CHAN	MSRED	PHASE	AMPL	
1	0.264			
2	1.860	8.07	1.879	r_{sonde} = 300 mm
3	0.459			
4	0.967	25.40	1.070	r_{sonde} = 350 mm
5	0.840			
6	2.109	21.71	2.270	r_{sonde} = 400 mm
7	-0.049			
8	1.035	-2.70	1.036	r_{sonde} = 450 mm
9	0.410			
10	1.992	11.63	2.034	r_{sonde} = 500 mm

Tabel 3.1 Voorbeeld van computer uitvoer voor automatisch gemeten fase en amplitude van de bundel op diverse stralen. Kanaal 1, 3, 5, 7 en 9 geven telkens de sinus component. Kanaal 2, 4, 6, 8 en 10 de cosinus component van het bundel signaal.

In tabel 3.1 is een voorbeeld gegeven van de fases (φ_2) van de verschillende sondes, zoals die door de computer gegeven worden.

In de volgende paragraaf worden twee regelprocedures aangegeven om de fase te corrigeren.

3-2. Regeling van de fase met behulp van de kleinste kwadraten methode.

a/ Regeling van de fase met behulp van de kleinste kwadraten regelmatrix.

Indien slechts kleine variaties worden beschouwd is de relatie tussen de cyclotron parameters B_i en de fase φ_k lineair:

$$\vec{\varphi} = A\vec{B} \qquad (3\text{-}2.1)$$

Waarin de elementen van de variatiematrix A zijn gedefinieerd als:

$$a_{ki} = \left(\partial\varphi_k / \partial B_i \right) \qquad (3\text{-}2.2)$$

Als $\vec{\varphi}_0$ de vector van de gewenste - en $\vec{\varphi}$ de vector van de gemeten fase voorstelt moet de vector $\vec{\varphi}$ worden gecorrigeerd met de vector:

$$\Delta\vec{\varphi} = \vec{\varphi}_0 - \vec{\varphi} \qquad (3\text{-}2.3)$$

Is het aantal bundeleigenschappen (gemeten fases) gelijk aan het aantal parameters (B-spoelen) dan wordt de noodzakelijke correctie van de parameters verkregen uit een matrix inversie:

$$\Delta\vec{B} = A^{-1}\,\Delta\vec{\varphi} \qquad (3\text{-}2.4)$$

Is het aantal parameters kleiner dan het aantal gemeten bundelgrootheden dan is de variatie -matrix niet vierkant, en er bestaat geen inverse variatie-matrix. Men kan nu alleen proberen het verschil tussen gewenste - en gemeten bundelgrootheden zo gering mogelijk te maken. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van de kleinste kwadraten methode.

Dit houdt in dat de volgende functie F geminimaliseerd moet worden:

$$F = \sum_{k=1}^{n} \left(\Delta\varphi_k - \Delta\varphi_{k0} \right)^2 \qquad (3\text{-}2.5)$$

Met $\Delta\varphi_{k0}$ de gewenste en $\Delta\varphi_k$ de uitgevoerde correcties van de fases (φ_k) op de verschillende stralen.

Voor de aan te brengen correcties van de stuurparameters volgt hieruit (ref. 8):

$$\Delta\vec{B} = R \; \Delta\vec{\varphi}_0 \qquad (3\text{-}2.6)$$

$$R = \left(A^T \cdot A \right)^{-1} A^T \qquad (3\text{-}2.7)$$

R noemt men de kleinste kwadraten regel-matrix.

Een voorbeeld van een met de computer gemeten variatie-matrix voor vijf bundelsignalen (de sondesignalen op een straal van 300, 350, 400, 450 en 500 mm) en drie correctie spoelen (B_4, B_6 en B_{10}) is gegeven in tabel 3.2

$$A = \begin{bmatrix} 0.367 & -0.607 & -0.436 \\ 0.369 & -1.111 & -0.613 \\ 0.371 & -1.373 & -0.866 \\ 0.352 & -1.214 & -0.971 \\ 0.331 & -1.236 & -1.386 \end{bmatrix}$$

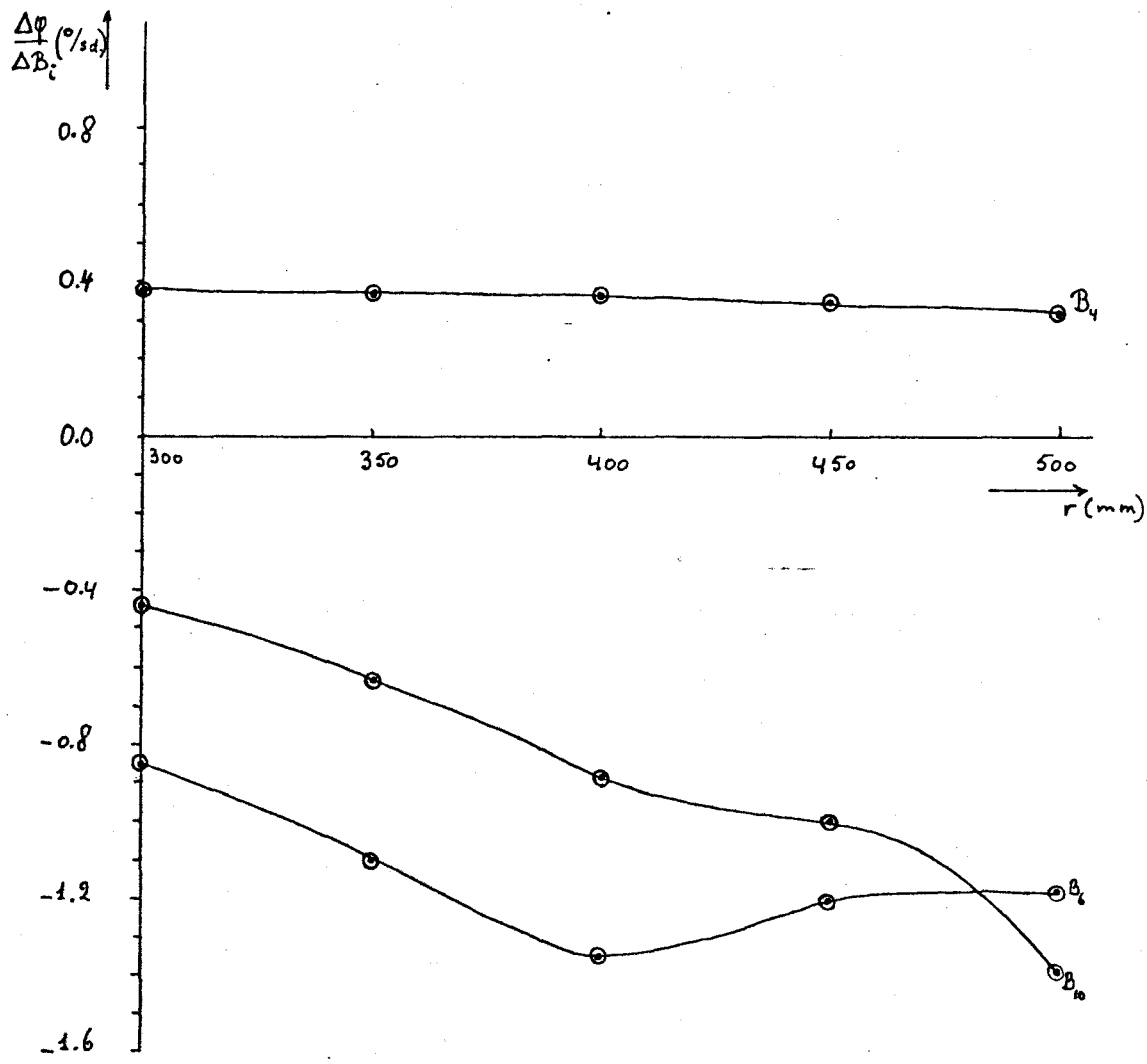
waarin: $\Delta\vec{\varphi} = A \; \Delta\vec{B}$

Tabel 3.2 Voorbeeld van de computeruitvoer van een automatisch gemeten variatie-matrix.

De bij deze variatie-matrix behorende kleinste kwadraten regel-matrix (volgens formule 3-2.7) ziet er als volgt uit:

$$R = \begin{bmatrix} 6.066 & -0.117 & -3.632 & -0.575 & 0.366 \\ 1.365 & -0.741 & -2.169 & -0.288 & 1.283 \\ -0.307 & 0.717 & 1.061 & -0.069 & -1.557 \end{bmatrix}$$

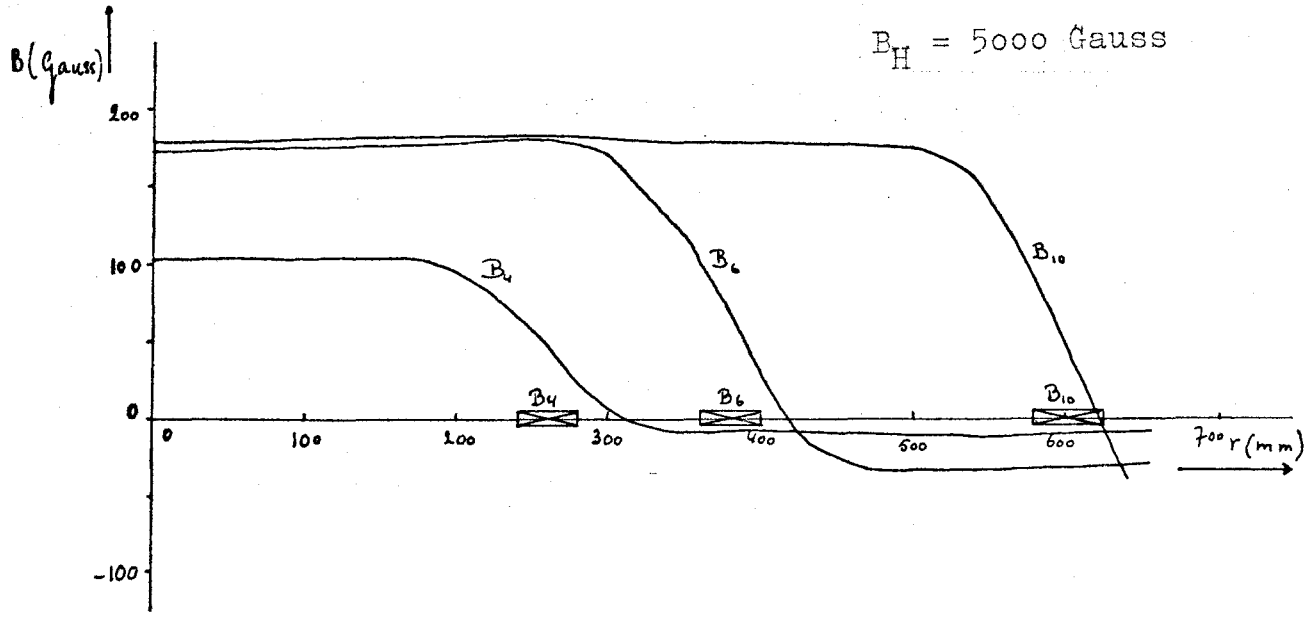
De elementen van A kunnen, uitgedrukt in graden per schaaldeel (^{o}/sd.), uitgezet worden in een grafiek als functie van de straal (r). Dit is uitgevoerd in figuur 3.1.



Figuur 3.1 De elementen van de variatie-matrix $\partial\varphi_k/\partial B_i$ uitgezet als functie van de straal r (mm).

Figuur 3.1 kan men verklaren uit het verloop van de magnetische inductie (B) als functie van de straal voor de diverse correctie spoelen bij een hoofdmagneetveld van 5000 Gauss. Deze zijn gegeven in figuur 3.2.

Voor de invloed van B_4 op het faseverloop tussen r = 300 mm en r = 500 mm geldt dat een eenmaal opgelopen fase-verandering gehandhaafd zal blijven (formule 2-1.3 en 2-1.4). In het geval van figuur 3.1 is spoel B_4 positief bekrachtigd.



Figuur 3.2 De magnetische inductie (B in Gauss) als functie van de straal voor de drie correctie spoelen B_4, B_6, en B_{10}. De straal R van die concentrische correctie spoelen is aangegeven. De stroom door de spoelen is maximaal, bij het gegeven verloop.

Versnelde deeltjes zullen tot een straal van 410 mm een cummulatieve faseverandering tengevolge van B_6 ondervinden. Buiten die straal zullen zij een tegenover gestelde verandering van de magnetische inductie van B_6 ondervinden, zodat een lichte toename in de elementen van B_6 met de straal is waar te nemen. In het geval van figuur 3.1 is spoel B_6 negatief bekrachtigd.

Tengevolge van B_{10} zal de faseverandering blijven toe- of afnemen met de straal. In het geval van figuur 3.1 is spoel B_{10} negatief bekrachtigd.

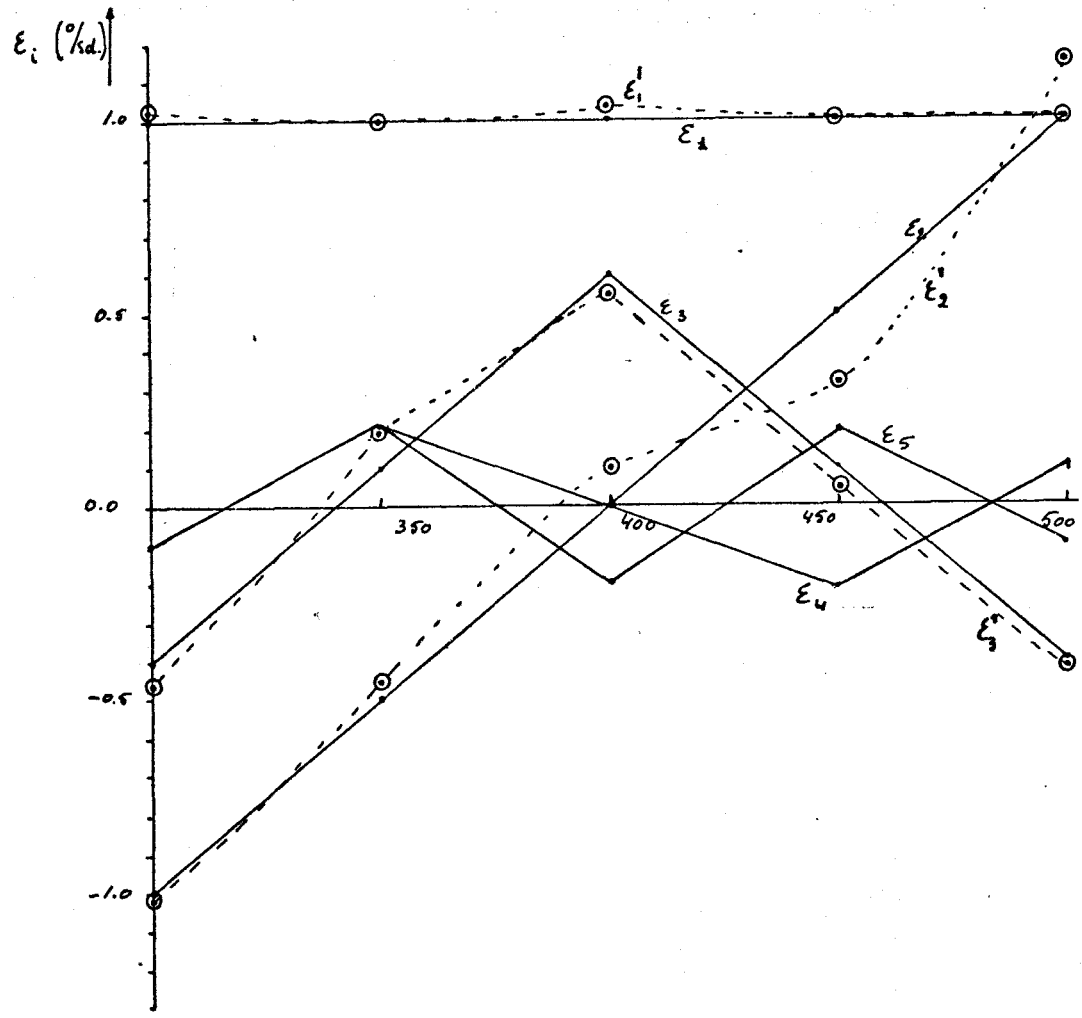
b/ Regeling van de fase met orthogonale vectoren.

Voor de regeling van de fase met orthogonale vectoren is gezocht naar vectoren met "afnemende gladheid".
Met "afnemende gladheid" wordt bedoeld vectoren met een afnemende correlatie coëffecient C, die is gedefinieerd volgens (ref. 9):

$$C = \frac{v_i^{(n)} v_{i+1}^{(n)}}{\frac{1}{2} v_1^2 + \frac{1}{2} v_i^2 + \sum_{k=2}^{i-1} v_k^2} \qquad (3\text{-}2.8)$$

Hierin is $v_i^{(n)}$ de i-de component van de n-de orthogonale basisvector.

In figuur 3.3 is zo'n stelsel van vijf orthogonale basis-vectoren getekend.



Figuur 3.3 Een willekeurig stelsel orthogonale basis-vectoren met "afnemende gladheid": ε_1, ε_2, ε_3, ε_4 en ε_5.

De autocorrelatie coëffecient van ε_1 is: $C_{\varepsilon_1} = 1$
zo is: $C_{\varepsilon_2} = 0.66$
$C_{\varepsilon_3} = 0.08$
$C_{\varepsilon_4} = -0.31$
$C_{\varepsilon_5} = -0.92$

Met behulp van de kleinste kwadraten regel-matrix zoals gegeven op pag. 16 zijn die combinaties van B_4, B_6 en B_{10} berekend, waarbij ε_1, ε_2 en ε_3 zo goed mogelijk benaderd worden. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met het model van de faseregeling en zijn te vinden in hoofdstuk 4 en Appendix C.

Het resultaat is samengevat in figuur 3.3, in de vorm van de gestippelde lijnen. Formule (3-2.9) geeft het resultaat in vector-matrix vorm:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon'_{1,k} \\ \varepsilon'_{2,k} \\ \varepsilon'_{3,k} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2.5 & 0.0 & -0.1 \\ -5.5 & -0.5 & -1.7 \\ -5.3 & -2.8 & 1.5 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \partial\varphi_k/\partial B_4 \\ \partial\varphi_k/\partial B_6 \\ \partial\varphi_k/\partial B_{10} \end{vmatrix} \qquad (3\text{-}2.9)$$

Als men ervan uitgaat dat het faseverloop binnen het cyclotron voldoende glad is, dan zal de bovenstaande matrix uitermate geschikt zijn voor de faseregeling van het cyclotron, immers elke regelvector binnen de driedimensionale ruimte kan ontbonden worden in drie componenten, één langs elke basis-vector in die ruimte.
De kleinste kwadraten regel-matrix wordt dus overbodig indien men in staat is op eenvoudige wijze de matrix uit formule (3-2.9) te berekenen uit de variatie-matrix A volgens formule (3-2.1).

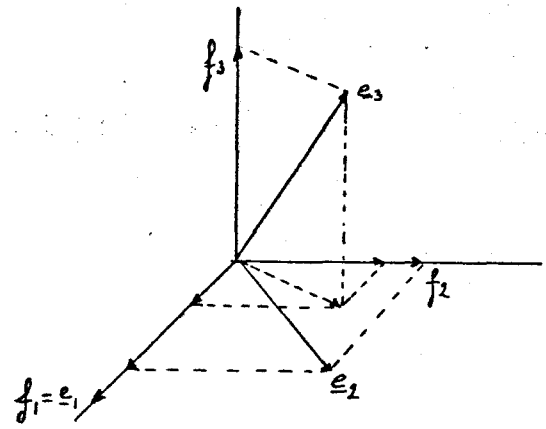
Een van de mogelijkheden hiertoe is het orthogonalisatie-proces van Gram-Schmidt. Met dit proces kan uitgaande van een willekeurige basis $\underline{e}_1, \underline{e}_2, \ldots\ldots, \underline{e}_n$ en orthogonale basis $\underline{f}_1, \underline{f}_2, \ldots\ldots\ldots \underline{f}_n$ bepaald worden.
Neem b.v. $\underline{f}_1 = \underline{e}_1$ en ontbindt $\underline{e}_2$ in, één component langs $\underline{f}_1$ en één -loodrecht op $\underline{f}_1$:

$$\underline{f}_2 = \underline{e}_2 - \frac{(\underline{e}_2, \underline{f}_1)}{(\underline{f}_1, \underline{f}_1)} \underline{f}_1 \qquad (3\text{-}2.10)$$

Doe hetzelfde voor $\underline{e}_3$:

$$\underline{f}_3 = \underline{e}_3 - \frac{(\underline{e}_3, \underline{f}_2)}{(\underline{f}_2, \underline{f}_2)} \underline{f}_2 - \frac{(\underline{e}_3, \underline{f}_1)}{(\underline{f}_1, \underline{f}_1)} \underline{f}_1 \qquad (3\text{-}2.11)$$

Idem voor $\underline{e}_4$ enz.



Figuur 3.4 Het orthogonalisatie-proces van Gram-Schmidt voor een drie dimensionale ruimte, $\underline{e}_1$, $\underline{e}_2$, $\underline{e}_3$ is de oude- en $\underline{f}_1$, $\underline{f}_2$, $\underline{f}_3$ is de nieuwe basis.

In vector matrix notatie kan men dit als volgt weergeven:

$$\begin{vmatrix} \underline{f}_1 \\ \underline{f}_2 \\ \underline{f}_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a & 1 & 0 \\ b & c & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{e}_1 \\ \underline{e}_2 \\ \underline{e}_3 \end{vmatrix} \qquad (3\text{-}2.12)$$

waarin: $a = -\dfrac{(\underline{e}_2, \underline{f}_1)}{(\underline{f}_1, \underline{f}_1)}$

$$b = -a\,\frac{(\underline{e}_3, \underline{f}_2)}{(\underline{f}_2, \underline{f}_2)} - \frac{(\underline{e}_3, \underline{f}_1)}{(\underline{f}_1, \underline{f}_1)}$$

$$c = -\frac{(\underline{e}_3, \underline{f}_2)}{(\underline{f}_2, \underline{f}_2)}$$

Toepassen op de variatie matrix zoals gegeven op pagina 16 levert: $a = 3.15$

$b = -1.84$

$c = -1.32$

De bijbehorende basisvectoren $\underline{f}_1$, $\underline{f}_2$ en $\underline{f}_3$ zijn:

$$\underline{f}_1 = \begin{vmatrix} 0.39 \\ 0.37 \\ 0.37 \\ 0.35 \\ 0.33 \end{vmatrix} \quad \underline{f}_2 = \begin{vmatrix} 0.41 \\ 0.05 \\ -0.20 \\ -0.11 \\ -0.20 \end{vmatrix} \quad \underline{f}_3 = \begin{vmatrix} -0.08 \\ 0.17 \\ 0.26 \\ -0.02 \\ -0.36 \end{vmatrix}$$

De basis vectoren $\underline{f}_4$ en $\underline{f}_5$ kunnen uit de inproducten met $\underline{f}_1$, $\underline{f}_2$ en $\underline{f}_3$ berekend worden:

$\underline{f}_4$: $(\underline{f}_1, \underline{f}_4) = 0$, $(\underline{f}_2, \underline{f}_4) = 0$ en $(\underline{f}_3, \underline{f}_4) = 0$,
met twee vrijheidsgraden.

$\underline{f}_5$: $(\underline{f}_1, \underline{f}_5) = 0$, $(\underline{f}_2, \underline{f}_5) = 0$, $(\underline{f}_3, \underline{f}_5) = 0$ en $(\underline{f}_4, \underline{f}_5) = 0$,
met één vrijheidsgraad.

resultaat:

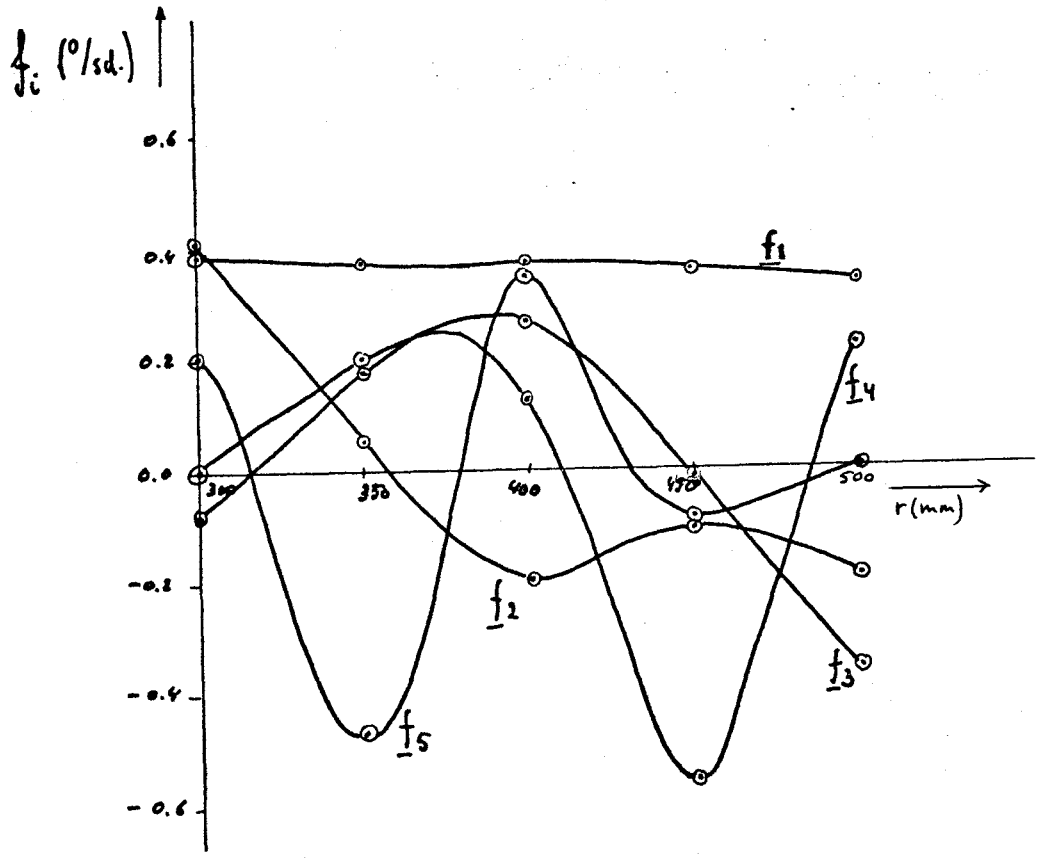
$$\underline{f}_4 = \begin{vmatrix} 0.00 \\ 0.20 \\ 0.13 \\ -0.56 \\ 0.22 \end{vmatrix} \quad \text{en } \underline{f}_5 = \begin{vmatrix} 0.20 \\ -0.47 \\ 0.35 \\ -0.09 \\ 0.00 \end{vmatrix}$$

Uit de correlatie coëffecienten volgt ook hier weer de afnemende gladheid:

$$C_{\underline{f}_1} = 1. \quad , C_{\underline{f}_2} = 0.34 \quad , C_{\underline{f}_3} = 0.20$$

$$C_{\underline{f}_4} = -0.44 \ , C_{\underline{f}_5} = -0.82$$

In figuur 3.5 zijn de componenten van de vectoren $\underline{f}_1$ t/m $\underline{f}_5$ uitgezet als functie van de straal.

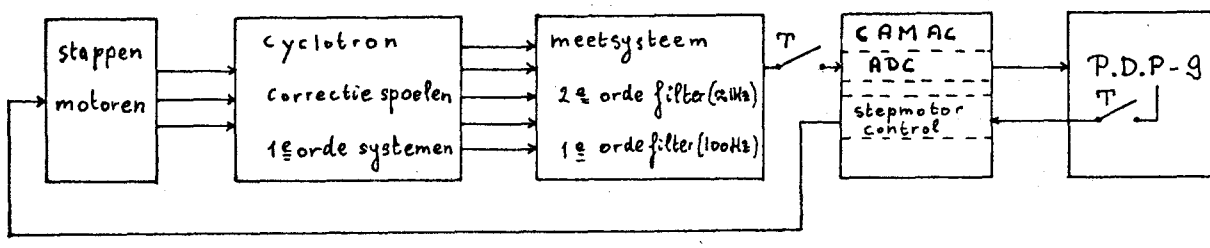


Figuur 3.5 Componenten van de orthogonale vectoren bepaald met het orthogonalisatie-proces van Gram-Schmidt.

4 Theoretisch model van de faseregeling.

4-1. Inleiding

Van het fase regelsysteem is in figuur 4.1 een overzichtsschema gegeven.
Voor kleine variaties wordt de overdracht van magneetveld naar fase gegeven door de variatie-matrix volgens formule (3-2.1).



Figuur 4.1 Overzichtsschema van het fase regelsysteem .

De fase van de tweede harmonische component van het bundelsignaal wordt berekend uit formule (2-2.6) en (2-2.7), zijn de sinus en de cosinus component. In het meetsysteem passeren deze een tweede - ($\approx$ 1 Hz., kritisch ingesteld) en een eerste orde filter (100 Hz).Voor de systeembeschrijving is het eerste orde filter te verwaarlozen t.o.v. het tweede orde filter.

Uit het verschil van de via de A.D.C. gemeten - en in de computer ingelezen gewenste fases, bepaalt de computer volgens formule (3-2.6) de uit te voeren correcties van de correctie spoelen B_4, B_6 en B_{10}.

Het aanbrengen van deze correcties geschiedt met de stappenmotoren. De stappen-motoren worden bediend vanuit CAMAC (stapmotorcontrol). De regelkring is dan gesloten.

Stappen-motoren kunnen als zuivere integratoren worden voorgesteld, correctie spoelen als 1e orde systemen (tamme integratoren).

4-2. Systeem beschrijving in de toestandsruimte.

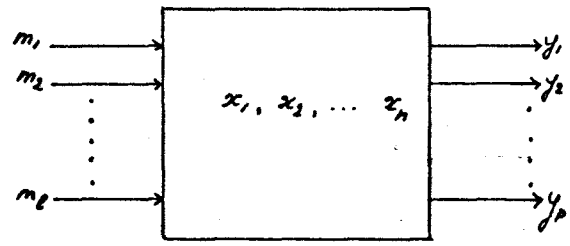
Een lineair systeem kan beschreven worden door een stelsel lineaire differentiaal vergelijkingen met constante coëffecienten.

In vector-matrix notatie kan dat als volgt worden weergegeven:

$$\frac{dv\ (t)}{dt} = A\ v\ (t) \qquad (4\text{-}2.1).$$

Hierin is A de coëffeciënten-matrix en $\vec{v}$ de vector bestaande uit de toestandsgrootheden x en de ingangsgrootheden m die als toestandsgrootheden beschouwd worden.

$$\vec{v} = \begin{vmatrix} \vec{m} \\ \vec{x} \end{vmatrix} \quad \text{en } \vec{m} = \begin{vmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_l \end{vmatrix} \quad , \vec{x} = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{vmatrix} \qquad (4\text{-}2.2).$$



Figuur 4.1. Voorstelling van een systeem met toestandsgrootheden. $y_1 \ldots y_p$ zijn uitgangsgrootheden.

Een lineair en discreet systeem kan tussen twee samplemomenten beschreven worden met een stelsel lineaire differentiaalvergelijkingen met constante coëffeciënten volgens (ref.10) :

$$\frac{d\ v(\lambda)}{d\lambda} = A\ v(\lambda) \qquad (4\text{-}2.3).$$

Hierin is λ de tijd tussen twee samplemomenten in, en kan geschreven worden als:

$$\lambda = t - nT \qquad (o < \lambda \leqslant T).$$

Verder is: T = sample tijd
n = n^{e} sample.

Met behulp van een "State Transition"-matrix (B-matrix) kunnen de veranderingen van de beginwaarden voor de diferentiaal vergelijkingen direct na elk sampletijdstip (gedefinieerd als $\lambda = (0^+)$ gegeven worden als:

$$v\,(nT^{+}) = B\ v\,(nT) \qquad (4\text{-}2.4)$$

Uitgaande van deze beginvoorwaarde vlak na het sampletijdstip, kan met behulp van de "Overall transistion" (ϕ)-matrix de toestand van het systeem op een tijdstip t berekend worden volgens:

$$v\,(nT + \lambda) = \phi(\lambda)\ v\,(nT^{+}) \qquad (4\text{-}2.5)$$

Vergelijking (4-2.5) geeft een beschrijving van het systeem voor:

$$(nT) < t \leq (n+1)\ T \qquad (4\text{-}2.6)$$

De essentie van de ϕ-matrix is dat deze uitgaande van een bepaalde beginsituatie de toestand van het systeem een tijdje t-nT later geeft. De elementen van de ϕ-matrix geven de verbanden tussen de invloeden van elk element op elk ander element als functie van de tijd.

Substitutie van (4-2.4) in (4-2.6) levert:

$$v(t) = \phi\,(t-nT)\ B\ v\,(nT) \qquad (4\text{-}2.7)$$

Zodoende is op t = (n+1) T:

$$v(\overline{n+1}T) = \phi\,(T)\ B\ v\,(nT) \qquad (4\text{-}2.8)$$

Uitschrijven van formule (4-2.8) op de opeenvolgende samplemomenten geeft:

$$n=0 \qquad v(T) = \phi(T)\ B\ v(o) \qquad (4\text{-}2.9)$$

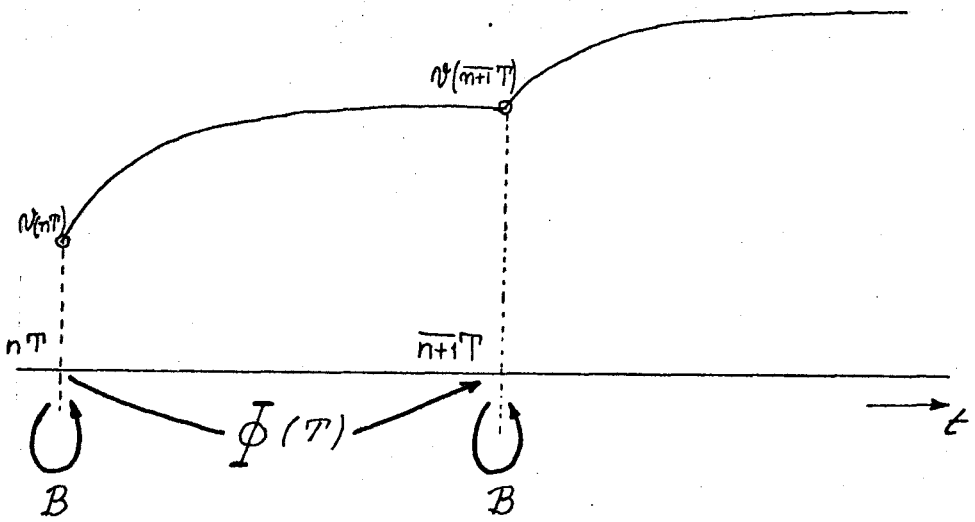
$$n=1 \qquad v(2T) = \phi(T)\ B\ v(T) = (\phi(T)B)^2 v(o) \qquad (4\text{-}2.10)$$

$$n=2 \qquad v(3T) = \phi(T)\ B\ v(2T) = (\phi(T)B)^3 v(o) \qquad (4\text{-}2.11)$$

$$\vdots \qquad\qquad \vdots$$

$$n=n-1 \qquad v(nT) = (\phi(T)B)^n\ v(o) \qquad (4\text{-}2.12)$$

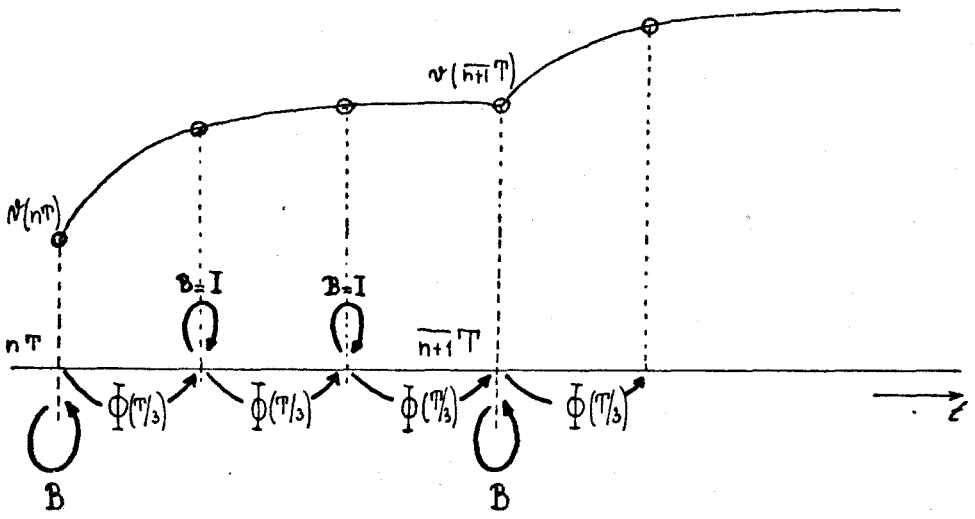
Dit kan men als volgt weergeven:



Figuur 4.2 Overzicht van het gebruik van B- en Φ(T) matrix.

De Φ-matrix kan opgesplitst worden in stukken zodat (4-2.12) wordt: (Zie ook figuur 4.3)

$$v\ (nT) = \{\Phi(^{T}/p)^{p}\ B\}^{n}\ v(o) \qquad (4\text{-}2.13)$$



Figuur 4.3 Overzicht van het gebruik van Φ - en B matrix.
Een sample periode is hier opgedeeld in drie gelijke stukken. De "Overall transition" matrix is Φ(T/3) en B=I voor $0<\lambda\leq T$. Voor de overgang op het sample moment, wordt van een andere B matrix gebruik gemaakt.

Zo is dus een manier gevonden om uitgaande van de begintoestand van een systeem, het gedrag van het systeem in de tijd te berekenen.

Bij het bepalen van de elementen van B- en ϕ matrix gaat men ervan uit dat het sample moment slechts oneindig kort duurt.

De elementen $a_{i,j}$ van de $\phi(\lambda)$-matrix kunnen als volgt bepaald worden: Uitschrijven van formule (4-2.9) levert voor het i^{de} element $v_i(\lambda)$ van de vector $\vec{v}(\lambda)$:

$$v_i(\lambda) = a_{i,1}(\lambda)m,(0^+) + a_{i,2}(\lambda)m_2(0^+) + \ldots\ldots\ldots\ldots + a_{i,l}(\lambda)m_l(0^+) + \\ + a_{i,l+1}(\lambda)\,x_1(0^+) + \ldots\ldots\ldots\ldots + a_{i,l+n}(\lambda)x_n(0^+). \qquad (4\text{-}2.14)$$

Als $m_1(0^+) = 1$ en $m_2(0^+) = m_3(0^+) = \ldots\ldots\ldots = m_l(0^+) =$

$$= x_1(0^+) = x_2(0^+) = \ldots\ldots\ldots = x_n(0^+) = 0.$$

Dan is $a_{i,1}(\lambda)$ de eenheidsstap responsie gemeten op toestandsgrootheid v_i als gevolg van de verstoring van m_1. Zo is in het algemeen $a_{i,j}(\lambda)$ de invloed op de i-de component van de vector $\vec{v}$ tengevolge van een eenheidsstapverstoring op $v_j(0^+)$.

Gebruik makend van de beschrijvingswijze in de toestandsruimte kan van het faseregelsysteem een model worden gemaakt.

4-3. Voorbeelden van de toestandsbeschrijving van enkele onderdelen van het regelsysteem.

A/ Correctie spoel

Een correctie spoel kan voorgesteld worden door een tamme integrator en voldoet aan de volgende differentiaal vergelijking:

$$\dot{x}(t) + a\,x(t) = a\,m(t) \qquad (4\text{-}3.1)$$

waarin: $a = 1/\tau$ (statische versterking is 1)
x = uitgangsgrootheid
m = stuursignaal

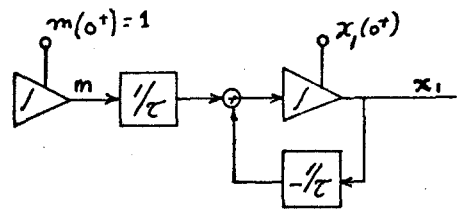
Stel dat het stuursignaal een stap is op $t = 0$, dan is $m(0^+) = 1$.

Laplace transformatie geeft:

$$sX(s) - x(0^+) + \frac{1}{\tau}X(s) = \frac{1}{\tau}M(s) \qquad (4\text{-}3.2)$$

ofwel $\quad X(s) = \dfrac{1/\tau\, M(s)}{s + 1/\tau} + \dfrac{x(0^+)}{s + 1/\tau}$

Als men verondersteld dat $m(t) = 1$. ($M(s) = 1/s$), dan kan het volgende toestandsdiagram van dit systeem gemaakt worden:



Figuur 4.5 Toestandsdiagram van een correctie-spoel.
De ingangsgrootheid m is als toestandsgrootheid voorgesteld.

De elementen van de Φ-matrix worden dan:

$$a_{1,1}(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}\right\} = 1$$

$$a_{1,2}(t) = 0$$

$$a_{2,1}(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1/\tau}{s(s+1/\tau)}\right\} = 1 - e^{-t/\tau}$$

$$a_{2,2}(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s+1/\tau}\right\} = e^{-t/\tau}$$

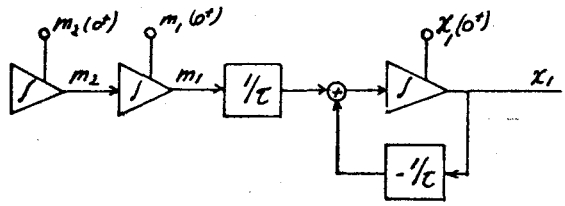
$$\Phi(t) = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1-e^{-t/\tau} & e^{-t/\tau} \end{vmatrix} \qquad (4\text{-}3.4)$$

nu is $v(t) = \Phi(t)\, v(0^+)$.

hieruit volgt dat $\quad m(t) = 1$

en $\quad x(t) = 1 - e^{-t/\tau} + x(0^+)\, e^{-t/\tau}$.

Voor het bepalen van de Φ-matrix is het gemakkelijk om de ingangsgrootheid in het Laplace domein te beschrijven.
Men voegt voor de beschrijving een toestandsgrootheid aan het systeem toe.
In ons geval is de stuurparameter van een correctie spoel een stappenmotor (zuivere integrator dus één toestandsgrootheid).
De als toestandsgrootheid voorgestelde ingangsgrootheid (zie fig. 4.5) kan dan vervangen worden door de nieuwe stuurgrootheid (stappenmotor). De ingangsgrootheid van de stappenmotor moet op haar beurt weer als toestandsgrootheid voorgesteld worden (zie fig. 4.5a).



Figuur 4.5a Toestandsdiagram van correctie spoel met stappenmotor. De ingangsgrootheid(m(t)=1 en M(s)=1/s) van de stappenmotor is weer als toestandsgrootheid weergegeven.

In het regelsysteem zijn drie correctie spoelen opgenomen.
De integratoren zoals gebruikt in figuur 4.5 en 4.6 hebben twee "ingangen": één in het Laplace - en één in het tijddomein.

B/ Tweede orde laagdoorlaatfilter.

Dit kritisch ingestelde filter voldoet aan de volgende differentiaal vergelijking (ref. 5):

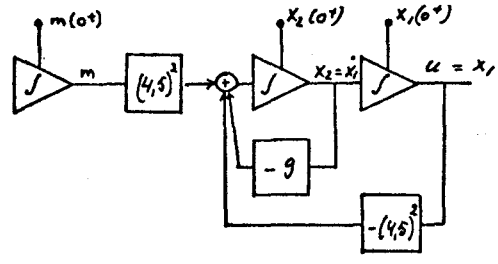
$$\ddot{u}(t) + 9\,\dot{u}(t) + (4,5)^2\,u(t) = m(t) \qquad (4\text{-}3.1)$$

stel $u(t) = x_1$ dan is:

$$\dot{u}(t) = \dot{x}_1 = x_2$$

$$\ddot{u}(t) = \dot{x}_2 = (4,5)^2 m - (4,5)^2 x_1 - 9\, x_2$$

en $$\vec{v}(t) = \begin{vmatrix} m(t) \\ x_1(t) \\ x_2(t) \end{vmatrix}$$

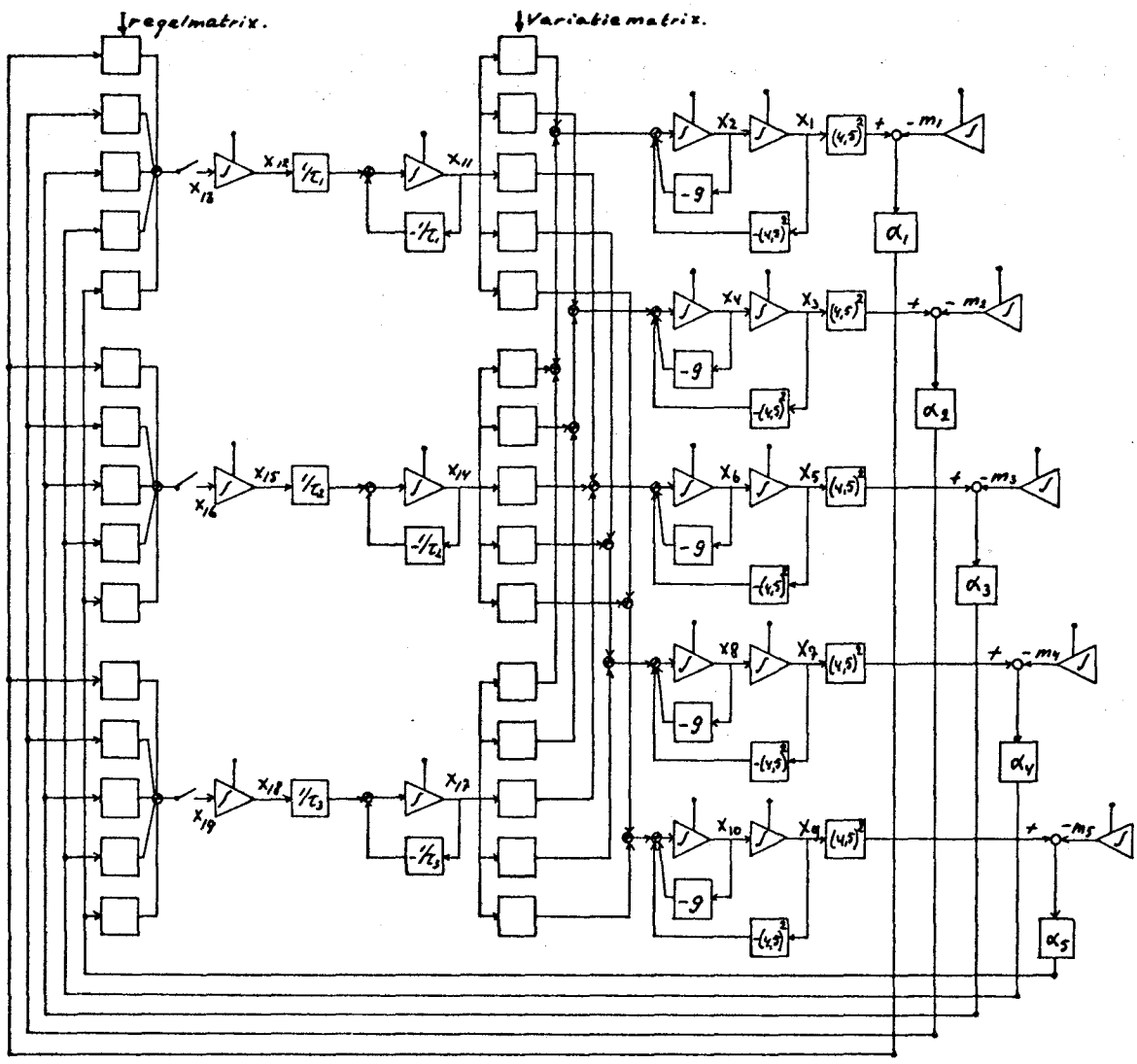


Figuur 4.6 Toestandsdiagram behorend bij het tweede orde laagdoorlaatfilter. De ingangsgrootheid is ook als toestandsgrootheid weergegeven, in het totaal schema wordt deze vervangen door de uitgang van de correctie spoel.

Er zijn bovendien vijf meetkanalen dus komt bovenstaand schema vijfmaal voor in het totaal schema van de faseregeling.

Het toestandsdiagram van de totale faseregeling is gegeven in figuur 4.7.

Uit het schema (fig. 4.7), kunnen de elementen van de "State Transition" en "Overall Transition" matrix bepaald worden. In het totaal zijn er 24 toestandsgrootheden. Door een iets andere voorstelling van de stappenmotor, kan met 21 toestandsgrootheden volstaan worden.
Het computerprogramma is ingeschreven in FORTRAN en heeft de naam TOU 4.
Van de elementen van de B - en de Φ matrix is in Appendix C een opsomming gegeven.



Figuur 4.7. Toestandsdiagram voor de totale faseregeling met drie correctiespoelen en vijf gemeten fases.
$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = -1$ (terugkoppeling).
Door variatie van α_i kan de stabiliteit van het regelsysteem bestudeerd worden.

4-4. Enkele rekenresultaten.

In hoofdstuk 3 pagina 16 is een variatie-matrix, zoals gemeten bij een cyclotron ingesteld voor 20 MeV protonen gegeven. Op dezelfde pagina staat de berekende regelmatrix R.

Bij de meeste berekeningen aan het model is gebruik gemaakt van deze variatiematrix (in het computerprogramma heet deze matrix de T-matrix. Zie Appendix C) en van de regelmatrix (R). De tijdconstanten liggen in de orde grootte van seconden. (ref. 11). Voor de tijdconstanten van de correctie spoelen is gerekend met de volgende waarden:

$$\tau_{B_4} = 1. \text{ sec.}$$
$$\tau_{B_6} = 2. \text{ sec.}$$
$$\tau_{B_{10}} = 3. \text{ sec.}$$

Interessante sampletijden zijn tijden in dezelfde orde grootte als de tijdconstanten in het systeem.

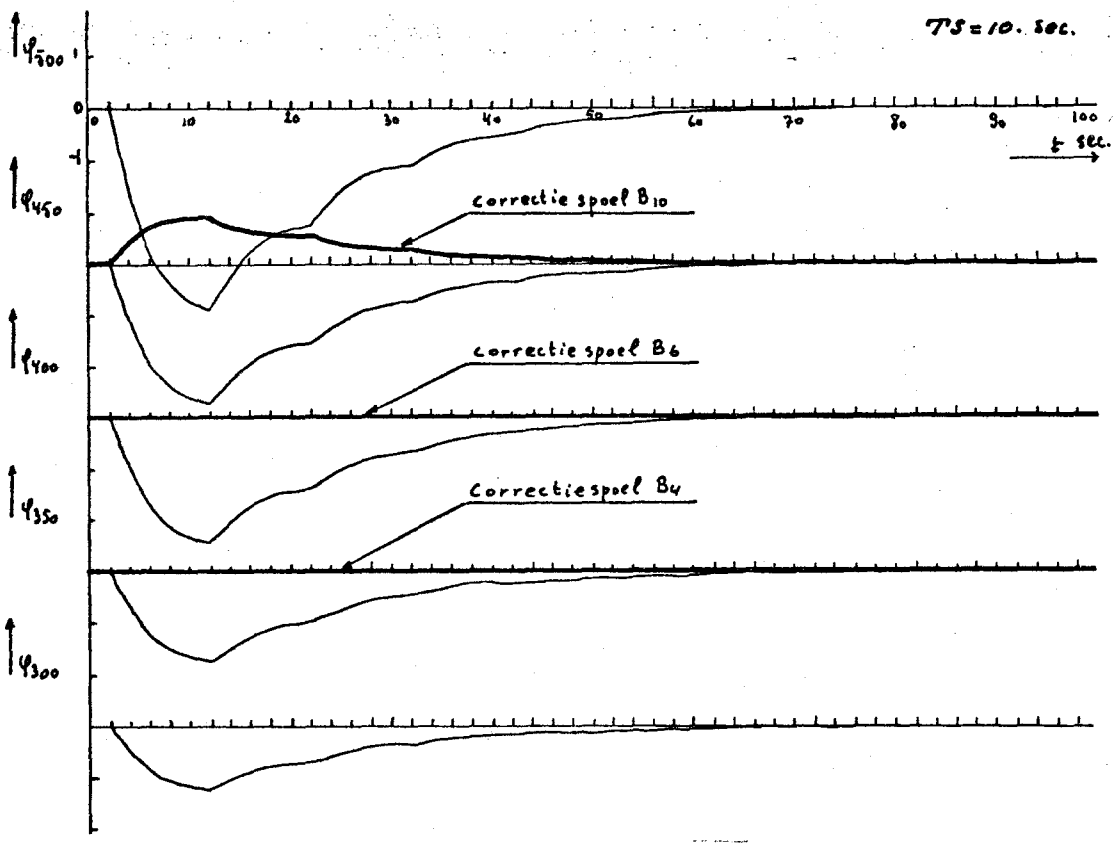
<u>Er zijn twee soorten berekeningen verricht:</u>

1) Berekeningen die de stabiliteit van het regelsysteem nagaan.
2) Berekeningen die nagaan in welke mate een gewenst faseverloop bereikt kan worden.

ad1) <u>Berekeningen die de stabiliteit van het regelsysteem nagaan.</u>

Gekeken is naar de invloed op de stabiliteit van:
i) De rondgaande versterking.
ii) De sampletijd (TS)

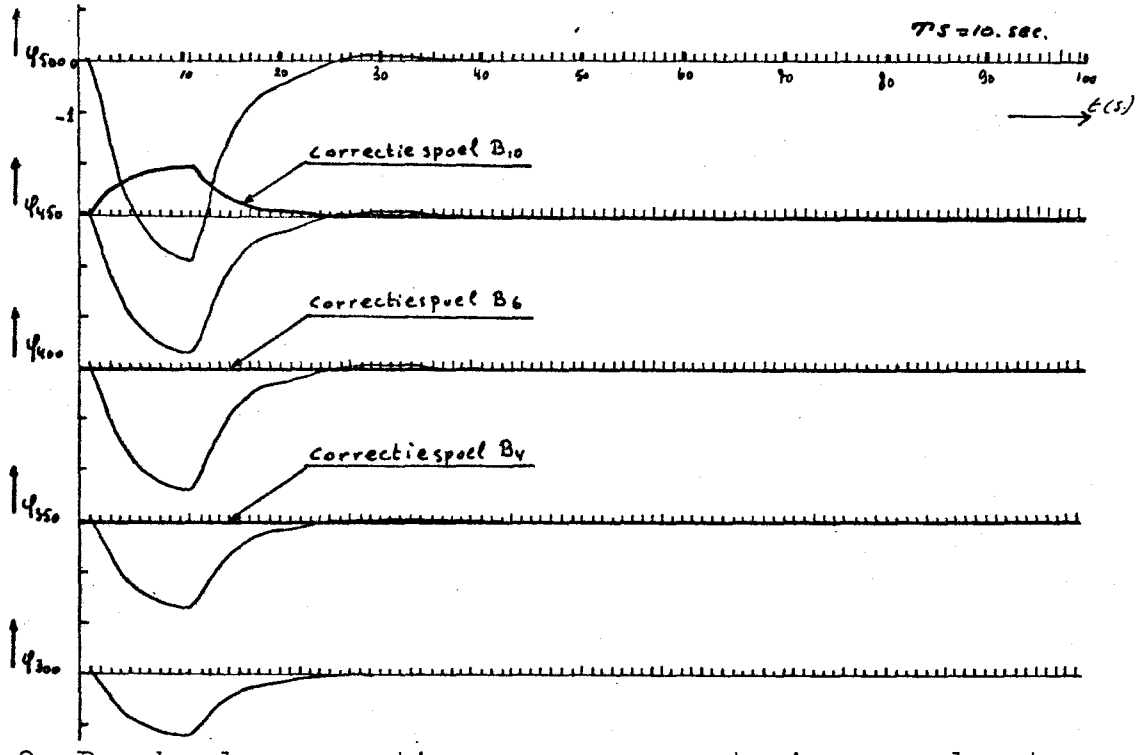
i) Hierbij gaat het om de vraag hoeveel de verbanden tussen magneetveld en fase (form 3-2.1) mogen afwijken van de elementen van de variatiematrix, waaruit de regelmatrix R berekend is. Dit alles voor een cyclotron dat ingesteld is voor een bepaalde energie. Om dit na te gaan kan men in het model de rondgaande versterkingsfactor veranderen.(α_1, α_2, α_3, α_4, α_5)
Fig.(4.8), (4.9) en (4.10) laten zien hoe de regeling een verstoring corrigeert van de stuurparameter van B_{10}.
De terugkoppel factoren zijn resp. $\alpha_i = -1/2$, $\alpha_i = -1$ en $\alpha_i = -2$. Bij $\alpha_i = -2.5$ is het systeem instabiel. i= 1,2....,5.
De sampletijd is 10 sec. (groter dan 3x de grootste tijd-constante



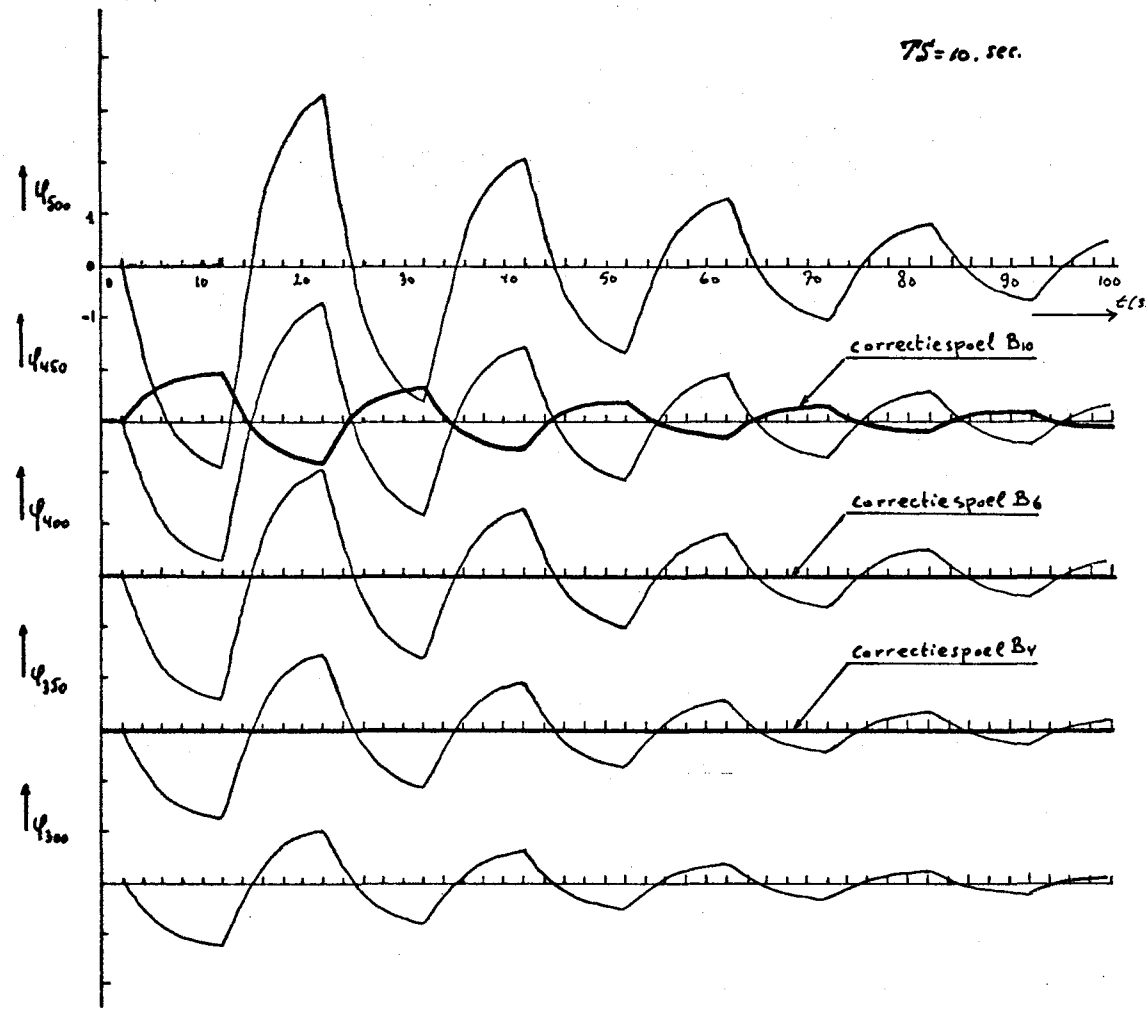
Figuur 4.8. Berekende correctie voor een verstoring van de stuurparameter van (B_{10}), bij een terugkoppelfactor $\alpha_i = -1/2$

Er zijn meerdere iteraties nodig om de eindwaarde te bereiken, maar het systeem blijft stabiel. Dat geldt voor alle α_i waarvoor $-1 < \alpha_i < 0$. TS = 10. sec.

De schaal langs de verticale as is arbitrair.



Figuur 4.9. Berekende correctie voor een verstoring van de stuurparameter van B_{10}, bij een terugkoppelfactor $\alpha_i = -1$. TS = 10 sec. De schaal langs de verticale as is arbitrair.

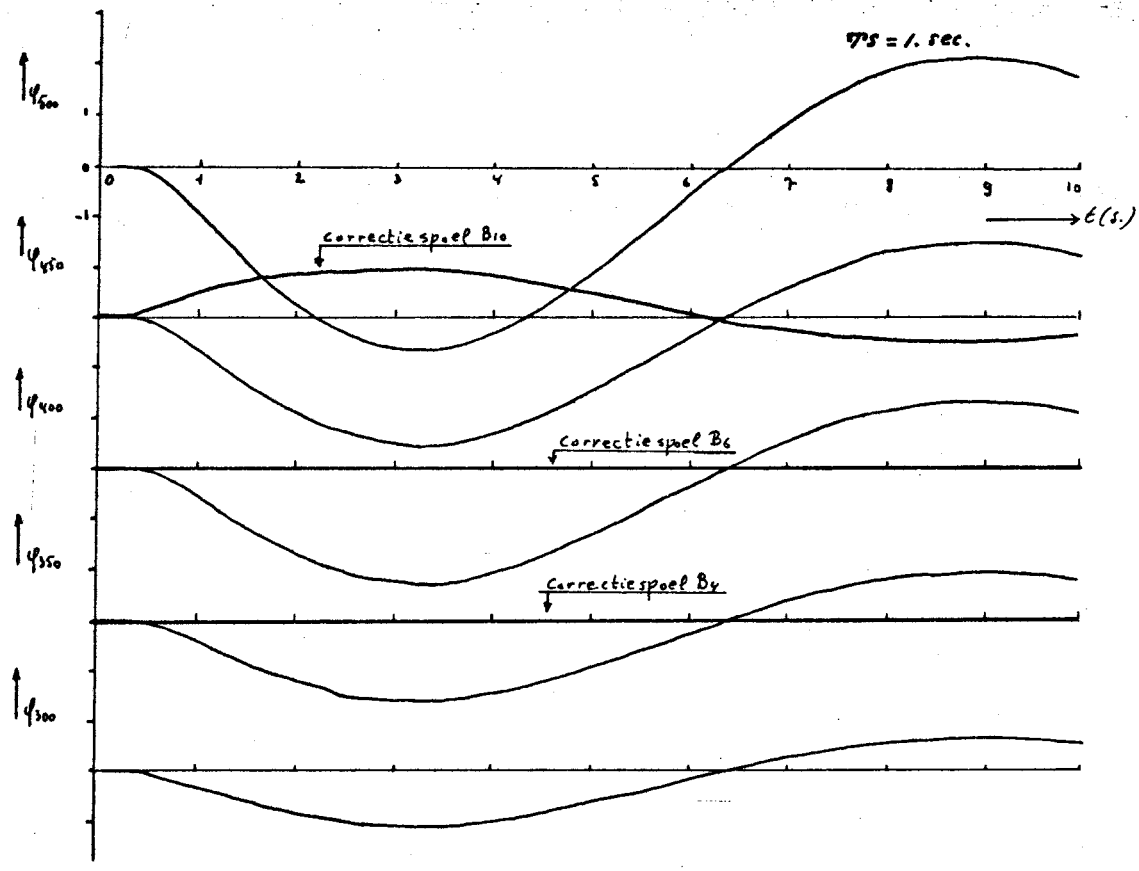


Figuur 4.10. Berekende correctie voor een verstoring van de stuurparameter van B_{10}, bij een terugkoppelfactor $\alpha_i = -2$. 10.sec. De schaal langs de verticale as is arbitrair.

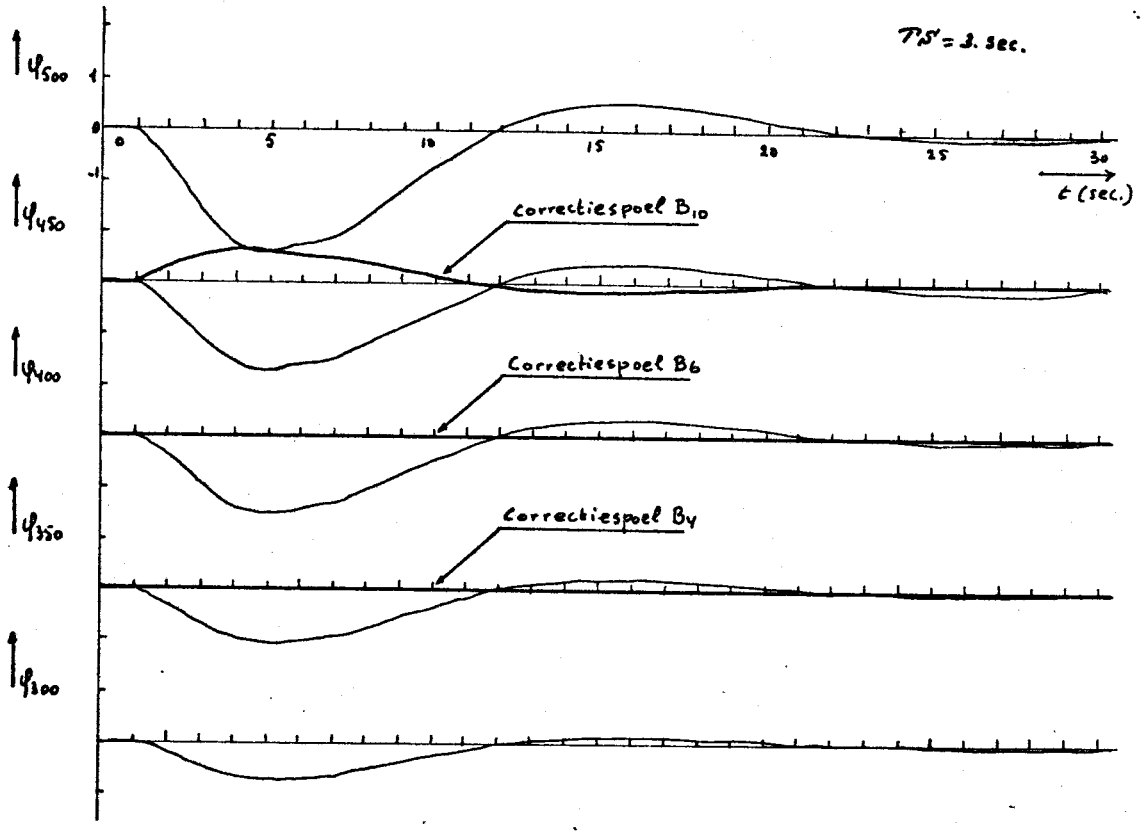
ii) De invloed van de sampletijd.

Bij deze berekeningen is de terugkoppelfactor $\alpha_i = -1$ genomen. In figuur 4.9. kan men zien dat voor grote sampletijden het systeem in een iteratie de verstoring corrigeert.

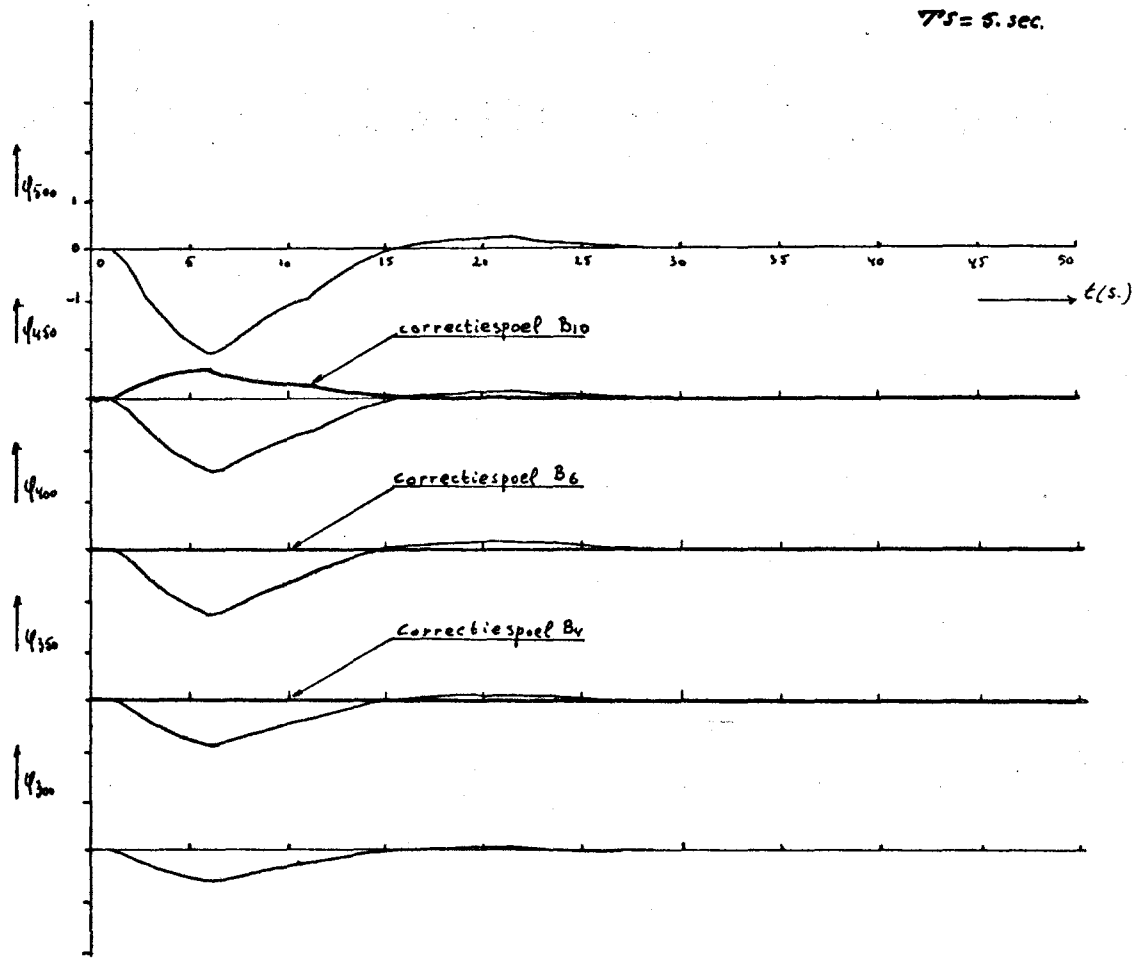
Voor kleinere sampletijden wordt het gedrag van het systeem oscillatorisch. In figuur (4.11), (4.12), (4.13) zijn de sampletijden resp.1.sec., 3.sec.en 5.sec..



Figuur 4.11. Berekende correctie voor een verstoring van de stuurparameter van B_{10}, bij een terugkoppelfactor $\alpha_i = -1$. TS = 1.sec. De schaal langs de verticale as is arbitrair



Figuur 4.12. Berekende correcties voor een verstoring van de stuurparameter van B_{10}, bij een terugkoppelingsfactor $\alpha_i = -1$. TS = 3.sec.
De schaal langs de verticale as is arbitrair.



Figuur 4.13. Berekende correctie voor een verstoring van de stuurparameter van B_{10}, bij een terugkoppelfactor $\alpha_i = -1$. TS = 5.sec. De schaal langs de verticale as is arbitrair

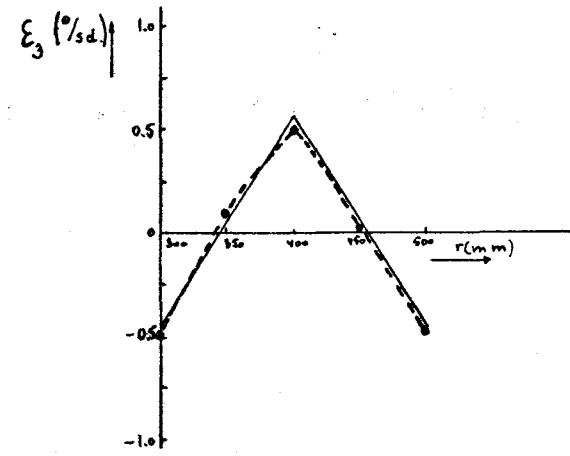
ad 2) Berekeningen die nagaan in welke mate een gewenst faseverloop bereikt kan worden.

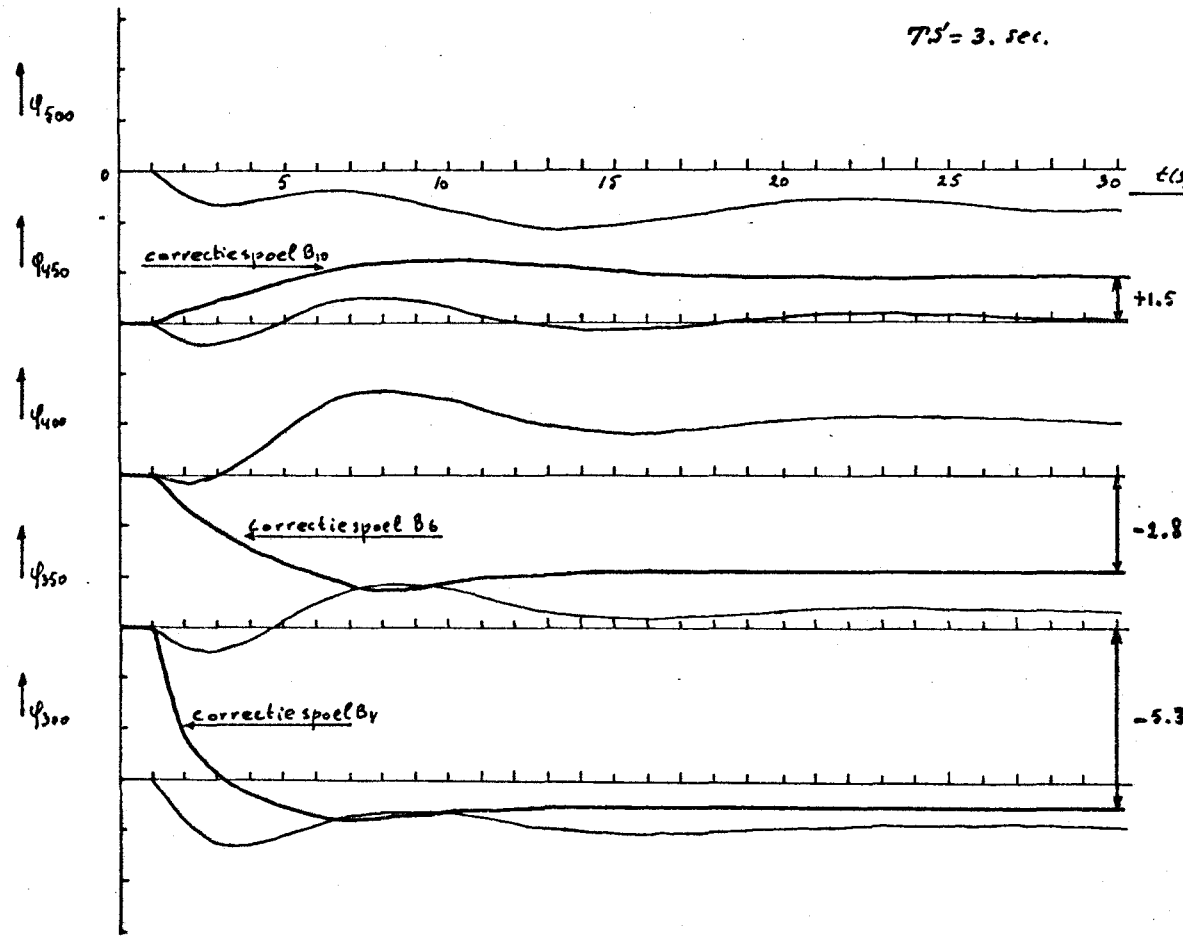
Met deze berekeningen zijn coëfficiënten uit (3-2.9) bepaald.
Figuur 4.14. Geeft het resultaat voor ε_3.
De resultaten voor ε_1 en ε_2 zijn in Appendix C gegeven.

$$\vec{\varepsilon}_3' = -5.3\frac{\partial\varphi_k}{\partial B_4} - 2.8\frac{\partial\varphi_k}{\partial B_6} + 1.5\frac{\partial\varphi_k}{\partial B_{10}}$$

——— gewenste faseverloop.

- - - - - - - bereikte resultaat na 10 sample periodes.





Figuur 4.14. Regeling naar een gewenst faseverloop. De schaal langs de φ_i -as is arbitrair.
In de inzet boven in de figuur staat het gewenste faseverloop aangegeven, ook het na 10 sampleperiodes bereikte resultaat is in de inzet getekend.

5 Metingen.

Meetresultaten

De metingen hebben zich in eerste instantie beperkt tot contrôle-metingen:

1) Meting van de reproduceerbaarheid van variatie-en regelmatrix.
2) Meting om de stabiliteit van de regeling na te gaan.

Oorspronkelijk waren slechts twee regelparameters beschikbaar (twee stappenmotoren die B_6 en B_{10} sturen). Vandaar zijn een aantal metingen slechts met twee parameters uitgevoerd.

Verder zijn metingen uitgevoerd (met drie stuurparameters één voor B_4 ; één voor B_6 en één voor B_{10}) van de faseregeling gecombineerd met een meting van het energiespectrum.

Een experimenteel bepaalde variatie-matrix.
(Bij een cyclotron ingesteld voor 20 MeV protonen).

$$\begin{vmatrix} \varphi_{250} \\ \varphi_{350} \\ \varphi_{400} \\ \varphi_{450} \\ \varphi_{500} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -0.493 & -0.549 \\ -0.991 & -1.164 \\ -1.193 & -1.585 \\ -1.075 & -1.804 \\ -1.117 & -2.425 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} B_6 \\ B_{10} \end{vmatrix}$$

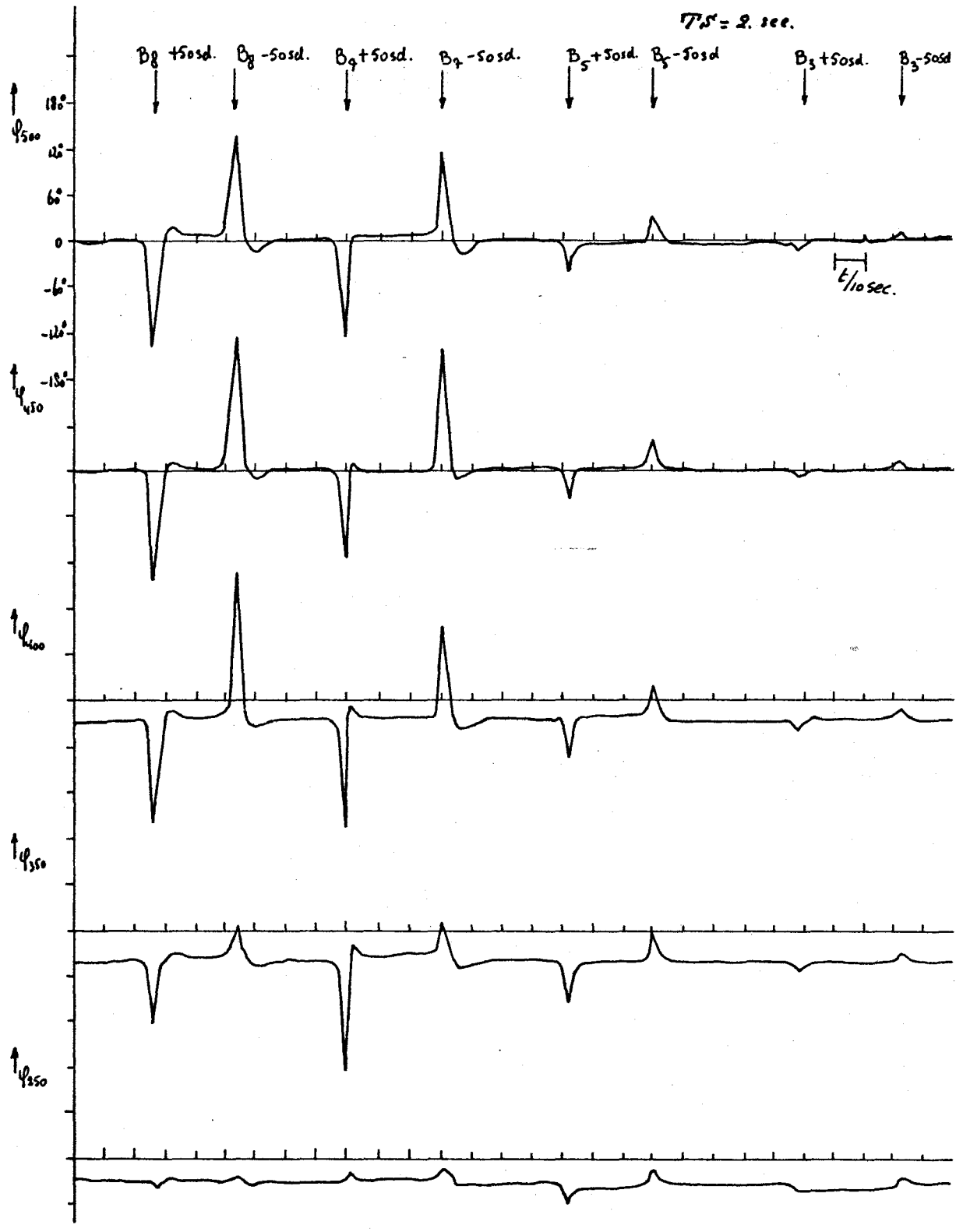
Vergelijk de eerste kolom uit deze variatie-matrix met de tweede kolom uit die op pag.16, en de tweede uit deze met de derde uit die op pag.16, deze laatste twee moeten ongeveer een factor twee verschille

De bijbehorende regelmatrix is:

$$R = \begin{vmatrix} -0.575 & -1.032 & -0.856 & 0.018 & 1.172 \\ 0.305 & 0.530 & 0.393 & -0.146 & -0.884 \end{vmatrix}$$

Het interne faseverloop $\varphi_2(r)$ was gemeten als:

$$\varphi_{250} = -30.26$$
$$\varphi_{350} = -40.40$$
$$\varphi_{400} = -25.14$$
$$\varphi_{450} = 2.58$$
$$\varphi_{500} = 0.00$$



Figuur 5.1. Faseregeling in werking. De sampletijd is 2 seconden. De verstoringen aan de parameters staan gegeven in schaaldelen.
Regelparameters zijn B_6 en B_{10}.

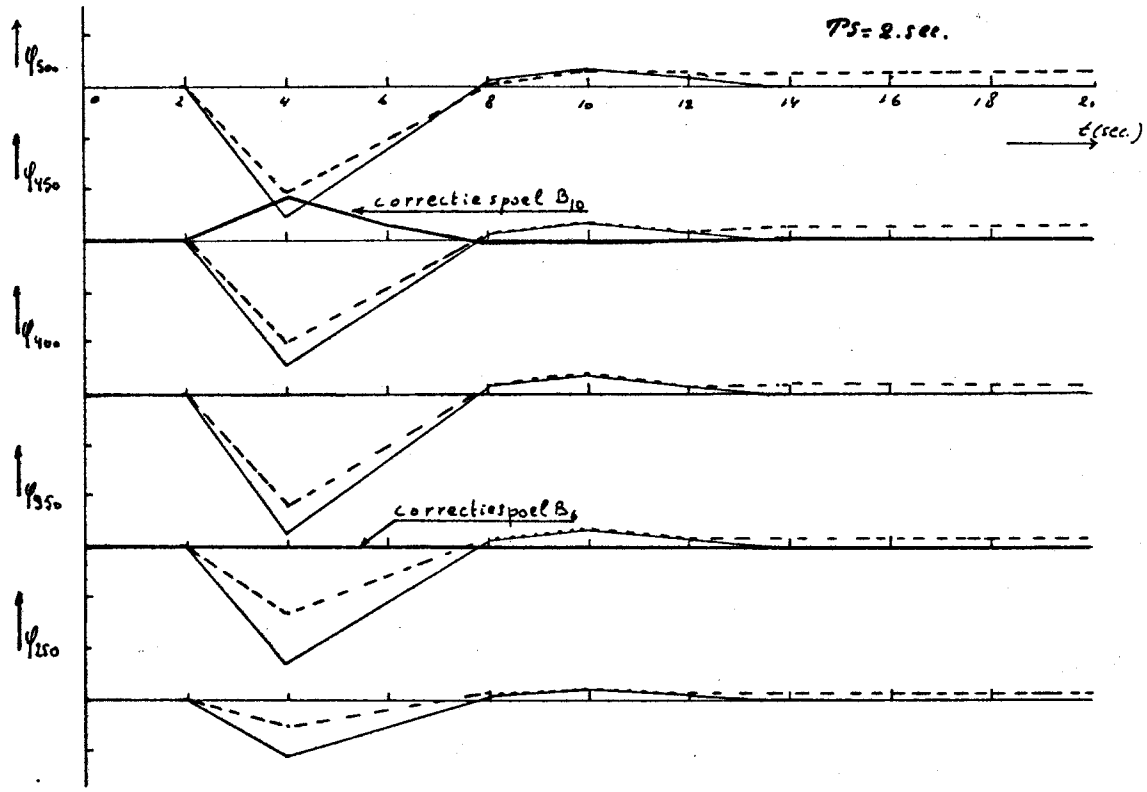
Er zijn verstoringen van + 50 sd. resp. - 50 sd. aangebracht aan achtereenvolgens: B_8; B_7; B_5; B_3.

In figuur 5.1. zijn de gemeten resultaten te zien. Verstoringen van de stuurparameters van B_{10} en B_6 worden, zoals het behoord, door de regeling met alleen B_{10} resp. B_6 gecorrigeerd.

Conclusie: <u>De correcties worden uitgevoerd.</u>

In figuur 5.2. wordt een meting met een berekening vergeleken. Kleine afwijkingen tussen model en werkelijkheid kunnen drie oorzaken hebben:

a) De aangenomen lineariteit ($B \rightarrow \varphi$) gaat in werkelijkheid niet helemaal op, zeker niet voor verstoringen van 50 sd.
b) De matrix-elementen kunnen verschillen van die waaruit de regelmatrix berekend is.
c) De tijdconstanten van de correctie-spoelen zijn slechts in orde grootte goed gekozen.

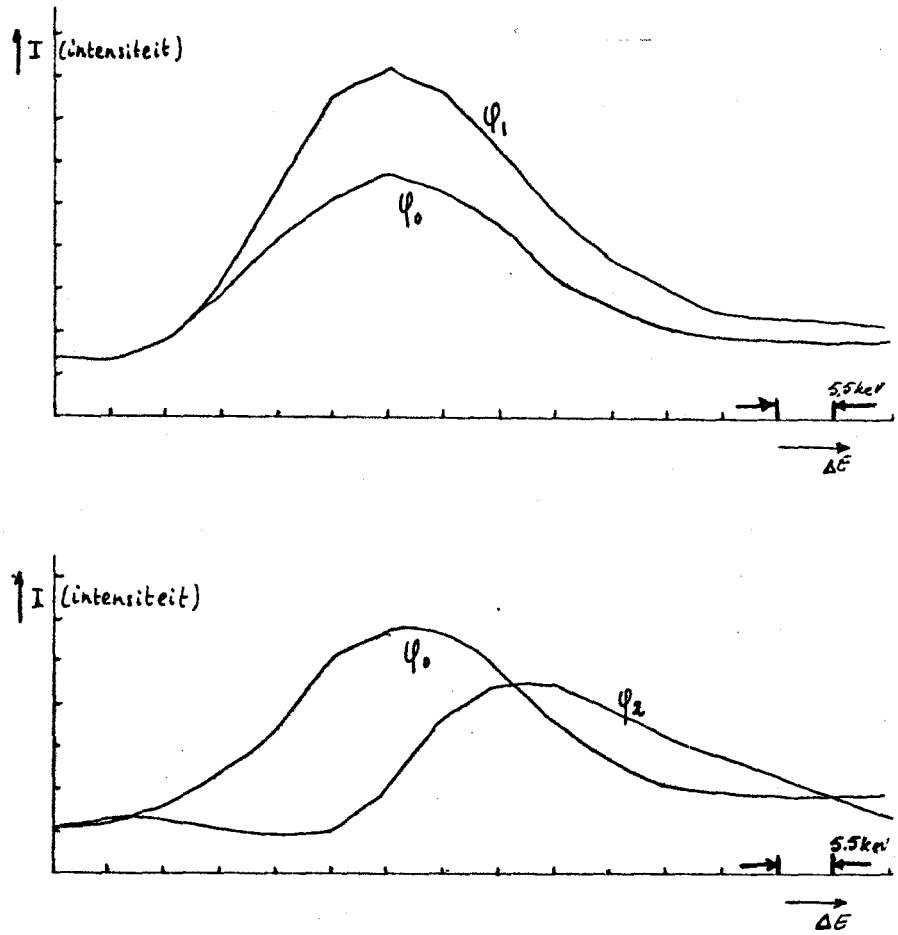


<u>Figuur 5.2.</u> Vergelijking van faseregelmodel met een meting, bij een verstoring van de stuurparameter van B_{10}.
——————— berekend.
- - - - - - - - - - gemeten.

De gecombineerde meting van de faseregeling met het energie-analysesysteem.

De faseregeling wordt hier gebruikt bij een ander experiment, nl. voor de bepaling van het energiespectrum van de externe bundel. De energiespreiding is gemeten bij drie verschillende faseverlopen. φ_0 is een faseverloop in het cyclotron ingesteld voor 20 MeV protonen. φ_1 en φ_2 geven de afwijkingen t.o.v. φ_0. In figuur 5.3. is het resultaat gegeven.
De fase van de bundel bij het verlaten van het cyclotron is van belang voor de energie van de externe bundel.

$$\vec{\varphi}_1 = \vec{\varphi}_0 + (20^\circ, 15^\circ, 10^\circ, 5^\circ, 0^\circ)$$
$$\vec{\varphi}_2 = \vec{\varphi}_0 + (0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ)$$



Figuur 5.3. Energiespreiding geëxtraheerde bundel als functie van de fase in het cyclotron.
Verandering van de fase op de buitenste straal (+20°) heeft invloed op de ligging van de top.

REFERENTIES.

1. F. Schutte — On the beam control of an isochronous cyclotron. Proefschrift T.H.E. 1973.

2. H.L. Hagedoorn and N.F. Verster — Orbits in an A.V.F. cyclotron. Nucl.Instr;and meth. 18-19 (1962) 201

3. J.F.P. Marchand ea. — Suppression of odd harmonic components in a cyclotron beam pick-up signal by means of sampling. Geaccepteerd voor publikatie in Rev. Sci. Instr.

4. J.F.P. Marchand — Ontwikkeling van een apparaat voor het niet destructief meten van de fase en amplitude van de interne bundel in het Eindhovense A.V.F. cyclotron. Intern rapport Nk (103).

5. F.L.J. Sangster — Het "emmertjesgeheugen", een schuifregister voor analoge signalen. Philips Tech. Tijdschrift 31.4 (1970) 97-118.

6. R.H.M. Reumers — Fasemeting en -ijking van de ionenbundel in het Eindhovens A.V.F. cyclotron. Intern rapport Nk (186).

7. G.C.L. v.Heusden — Afstudeerverslag, intern rapport Nk (089).

8. G.C.L. v.Heusden — Bundeldiagnostiek en automatisering van het Eindhovens A.V.F. cyclotron. N.T.v.N. 40 (1974) 145-157.

9. p.c. H.L. Hagedoorn — Herfstschool, Berlijn.

10. J. Tou — Modern Control Theorie Mc-Graw-Hill Book Co., New York (1964).

11. P. Backer — Theoretische en experimentele bepaling van een aantal cyclotron parameters. Intern rapport Nk. (054).

Appendix A

Het zes-kanaals analoge schuifregister

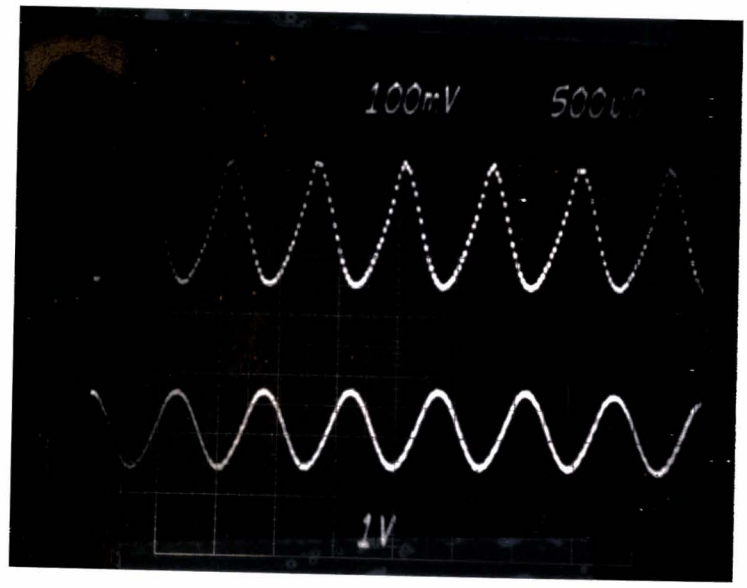
Kabellengte verschillen en verschillen in de versterkers van de afzonderlijke meetkanalen van het fase-meetsysteem, maakten een faseverschuiver per meetkanaal noodzakelijk.

Deze regelbare vertragingslijn, die frequentie en amplitude onafhankelijk moet werken, is uitgevoerd met analoge schuifregisters (zgn. emmertjes-geheugen, type M31, Philips).
Het emmertjes-geheugen is een schuifregister waarvan de cellen bestaan uit een transistor en een geheugen condensator. De bemonsterde signaalwaarden zijn als ladingen opgeslagen in de condensatoren en de transistoren verzorgen op bevel van schuifpulsen het doorschuiven van deze informatie. Dit gebeurt door lading te verplaatsen in de richting tegengesteld aan de voortplantingsrichting van het signaal.

Gebruikt als vertragingslijn kan een signaal met bandbreedte B een tijd T vertraagd worden door een emmertjes-geheugen met $N=4BT$ cellen.

Een voordeel is dat dezelfde schakeling voor grote en kleine bandbreedte bruikbaar is en dat de vertragingstijd continu kan worden gevarieerd met de schuiffrequentie.
Een emmertjes-geheugen van het type M31 bevat 32 cellen.
Terwille van de nauwkeurigheid wordt met hogere schuiffrequenties gewerkt. (tussen 50-125 kHz).

Figuur A-1



Referentie signaal

In fase verschoven referentie signaal

De stabiliteit is beter dan 0.5°.Bij een signaalfrequentie van 1 kHz is de faseverschuiving per kanaal 75° en voor het referentie kanaal het drievoudige (225°).Figuur A-1 geeft het referentie signaal en het verschoven en versterkte referentie signaal.

Ontwerp en uitvoering van het zes-kanaals analoge schuifregister

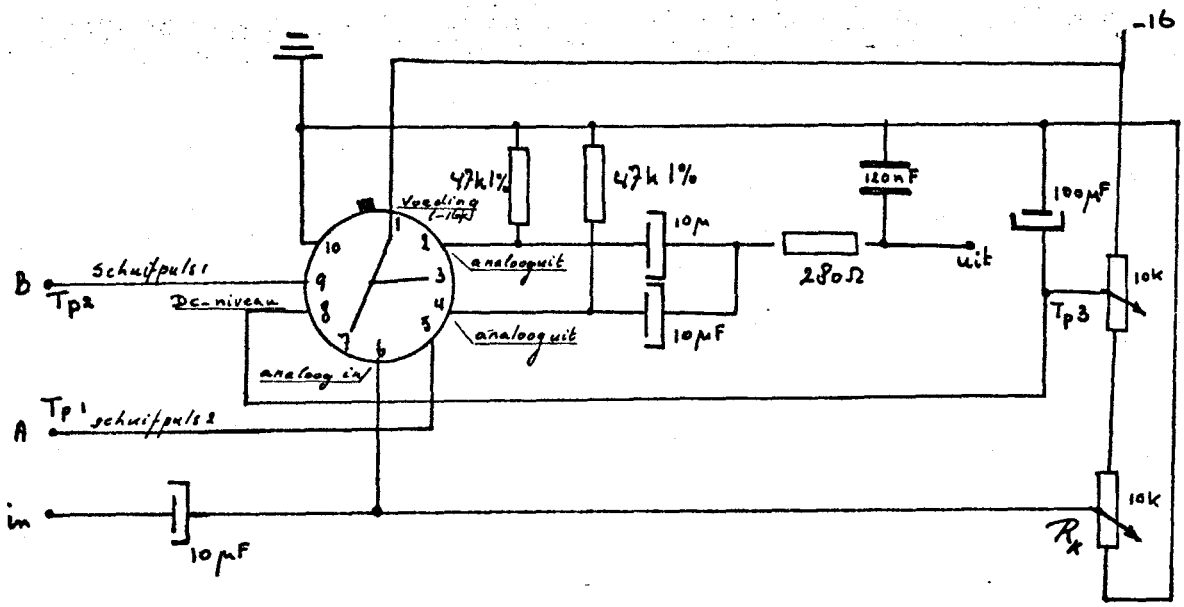
Het schuifregister is gebouwdvoor gebruik in een N.I.M.-rek. Er wordt dan ook gebruik gemaakt van de spanningen +24volt,0,-6, -12 en -24volt.Er is gebruik gemaakt van twee printplaten,één met drie kanalen voor bundelsignalen (een emmertjes-geheugen per kanaal) en staat geregistreerd onder het nummer NDE 72, en één voor de andere drie kanalen waarvan twee voor bundelsignalen en één voor het referentie-signaal.(versnelspanning) (NDE 72A). Het kanaalvoor het referentie-signaal bevat drie emmertjes-geheugens. Op pag.A6 en A7 staan resp. een copie van NDE 72A en van de bijbehorende componenten-zijde.

Figuur A-2 geeft de schakeling waarin het emmertjes- geheugen is ingebouwd, zonder de hulpschakeling zoals voeding, oscillatoren en versterkers.

Figuur A-3 geeft het schema van de oscillator die per kanaal de schuiffrequentie verzorgt.De frequentie wordt ingesteld m.b.v. de potentiometer R_k(10 turns - 20k) die op het front van de faseverschuiver is ingebouwd. Het frequentie-bereik is ongeveer 50kHz. (tussen de 50 en 125kHz.)
Met behulp van trimpotentiometer R_1 (zie fig. A-3, en fig. A-8) kunnen de diverse kanalen op elkaar geijkt worden (d.w.z. dezelfde faseverschuiving bij de zelfde potentiometer-stand op het voorfront=R_k).

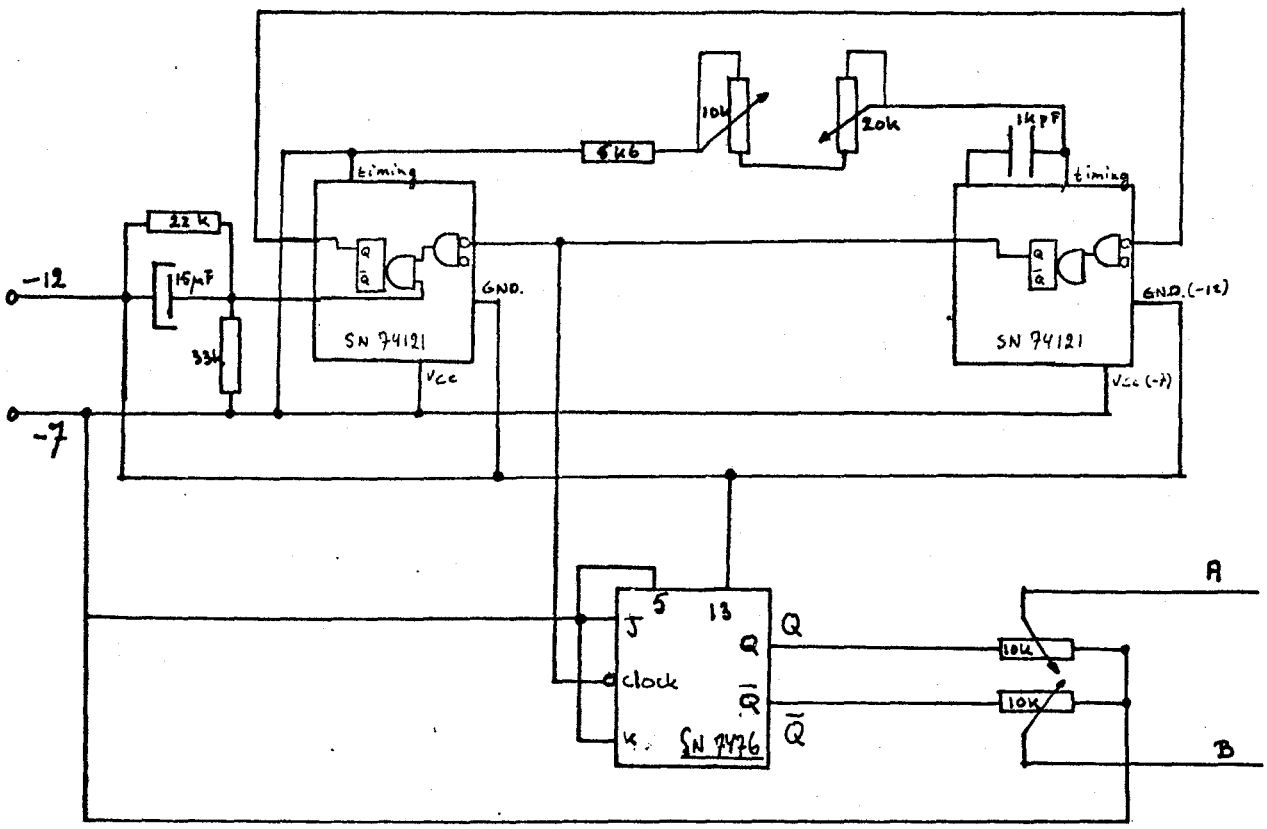
Figuur A-4 laat zien hoe de spanningen moeten zijn op de testpunten T_p1, T_p2, T_p3 ; deze testpunten T_p zijn aangegeven in figuur A-8. De signalen A(T_p1) en B(T_p2) zijn de schuifspanningen. De spanning op T_p3 is in het algemeen 1 volt kleiner dan de schuifspanning en kan worden ingesteld met trimpotentiometer R_1.(zie fig. A-8)

Figuur A-5 geeft de versterkerschakeling (A741). De voedingsspanningen hiervoor zijn afkomstig uit de + en - 24 volt door serieschakeling van een 8 volts zener-diode.



Figuur A-2

Emmertjesgeheugen(M31) ingebouwd in schakkeling.
Trimpotentiometer R_k zit in het voorpaneel. (out. adj.), zijn stand wordt bepaald door vergelijking van input met output.

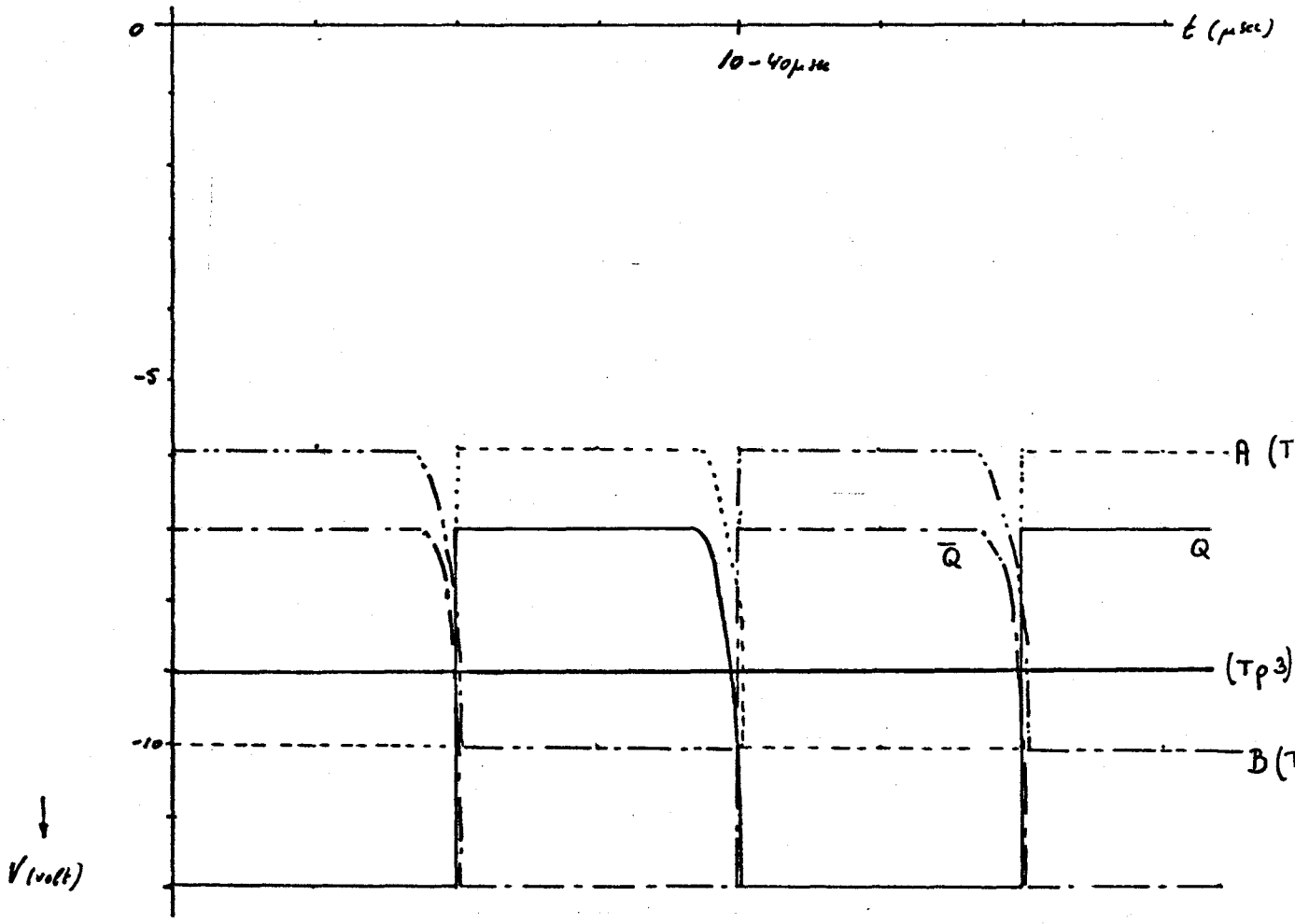


Figuur A-3

Oscillator: frequentie bereik 50-125 kHz.

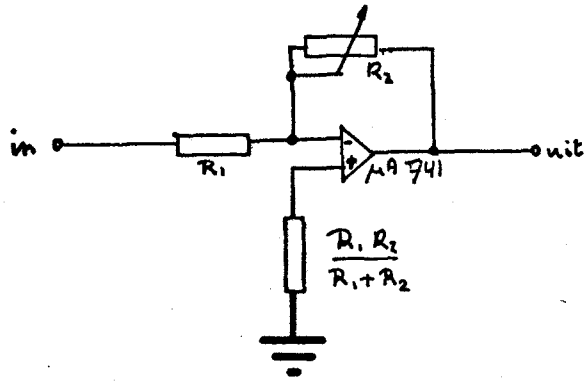
De voor de T.T.L.-electronica gebruikte voedingsspanningen zijn -7 en -12 volt, dan kunnen de schuifspanningen door spanningsdeling(R_3, R_4) verkregen worden.

Figuur A-6 geeft het schema van de T.T.L.voeding.



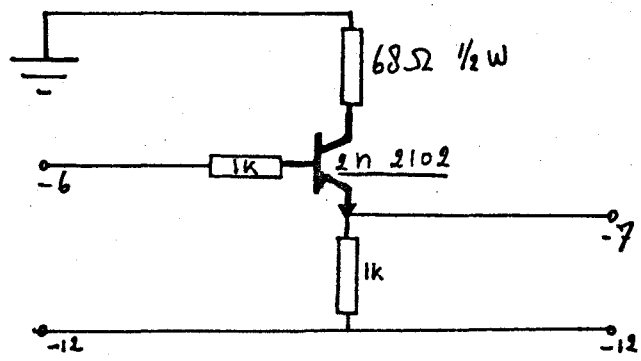
Figuur A-4

Spanningen zoals ze op de testpunten (T_p) moeten uitzien.



Figuur A-5

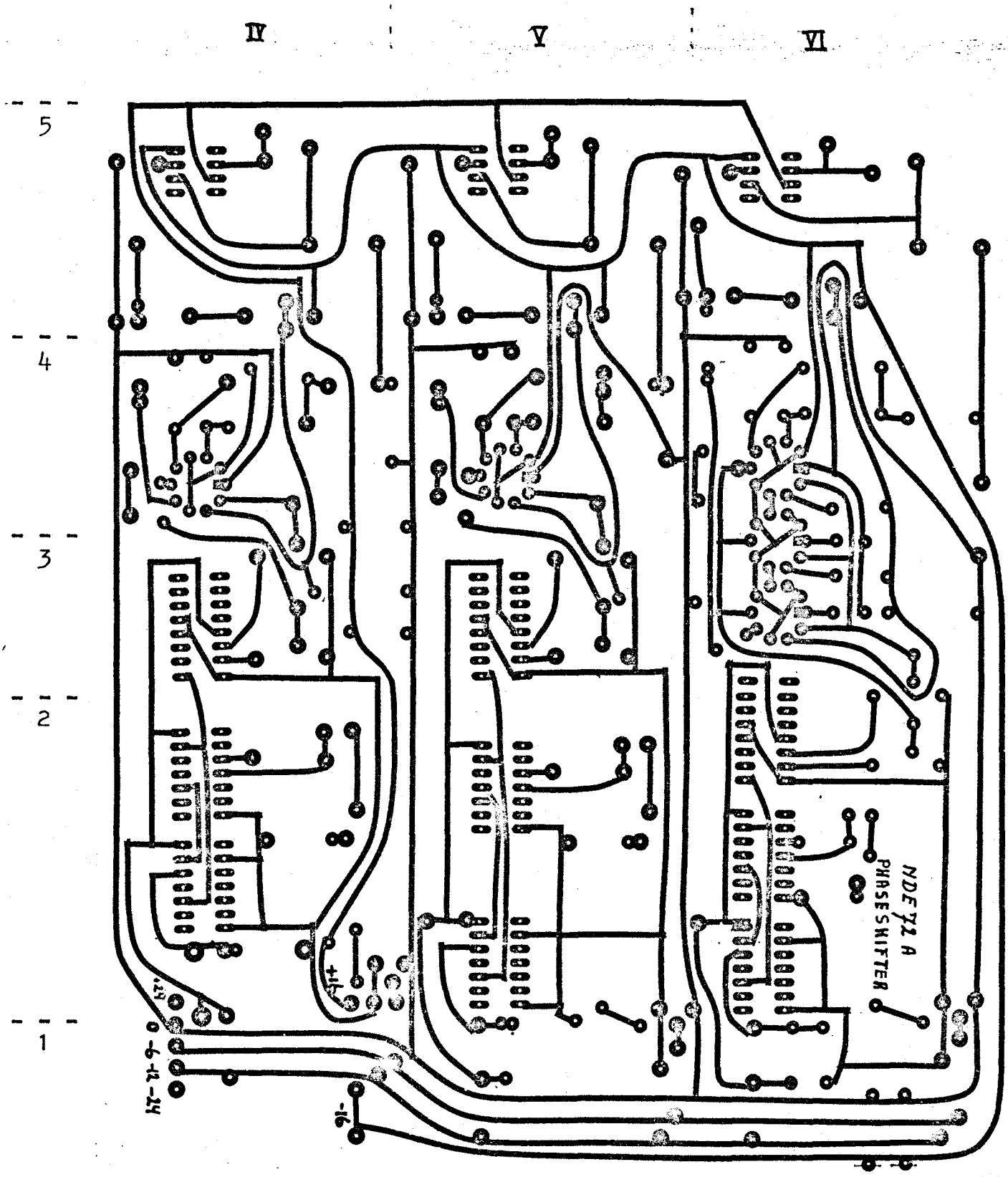
Inverting amplifier (versterkingsfactor 40).



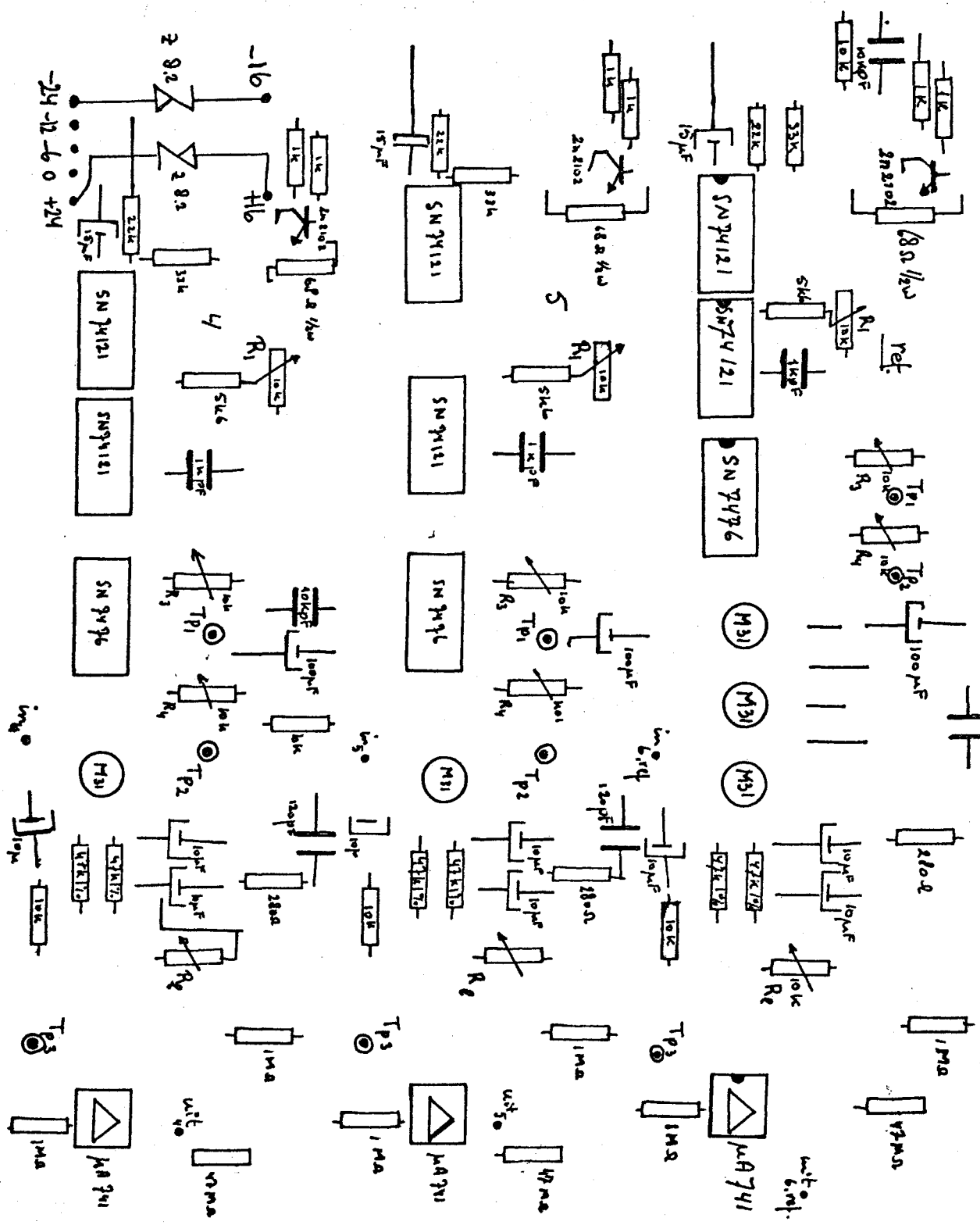
Figuur A-6
T.T.L. Voeding (-7 en -12 volt).

Afregelen bij ingebruikname

Stel het gewenste frequentie-bereik in met behulp van R_1. Maak de signalen op T_p1 en T_p2 gelijk aan die in figuur A-4, doe dit met de trimpotentiometers R_3 en R_4. Maak met de spanning op T_p3 1 volt kleiner dan op T_p1 en T_p2, (met behulp van R_1). Zet vervolgens een bekend signaal op de ingang en vergelijk het in fase verschoven signaal met dat ingangssignaal. Trim het verschil bij met de potentiometer R_k op het voorfront (output adj.). De faseverschuiver is nu klaar voor gebruik.



Figuur A-7 Drie kanalen van het analoge schuifregister.
van links naar rechts: kanaal 4, kanaal 5 en het referentie-kanaal
van beneden naar boven: 1. voedingsgedeelte
2. oscillator
3. j-k flip-flop
4. emmertjes-geheugen
5. versterker



Figuur A-8 Componentenzijde behorende bij de print uit fig. A-7. Aangegeven zijn de voor het afregelen noodzakelijke testpunten en trimpotentiometers.
De printplaat die de andere drie kanalen bevat is identiek aan kanaal 1 en 2.

Appendix B.

Opdrachten te gebruiken bij het meten en regelen van de fase (FASE).

MSRE (measure)

FASE MSRE PI:

Bij deze opdracht worden de fase en de intensiteit van de sonde-signalen op 5 stralen gemeten en uitgetikt op de Decwriter.

FASE MSRE POS:

In dit geval worden de fase en de intensiteit van de sonde-signalen van de sondes op 3 verschillende stralen en van de 2 positie-sondes gemeten. Uit de laatste 2 signalen berekend de computer de positie van de bundel in de positie-sondes. De resultaten (fase, intensiteit en positie) worden uitgetikt op de Decwriter.

FASE MSRE BIAS:

Voor elke meetcyclus moet een BIAS-meting gedaan worden. De ionenbron in het cyclotron is hierbij uitgeschakeld. Het BIAS-niveau wordt veroorzaakt door DC-offsets in versterkers, vermenigvuldigers en stoorsignalen in de signalen van de sondes.

FASE MSRE KKWM:

Bij deze opdracht wordt de fase en de intensiteit van de sonde-signalen op 5 stralen gemeten. De computer berekend hieruit de som van de kwadraten van het verschil tussen gewenste-en gemeten fases. Het resultaat wordt op de Decwriter gegeven.

TASK

FASE TASK 1:

Bij deze taak wordt automatisch een drie-dimensionale tekening van de kleinste kwadratensom als functie van 2 parameters gemaakt op het grafisch beeldscherm. De metingen geschieden automatisch.

FASE TASK 2:

Bij deze opdracht worden de elementen van de variatiematrix automatisch bepaald. Uit deze gemeten elementen wordt de regelmatrix (kleinste kwadraten regelmatrix) berekend. Op de Decwriter wordt het resultaat gegeven. Deze matrix wordt gebruikt bij de faseregeling van het cyclotron.

FASE TASK 3:

Bij deze taak worden fase, intensiteit en positie van de bundel automatisch gemeten als functie van een parameter. Het resultaat is op het grafisch beeldscherm te zien.

FASE TASK 4:

Bij deze taak worden fase en intensiteit van de sondesignalen op 5 stralen gemeten als functie van een parameter.

FASE TASK 5:

Bij deze taak wordt de regelactie gestart. Het resultaat wordt gegeven op de Decwriter. Het aantal regelacties is beperkt door de vrije geheugenruimte in de PDP - 9.

FASE TASK 6:

Deze opdracht start een ongelimiteerd aantal regelacties, er worden geen tussenresultaten uitgetikt of getekend. Deze taak kan bedreven worden tegelijk met taken van andere groepen (PULS, SCAN, DISP, BGS) of met FASE TASK 5. Ook de MSRE opdrachten kunnen gegeven worden.

PRNT (READ)

De volgende opdrachten zijn ofwel print of read-opdrachten.

FASE PRNT (READ) PPHSE:

Bij deze opdracht wordt de vector met als componenten de gewenste fases op 5 stralen uitgetikt (ingelezen).

FASE PRNT (READ) PMATRIX:

Bij deze opdracht wordt de variatie-matrix uitgetikt (ingelezen).

FASE PRNT (READ) PIMATRIX:

Bij deze opdracht wordt de inverse gemodificeerde matrix uitgetikt (ingelezen).

FASE PRNT (READ) PMODMATRIX:

Bij deze opdracht wordt de regelmatrix uitgetikt (ingelezen).

CALC (calculate)

FASE CALC PIMATRIX:

Bij deze opdracht wordt de inverse gemodificeerde matrix berekend uit de variatie-matrix.

FASE_CALC_MODMATRIX:

Bij deze opdracht wordt de regelmatrix berekend uit de variatie-matrix.

FASE_CALC_KKWM:

Bij deze opdracht wordt de som van het kwadraat van het verschil tussen gewenste- en laatst gemeten fase berekend.

FASE_CALC_PCORRECTIONS:

Bij deze opdracht worden de uit te voeren correcties berekend uit de laatst gemeten fases.

PLOT

FASE_PLOT_INIT:

Bij deze opdracht worden de plot-routines geinitialiseerd.

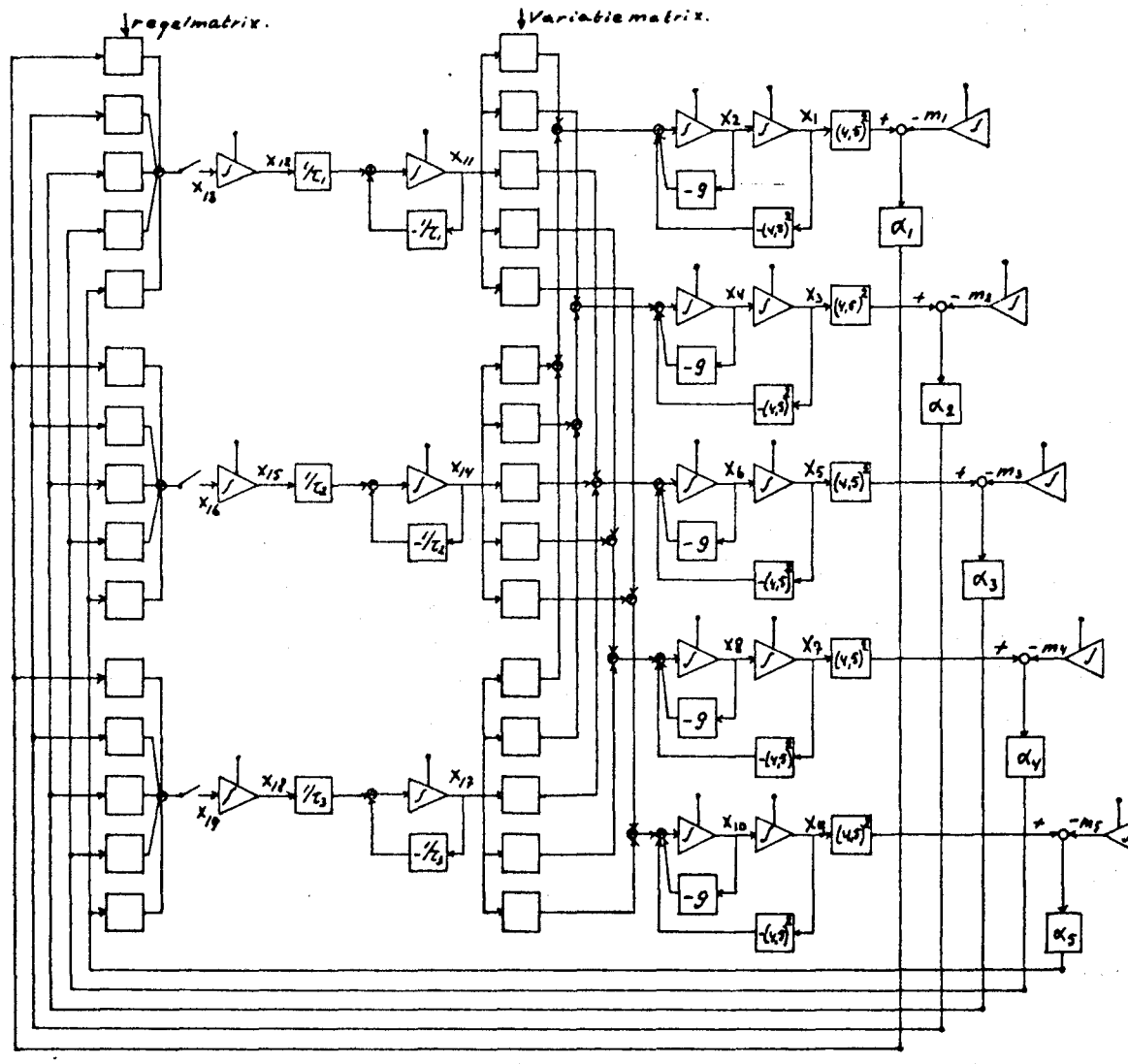
FASE_PLOT_CLOSE:

Bij deze opdracht worden de plot-routines gesloten. De informatie die in het geheugen van de computer is opgeslagen wordt indien gewenst op de plotter getekend.

Appendix C: Model van de Faseregeling.

Deze appendix bevat de volgende informatie:
- Toestandsdiagram van de faseregeling.
- De elementen van de B - en de Φ matrix die gegeven zijn volgens formule (4-2.4) resp. formule (4-2.19).
- Het rekenprogramma.
- Rekenresultaten.

1) Het toestandsdiagram van de faseregeling, met drie correctiespoelen B_4, B_6 en B_{10} .



Figuur C.1.

De grootheden x_{13}, x_{16} en x_{19} zijn " dummy " grootheden, die niet noodzakelijk zijn voor de systeembeschrijving. Er kan volstaan worden met 21 toestandsgrootheden.

$$\vec{v}(\lambda)=\begin{vmatrix}\vec{m}\ (\lambda)\\ \vec{x}\ (\lambda)\\ \vec{y}\ (\lambda)\end{vmatrix} \qquad \text{waarin: } \vec{m}\ (\lambda) = \begin{vmatrix} m_1\ (\lambda)\\ m_2\ (\lambda)\\ m_3\ (\lambda)\\ m_4\ (\lambda)\\ m_5\ (\lambda)\end{vmatrix} \quad , \vec{x}\ (\lambda) = \begin{vmatrix} x_1\ (\lambda)\\ x_2\ (\lambda)\\ \vdots\\ x_{19}(\lambda)\end{vmatrix}$$

2) <u>De elementen van B - en Φ matrix.</u>

De B-matrix:

Van de B-matrix zijn alle elementen nul, behalve:

- De diagonaal elementen zijn gelijk aan 1, op drie na, die nul zijn: $b_{18,18} = b_{21,21} = b_{24,24} = 0$.

$b_{18,1} = -\alpha_1 R_{11}$ $\qquad$ $b_{21,1} = -\alpha_1 R_{21}$

$b_{18,2} = -\alpha_2 R_{12}$ $\qquad$ $b_{21,2} = -\alpha_2 R_{22}$

$b_{18,3} = -\alpha_3 R_{13}$ $\qquad$ $b_{21,3} = -\alpha_3 R_{23}$

$b_{18,4} = -\alpha_4 R_{14}$ $\qquad$ $b_{21,4} = -\alpha_4 R_{24}$

$b_{18,5} = -\alpha_5 R_{15}$ $\qquad$ $b_{21,5} = -\alpha_5 R_{25}$

$b_{18,6} = \alpha_1 \beta_1 R_{11}$ $\qquad$ $b_{21,6} = \alpha_1 \beta_1 R_{21}$

$b_{18,8} = \alpha_2 \beta_2 R_{12}$ $\qquad$ $b_{21,8} = \alpha_2 \beta_2 R_{22}$

$b_{18,10} = \alpha_3 \beta_3 R_{13}$ $\qquad$ $b_{21,10} = \alpha_3 \beta_3 R_{23}$

$b_{18,12} = \alpha_4 \beta_4 R_{14}$ $\qquad$ $b_{21,12} = \alpha_4 \beta_4 R_{24}$

$b_{18,14} = \alpha_5 \beta_5 R_{15}$ $\qquad$ $b_{21,14} = \alpha_5 \beta_5 R_{25}$

$b_{24,1} = -\alpha_1 R_{31}$

$b_{24,2} = -\alpha_2 R_{32}$

$b_{24,3} = -\alpha_3 R_{33}$

$b_{24,4} = -\alpha_4 R_{34}$

$b_{24,5} = -\alpha_5 R_{35}$

$b_{24,6} = +\alpha_1 \beta_1 R_{31}$

$b_{24,8} = \alpha_2 \beta_2 R_{32}$

$b_{24,10} = \alpha_3 \beta_3 R_{33}$

$b_{24,12} = \alpha_4 \beta_4 R_{34}$

$b_{24,14} = \alpha_5 \beta_5 R_{35}$

Een voorbeeld van een B-matrix is te vinden op pag. C17 en C18

De elementen $a_{i,j}$ van de Φ matrix:

Element $a_{i,j}$ geeft de invloed van een eenheidsstap op element j, op element i.

m_1 : $a_{1,1} = \mathcal{L}^{-1}\{1/s\} = 1$ $\quad a_{1,j} = 0$ voor j = 2,3,4,.....24

m_2 : $a_{2,2} = 1$ $\quad a_{2,j} = 0$ voor j = 1,3,4,.....24

m_3 : $a_{3,3} = 1$ $\quad a_{3,j} = 0$ voor j = 1,2,4,5,.....24

m_4 : $a_{4,4} = 1$ $\quad a_{4,j} = 0$ voor j = 1,2,3,5,6,...24

m_5 : $a_{5,5} = 1$ $\quad a_{5,j} = 0$ voor j = 1,2,3,4,6,7,.24

x_1 : $a_{6,1} = a_{6,2} = a_{6,3} = a_{6,4} = a_{6,5} = 0$

$$a_{6,6} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{s+9}{(s+4.5)^2}\right\} = (1+4.5t)e^{-4.5t}$$

$$a_{6,7} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s+4.5)^2}\right\} = t\,e^{-4.5t}$$

$$a_{6,8} = a_{6,9} = a_{6,10} = \dots = a_{6,15} = 0$$

$$a_{6,16} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{T_{11}}{(s+1/\tau_1)(s+4.5)^2}\right\} = \frac{T_{11}}{1/\tau_1 - 4.5}\left\{t\,e^{-4.5t} + \frac{e^{-t/\tau_1} - e^{-4.5t}}{1/\tau_1 - 4.5}\right\}$$

$$a_{6,17} = a_{6,18} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{T_{11}}{s(s+1/\tau_1)(s+4.5)^2}\right\}$$

$$= \frac{T_{11}}{\tau_1}\left\{\frac{\tau_1}{(4.5)^2} - \frac{\tau_1 e^{-t/\tau_1}}{(4.5-1/\tau_1)^2} + \frac{(9-1/\tau_1)e^{-4.5t}}{(4.5)^2(1/\tau_1-4.5)^2} - \frac{t\,e^{-4.5t}}{4.5(1/\tau_1-4.5)}\right\}$$

$a_{6,19}$ = idem $a_{6,16}$ met τ_2 i.p.v. τ_1 en T_{12} i.p.v. T_{11}

$$= \frac{T_{12}}{1/\tau_2 - 4.5}\left\{t\,e^{-4.5t} + \frac{e^{-t/\tau_2} - e^{-4.5t}}{1/\tau_2 - 4.5}\right\}$$

$$a_{6,20} = a_{6,21} = \frac{T_{12}}{\tau_2}\left\{\frac{\tau_2}{(4.5)^2} - \frac{\tau_2 e^{-t/\tau_2}}{(4.5-1/\tau_2)^2} + \frac{(9-1/\tau_2)e^{-4.5t}}{(4.5)^2(1/\tau_2-4.5)^2} - \frac{te^{-4.5t}}{4.5(1/\tau_2-4.5)}\right\}$$

$$a_{6,22} = \frac{T_{13}}{1/\tau_3-4.5}\left\{te^{-4.5t} + \frac{e^{-t/\tau_3}-e^{-4.5t}}{1/\tau_3-4.5}\right\}$$

$$a_{6,23} = a_{6,24} = \frac{T_{13}}{\tau_3}\left\{\frac{\tau_3}{(4.5)^2} - \frac{\tau_3 e^{-t/\tau_3}}{(4.5-1/\tau_1)^2} + \frac{(9-1/\tau_3)e^{-4.5t}}{(4.5)^2(1/\tau_3-4.5)^2} - \frac{te^{-4.5t}}{4.5(1/\tau_3-4.5)}\right\}$$

x_2 : $a_{7,1} = a_{7,2} = \dots = a_{7,5} = 0$

$$a_{7,6} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{-(4.5)^2}{(s+4.5)^2}\right\} = -(4.5)^2\, te^{-4.5t}$$

$$a_{7,7} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{s}{(s+4.5)^2}\right\} = e^{-4.5t}(1-4.5t)$$

$a_{7,8} = a_{7,9} = \dots = a_{7,15} = 0$

$$a_{7,16} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{sT_{21}}{(s+1/\tau_1)(s+4.5)^2}\right\} = \frac{T_{21}}{4.5-1/\tau_1}\left\{\frac{-1/\tau_1 e^{-t/\tau_1}}{4.5-1/\tau_1} + 4.5e^{-4.5t} + \frac{t/\tau_1 e^{-t/\tau_1}}{4.5-1/\tau_1}\right\}$$

$$a_{7,17} = a_{7,18} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{T_{21}}{(s+1/\tau_1)(s+4.5)^2}\right\} = \frac{T_{21}}{T_{11}} \times a_{6,16}$$

$$a_{7,19} = \frac{T_{22}}{4.5-1/\tau_2}\left\{\frac{(t-1)/\tau_2 e^{-t/\tau_2}}{4.5-1/\tau_2} + 4.5e^{-4.5t}\right\}$$

$$a_{7,20} = a_{7,21} = \frac{T_{22}}{T_{12}} \times a_{6,19}$$

$$a_{7,22} = \frac{T_{23}}{4.5-1/\tau_3}\left\{\frac{(t-1)/\tau_3 e^{-t/\tau_3}}{4.5-1/\tau_3} + 4.5e^{-4.5t}\right.$$

$$a_{7,23} = a_{7,24} = \frac{T_{23}}{T_{13}} \times a_{6,22}$$

De invloeden op x_3, x_5, x_7 en x_9 zijn dezelfde als op x_1; alleen de elementen van de variatiematrix zijn andere.

De invloeden op x_4, x_6, x_8 en x_{10} zijn dezelfde als op x_2; alleen de elementen van de variatiematrix zijn andere.

x_{11} : $a_{16,1} = a_{16,2} = \dots = a_{16,15} = 0$

$$a_{16,16} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s+1/\tau_1}\right\} = e^{-t/\tau_1}$$

$$a_{16,17} = a_{16,18} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s(s+1/\tau_1)}\right\} = 1 - e^{-t/\tau_1}$$

$a_{16,19} = a_{16,20} = \dots = a_{16,24} = 0$

x_{12} : $a_{17,1} = a_{17,2} = \dots = a_{17,16} = 0$

$$a_{17,17} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}\right\} = 1 = a_{17,18}$$

$a_{17,19} = a_{17,20} = \dots = a_{17,24} = 0$

x_{13} : $a_{18,1} = a_{18,2} = \dots = a_{18,24} = 0$

Op identieke wijze kunnen de invloeden op x_{14} t/m x_{19} berekend worden. Een voorbeeld van een Φ-matrix is te vinden op pag. C19 en C20.

3) <u>Het rekenprogramma.</u>

Het computerprogramma waarmee de model-berekeningen zijn uitgevoerd, is geschreven in FORTRAN, en heeft de naam TOU4.
Door een aanvankelijk verkeerde voorstelling van het samplehold systeem (sampleschakelaar en stappenmotor), is een programma geschreven op basis van 24 toestandsgrootheden.
Voor de systeem-berekeningen levert dit echter geen probleem op.
Er zijn dus slechts 21 toestandsgrootheden en drie "dummy grootheden" waarvan in de B-matrix gebruik wordt gemaakt.

```
1
PAGE 0001          TOU4

      DIMENSION FF(24,24),BB(24,24),T(5,3),R(3,5)
      DIMENSION RSLT(24),IPLT(1000,8),XX(24)
      COMMON IPLT
      DATA YSCLE/50./
C
C     INPUT QUESTIONS
C     ---------------
C
1     CALL DROT(8,8,8)
      WRITE(4,300)
300   FORMAT(14H GIVE T MATRIX)
      READ(4,402)((T(I,J),J=1,3),I=1,5)
      WRITE(4,402)((T(I,J),J=1,3),I=1,5)
      WRITE(4,310)
310   FORMAT(14H GIVE R MATRIX)
      READ(4,403)((R(I,J),J=1,5),I=1,3)
      WRITE(4,403)((R(I,J),J=1,5),I=1,3)
2     WRITE(4,320)
320   FORMAT(27H GIVE SAMPLE & INTERVALTIME)
      READ(4,401)TS,TI
3     WRITE(4,330)
330   FORMAT(22H GIVE TOU1,TOU2 & TOU3)
      READ(4,401)TOU1,TOU2,TOU3
      A1=4.5
      A2=9.
      A=EXP(-TI/TOU1)
      B=EXP(-TI/TOU2)
      C=EXP(-TI/TOU3)
      D=EXP(-TI*A1)
      E=TI*D
      F=1./TOU1-A1
      G=1./TOU2-A1
      H=1./TOU3-A1
      C1=(E+(A-D)/F)/F
      C1=C1/TOU1
      C2=(E+(B-D)/G)/G
      C2=C2/TOU2
      C3=(E+(C-D)/H)/H
      C3=C3/TOU3
      C4=TOU1/A1/A1-TOU1*A/F/F+(A2-1./TOU1)*D/A1/A1/F/F-E/A1/F
      C4=C4/TOU1
      C5=TOU2/A1/A1-TOU2*B/G/G+(A2-1./TOU2)*D/A1/A1/G/G-E/A1/G
      C5=C5/TOU2
      C6=TOU3/A1/A1-TOU3*C/H/H+(A2-1./TOU3)*D/A1/A1/H/H-E/A1/H
      C6=C6/TOU3
      C7=((D-A)*1./TOU1/F-A1*E)/F
      C8=((D-B)*1./TOU2/G-A1*E)/G
      C9=((D-C)*1./TOU3/H-A1*E)/H
4     WRITE(4,340)
340   FORMAT(35H GIVE ALFA1 ALFA2 ALFA3 ALFA4 ALFA5)
      READ(4,401)ALFA1,ALFA2,ALFA3,ALFA4,ALFA5
5     WRITE(4,350)
350   FORMAT(35H GIVE BETA1 BETA2 BETA3 BETA4 BETA5)
      READ(4,401)BETA1,BETA2,BETA3,BETA4,BETA5
6     DO 115 I=1,24
115   RSLT(I)=0.
      WRITE(4,355)
355   FORMAT(26H GIVE PHI17/M5 & B4,B6,B10)
      READ(4,401)(RSLT(I),I=1,5),RSLT(17),RSLT(20),RSLT(23)
      WRITE(4,360)
```

```
360     FORMAT(12H DRAW & PLOT)
        READ(4,400)I
        J4=4
        J5=5
        IF(I.EQ.0)GOTO 50
        J4=12
        J5=13
50      CALL TAKADD(J4,J5)
        IYSCLE=100./TS+0.000001
        IXSTEP=100.*TI/TS+0.000001
        NYG=0
        DO 150 I=1,5
        NYG=NYG+150
150     CALL GRAD(0,1000,NYG,IXSTEP,1)
        CALL GRAD(0,1000,0,50,-1)
C
C       INITIALIZE MATRICES
C       ---------------------
C
        DO 100 I=1,24
        DO 100 J=1,24
        FF(I,J)=BB(I,J)=0.0
100     CONTINUE
        DO 110 I=1,24
        FF(I,I)=BB(I,I)=1.0
110     CONTINUE
        BB(18,1)=-ALFA1*R(1,1)
        BB(18,2)=-ALFA2*R(1,2)
        BB(18,3)=-ALFA3*R(1,3)
        BB(18,4)=-ALFA4*R(1,4)
        BB(18,5)=-ALFA5*R(1,5)
C
        BB(18,6)=-BETA1*BB(18,1)
        BB(18,8)=-BETA2*BB(18,2)
        BB(18,10)=-BETA3*BB(18,3)
        BB(18,12)=-BETA4*BB(18,4)
        BB(18,14)=-BETA5*BB(18,5)
C
        BB(21,1)=-ALFA1*R(2,1)
        BB(21,2)=-ALFA2*R(2,2)
        BB(21,3)=-ALFA3*R(2,3)
        BB(21,4)=-ALFA4*R(2,4)
        BB(21,5)=-ALFA5*R(2,5)
C
        BB(21,6)=-BETA1*BB(21,1)
        BB(21,8)=-BETA2*BB(21,2)
        BB(21,10)=-BETA3*BB(21,3)
        BB(21,12)=-BETA4*BB(21,4)
        BB(21,14)=-BETA5*BB(21,5)
C
        BB(24,1)=-ALFA1*R(3,1)
        BB(24,2)=-ALFA2*R(3,2)
        BB(24,3)=-ALFA3*R(3,3)
        BB(24,4)=-ALFA4*R(3,4)
        BB(24,5)=-ALFA5*R(3,5)
C
        BB(24,6)=-BETA1*BB(24,1)
        BB(24,8)=-BETA2*BB(24,2)
        BB(24,10)=-BETA3*BB(24,3)
        BB(24,12)=-BETA4*BB(24,4)
```

```
      BB(24,14)=-BETA5*BB(24,5)
C
      BB(18,18)=BB(21,21)=BB(24,24)=0.0
C
      FF(18,18)=FF(21,21)=FF(24,24)=0.0
      FF(17,18)=FF(20,21)=FF(23,24)=1.0
      FF(6,6)=FF(8,8)=FF(10,10)=FF(12,12)=FF(14,14)=D+A1*E
      FF(6,7)=FF(8,9)=FF(10,11)=FF(12,13)=FF(14,15)=F
      FF(7,6)=FF(9,8)=FF(11,10)=FF(13,12)=FF(15,14)=-A1*A1*E
      FF(7,7)=FF(9,9)=FF(11,11)=FF(13,13)=FF(15,15)=D-A1*E
      FF(16,16)=A
      FF(19,19)=B
      FF(22,22)=C
      FF(16,17)=FF(16,18)=1.-A
      FF(19,20)=FF(19,21)=1.-B
      FF(22,23)=FF(22,24)=1.-C
C
      FF(6,16)=FF(7,17)=FF(7,18)=T(1,1)*C1
      FF(6,16)=FF(6,16)+TOU1
      FF(6,17)=FF(6,19)=T(1,1)*C4
      FF(6,19)=FF(7,20)=FF(7,21)=T(1,2)*C2
      FF(6,19)=FF(6,19)+TOU2
      FF(6,20)=FF(6,21)=T(1,2)*C5
      FF(6,22)=FF(7,23)=FF(7,24)=T(1,3)*C3
      FF(6,22)=FF(6,22)+TOU3
      FF(6,23)=FF(6,24)=T(1,3)*C6
      FF(7,16)=T(1,1)*C7
      FF(7,19)=T(1,2)*C8
      FF(7,22)=T(1,3)*C9
C
      FF(8,16)=FF(9,17)=FF(9,18)=T(2,1)*C1
      FF(8,16)=FF(8,16)+TOU1
      FF(8,17)=FF(8,19)=T(2,1)*C4
      FF(8,19)=FF(9,20)=FF(9,21)=T(2,2)*C2
      FF(8,19)=FF(8,19)+TOU2
      FF(8,20)=FF(8,21)=T(2,2)*C5
      FF(8,22)=FF(9,23)=FF(9,24)=T(2,3)*C3
      FF(8,22)=FF(8,22)+TOU3
      FF(8,23)=FF(8,24)=T(2,3)*C6
      FF(9,16)=T(2,1)*C7
      FF(9,19)=T(2,2)*C8
      FF(9,22)=T(2,3)*C9
C
      FF(10,16)=FF(11,17)=FF(11,18)=T(3,1)*C1
      FF(10,16)=FF(10,16)+TOU1
      FF(10,17)=FF(10,19)=T(3,1)*C4
      FF(10,19)=FF(11,20)=FF(11,20)=T(3,2)*C2
      FF(10,19)=FF(10,19)+TOU2
      FF(10,20)=FF(10,21)=T(3,2)*C5
      FF(10,22)=FF(11,23)=FF(11,24)=T(3,3)*C3
      FF(10,22)=FF(10,22)+TOU3
      FF(10,23)=FF(10,24)=T(3,3)*C6
      FF(11,16)=T(3,1)*C7
      FF(11,19)=T(3,2)*C8
      FF(11,22)=T(3,3)*C9
C
      FF(12,16)=FF(13,17)=FF(13,18)=T(4,1)*C1
      FF(12,16)=FF(12,16)+TOU1
      FF(12,17)=FF(12,19)=T(4,1)*C4
      FF(12,19)=FF(13,20)=FF(13,21)=T(4,2)*C2
```

```
      FF(12,19)=FF(12,19)*TOU2
      FF(12,20)=FF(12,21)=T(4,2)*C5
      FF(12,22)=FF(13,23)=FF(13,24)=T(4,3)*C3
      FF(12,22)=FF(12,22)*TOU3
      FF(12,23)=FF(12,24)=T(4,3)*C6
      FF(13,16)=T(4,1)*C7
      FF(13,19)=T(4,2)*C8
      FF(13,22)=T(4,3)*C9
C
      FF(14,16)=FF(15,17)=FF(15,18)=T(5,1)*C1
      FF(14,16)=FF(14,16)*TOU1
      FF(14,17)=FF(14,18)=T(5,1)*C4
      FF(14,19)=FF(15,20)=FF(15,21)=T(5,2)*C2
      FF(14,19)=FF(14,19)*TOU2
      FF(14,20)=FF(14,21)=T(5,2)*C5
      FF(14,22)=FF(15,23)=FF(15,24)=T(5,3)*C3
      FF(14,22)=FF(14,22)*TOU3
      FF(14,23)=FF(14,24)=T(5,3)*C6
      FF(15,16)=T(5,1)*C7
      FF(15,19)=T(5,2)*C8
      FF(15,22)=T(5,3)*C9
C
C     CALCULATION LOOP
C     ----------------
C
      DO 116 I=1,6
116   IPLT(1,I)=0
      N=2
      IK=TS/TI+0.000001
      DO 120 I=1,10
      CALL MXPROD(XX,BB,RSLT,0)
      CALL COPY(XX,RSLT)
C     WRITE(4,404)(RSLT(KK),KK=1,24)
      DO 11 J=1,IK
      CALL MXPROD(XX,FF,RSLT,0)
      CALL COPY(XX,RSLT)
C     WRITE(4,404)(RSLT(KK),KK=1,24)
      IPLT(N,1)=RSLT(6)*YSCLE*BETA1
      IPLT(N,2)=RSLT(8)*YSCLE*BETA2
      IPLT(N,3)=RSLT(10)*YSCLE*BETA3
      IPLT(N,4)=RSLT(12)*YSCLE*BETA4
      IPLT(N,5)=RSLT(14)*YSCLE*BETA5
      IPLT(N,6)=RSLT(16)*YSCLE/3.
      IPLT(N,7)=RSLT(19)*YSCLE/3.
      IPLT(N,8)=RSLT(22)*YSCLE/3.
      N=N+1
      IF(N.GT.1000)GOTO 130
11    CONTINUE
120   CONTINUE
      GOTO 130
C
C     OUTPUT SECTION
C     --------------
C
175   J4=12
      J5=13
      CALL TAKADD(J4,J5)
      NY0=0
      DO 182 I=1,5
      NY0=NY0+130
```

```
182     CALL GRAD(9,1000,NY9,IXSTEP,1)
        CALL GRAD(5,1000,0,50,-1)
        GOTO 181
180     IK=IK+15
181     NY0=0
        DO 200 I=1,5
        NY0=NY0+150
        NX=0
        NY=NY0
        CALL DROT(J5,NX,NY)
        DO 190 J=1,IK
        NX=NX+IXSTEP
        NY=NY0+IPLT(J,I)
        IF(NY.GT.1000)NY=1000
        IF(NY.LT.0)NY=0
        CALL DROT(J4,NX,NY)
190     CONTINUE
200     CONTINUE
        NY0=150
        DO 201 I=6,8
        NX=0
        NY0=NY0+150
        NY=NY0
        CALL DROT(J5,NX,NY)
        DO 201 J=1,IK
        NX=NX+IXSTEP
        NY=NY0+IPLT(J,I)
        IF(NY.GT.1000)NY=1000
        IF(NY.LT.0)NY=0
        CALL DROT(J4,NX,NY)
201     CONTINUE
        WRITE(4,370)
370     FORMAT(10H NEW ZERO?)
        READ(4,400)I
        I=I*1024+100
        CALL DROT(J5,I,0)
        CALL DROT(0,0,0)
        WRITE(4,375)
375     FORMAT(6H CHANGE?)
        READ(4,400)I
        J4=4
        J5=5
        GOTO(1,2,3,4,5,6,179),I
400     FORMAT(10I10)
401     FORMAT(10F10.3)
402     FORMAT(5(3F10.3/))
403     FORMAT(3(5F10.3/))
404     FORMAT(5F6.3//10F6.3//9F6.3//)
        END
        END
```

4) Rekenresultaten.

In de hoofdstukken 4 en 5 zijn al enkele resultaten van de berekeningen aan de hand van het model gegeven.

- Berekeningen die de stabiliteit van het regelsysteem nagaan.
- Berekeningen die nagaan in welke mate een gewenst faseverloop bereikt kan worden.

Bevalve indien anders vermeld zijn de berekeningen uitgevoerd met de variatiematrix zoals gegeven op pag. 16 en de regelmatrix zoals gegeven op pag. 16.

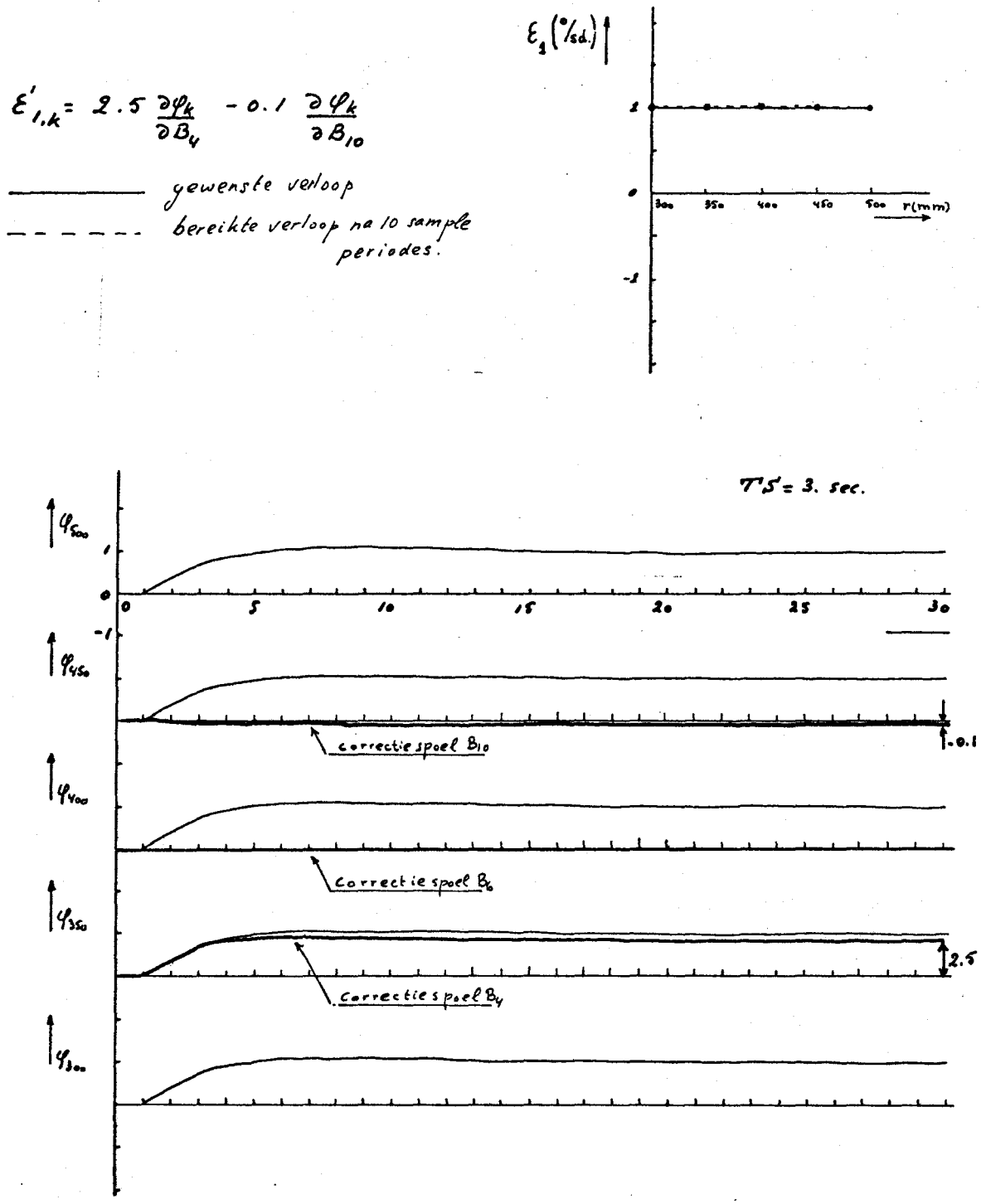
De rekenresultaten die in deze appendix gegeven worden zijn in volgorde:

1) De bepaling van ε_1 . fig. C-2
2) De bepaling van ε_2 . fig. C-3
3) De bepaling van ε_3 . fig. C-4
4) Correctie op verstoring van B_4 . fig. C-5
5) Correctie op verstoring van B_6 . fig. C-6
6) Correctie op verstoring van B_{10}: fig. C-7

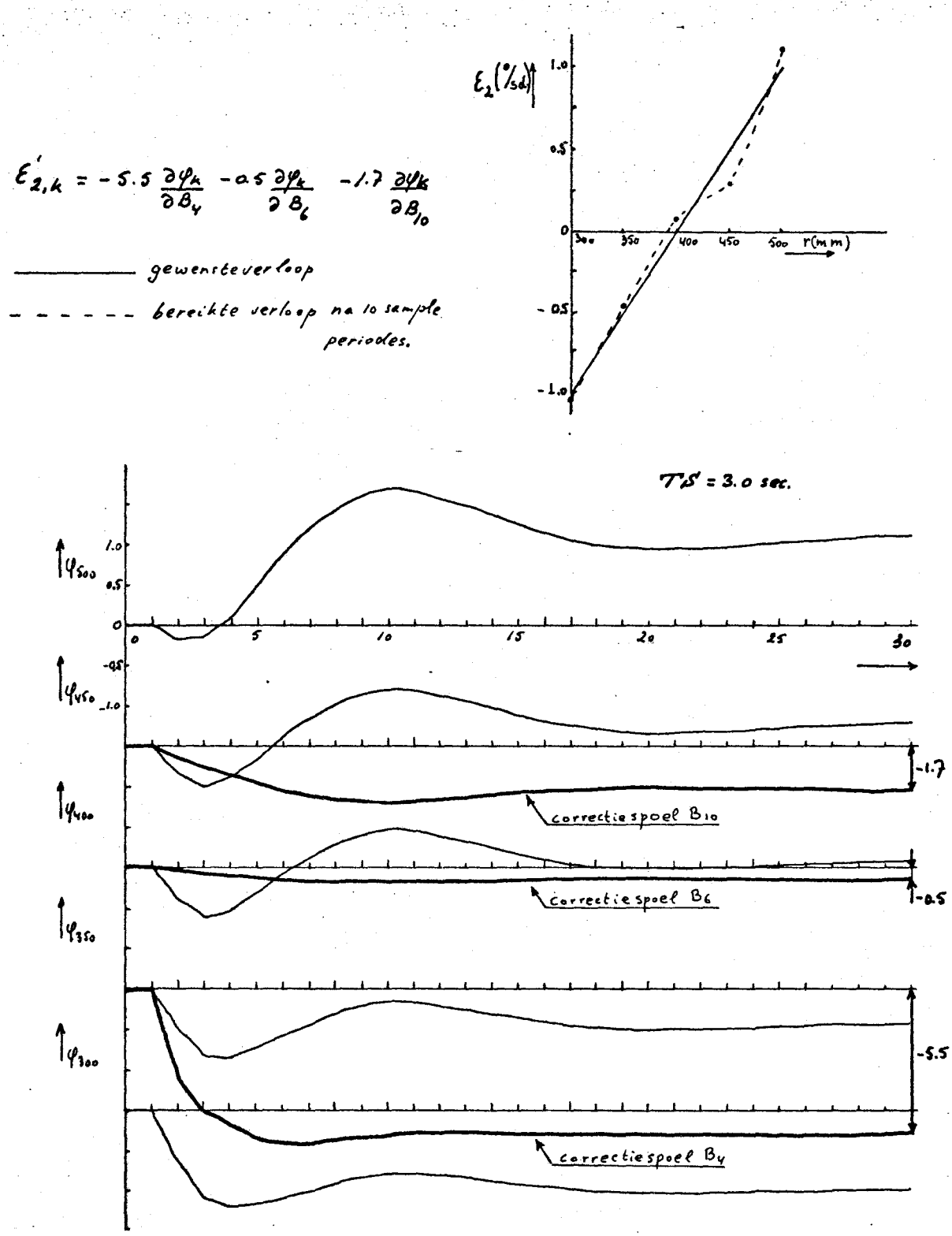
Bij al deze berekeningen is de sampletijd TS= 3sec., de rekentijd TI= 1sec. verder is:

$\tau_1 = 1$sec.
$\tau_2 = 2$sec.
$\tau_3 = 3$sec.
$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = -1.$
$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 20.$

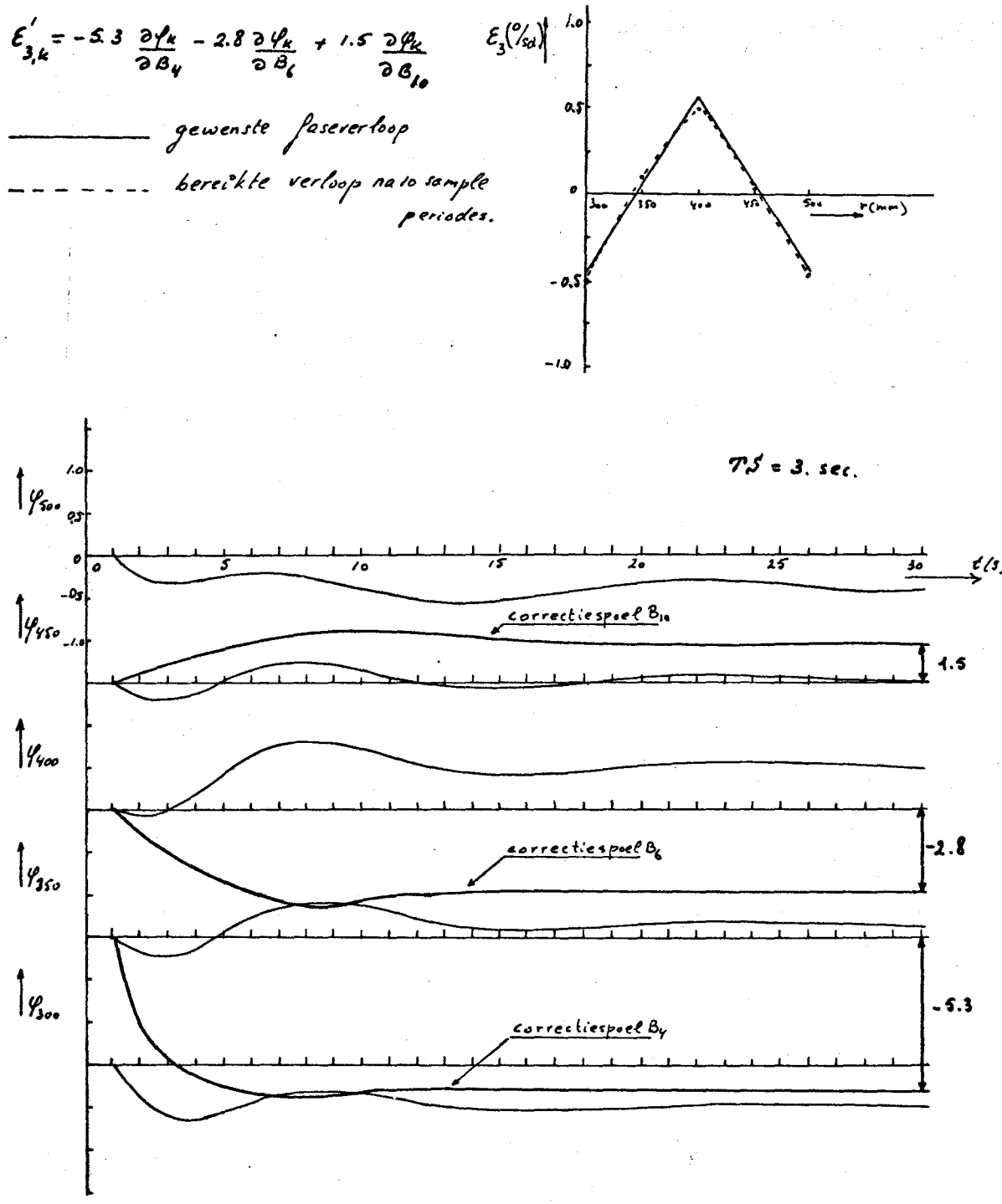
De totale tijdschaal in de figuren bevat 10 sampleperiodes.



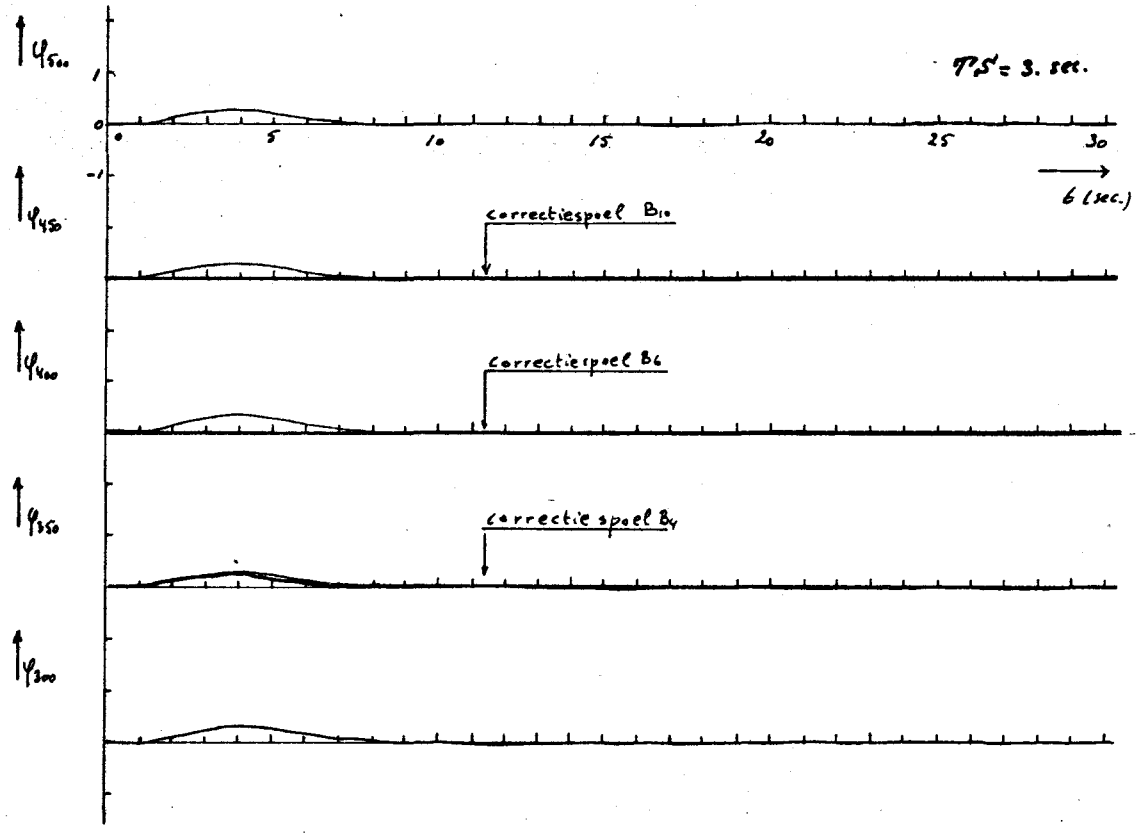
Figuur C-2 Regeling naar een gewenst faseverloop. De schaal langs de φ_i -as is arbitrair.
In de inzet boven in de figuur staat het gewenste faseverloop aangegeven, ook het na 10 sampleperiodes bereikte resultaat is in de inzet getekend.



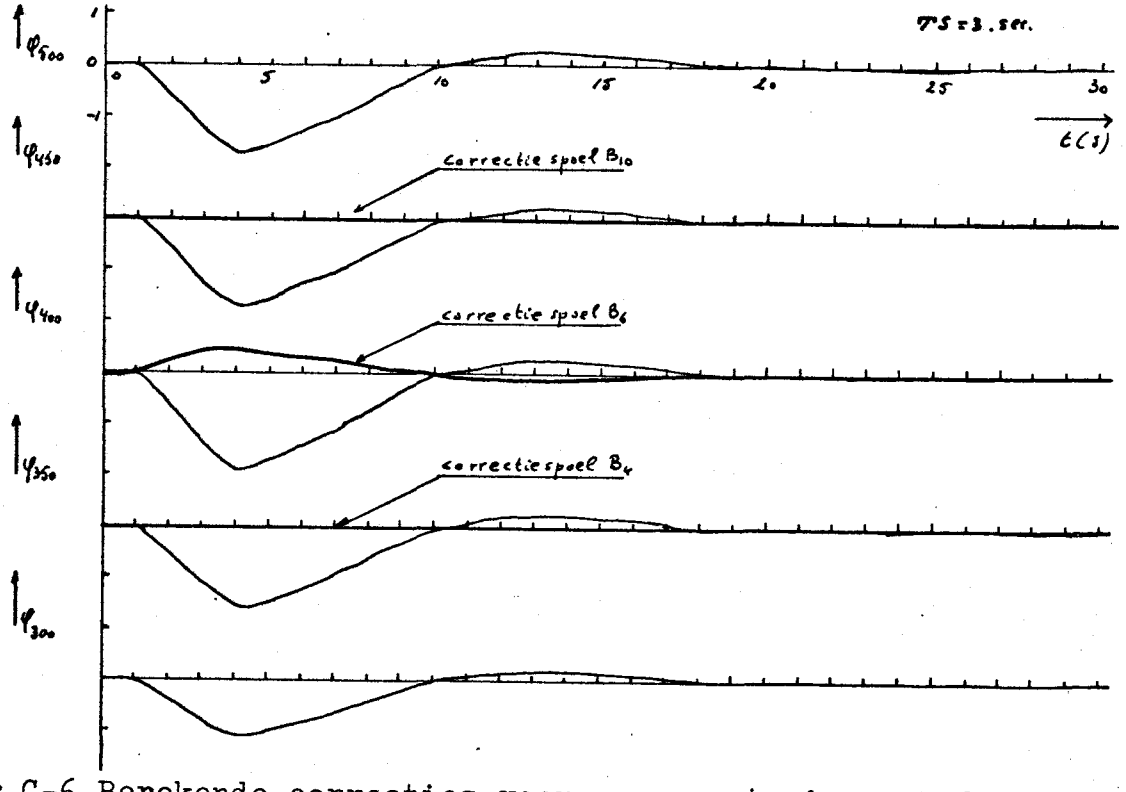
Figuur C-3 Regeling naar een gewenst faseverloop. De schaal langs de φ_i -as is arbitrair.
In de inzet boven in de figuur staat het gewenste faseverloop aangegeven, ook het na 10 sampleperiodes bereikte resultaat is in de inzet getekend.



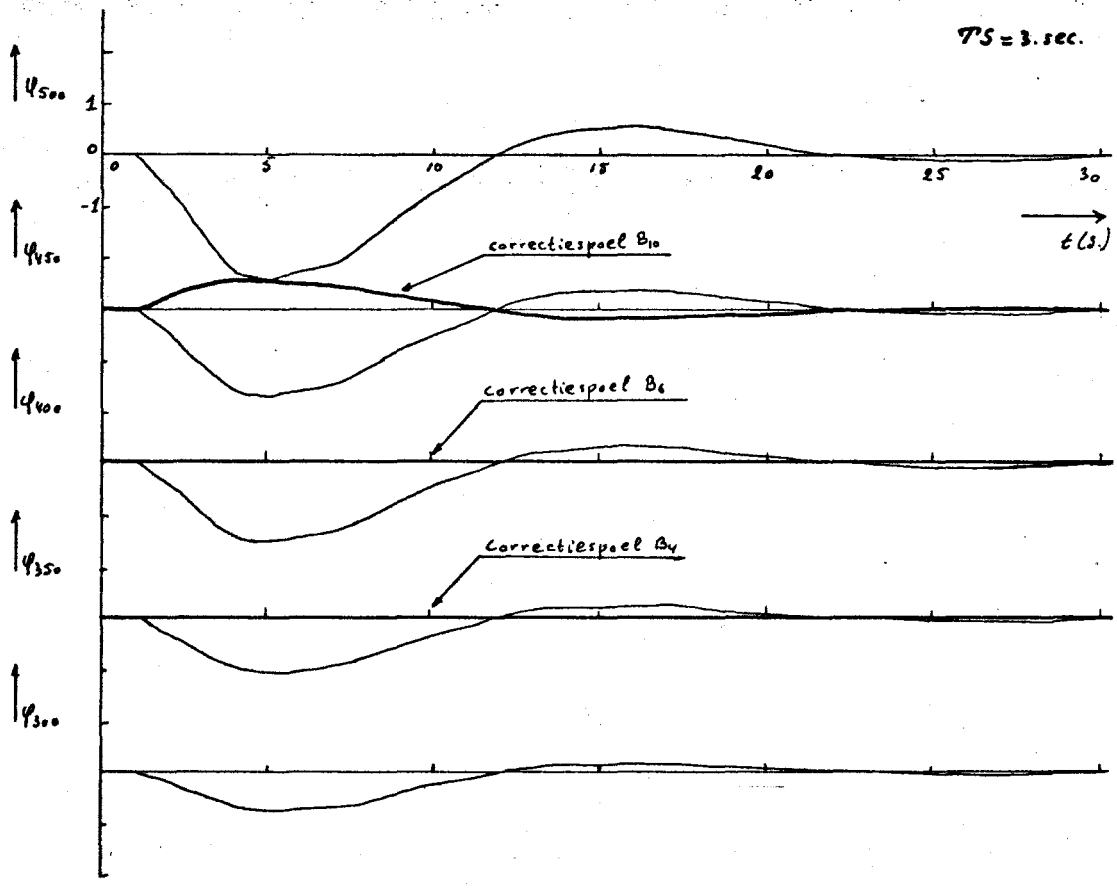
Figuur C-4 Regeling naar een gewenst faseverloop. De schaal langs de φ_i -as is arbitrair.
In de inzet boven in de figuur staat het gewenste faseverloop aangegeven, ook het na 10 sampleperiodes bereikte resultaat is in de inzet getekend.



Figuur C-5 Berekende correcties voor een verstoring van de stuurparameter van B_4, bij een terugkoppelingsfactor $\alpha_i = -1$. TS = 3.sec.
De schaal langs de verticale as is arbitrair.



Figuur C-6 Berekende correcties voor een verstoring van de stuurparameter van B_6, bij een terugkoppelingsfactor $\alpha_i = -1$. TS = 3.sec.
De schaal langs de verticale as is arbitrair.



Figuur C-7 Berekende correcties voor een verstoring van de stuurparameter van B_{10}, bij een terug koppelingsfactor $\alpha_i = -1.$ TS = 3. sec.
De schaal langs de verticale as is arbitrair.

1. B - matrix

```
GIVE ALFA1 ALFA2 ALFA3 ALFA4 ALFA5
-1./-1./-1./-1./-1./

GIVE BETA1 BETA2 BETA3 BETA4 BETA5
20./20./20./20./20./
```

Kolom 1 t/m 6. (B)

1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
6.065999984	-0.116999999	-3.831999957	-0.574999988	0.965999991	121.319999692
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
1.964999974	-0.740999997	-2.188999991	-0.287999995	1.288999970	-39.299999237
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
-0.306999996	0.716999993	1.088999970	-0.089000000	-1.556999981	6.139999985

Kolom 7 t/m 12 (B)

0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	2.339999974	0.000000000	76.639999366	0.000000000	11.499999761
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	14.819999932	0.000000000	43.779998777	0.000000000	5.759999871
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	-14.339999913	0.000000000	-21.619999408	0.000000000	1.780000001

kolom 13 t/m 18 (B)

0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000
0.000000000	-19.319999694	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	-25.779999733	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	31.139999865	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000

kolom 19 t/m 24 (B)

0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000

Φ matrix voor $t = 0.5$ sec.

kolom 1 t/m 6 ($\Phi(0.5)$).

1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.342547474
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	-1.067167133
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000

kolom 7 t/m 12 ($\Phi(0.5)$)

0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.052699612	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
-0.131749030	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.342547476	0.052699612	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	-1.067167133	-0.131749030	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.342547476	0.052699612	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	-1.067167133	-0.131749030	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.342547474
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	-1.067167133
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000

kolom 13 t/m 18 ($\phi(0.5)$).

0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.010004592	0.002560037	0.002560037
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.010390157	0.010004592	0.010004592
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.009539262	0.002440584	0.002440584
0.000000000	0.000000000	0.000000000	-0.009906694	0.009539262	0.009539262
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.009590566	0.002454214	0.002454214
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.009960590	0.009590566	0.009590566
0.052699612	0.000000000	0.000000000	0.009099784	0.002328527	0.002328527
-0.131749030	0.000000000	0.000000000	0.009450479	0.009099784	0.009099784
0.000000000	0.342547476	0.052699612	0.008556699	0.002189605	0.002189605
0.000000000	-1.067167133	-0.131749030	0.008686672	0.008556699	0.008556699
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.606530681	0.393469319	0.393469319
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	1.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000

kolom 19 t/m 24 ($\phi(0.5)$).

0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
-0.023332544	-0.002868157	-0.002868157	-0.012916531	-0.001044189	-0.001044189
-0.030862315	-0.011666272	-0.011666272	-0.018355323	-0.004305510	-0.004305510
-0.032122802	-0.003948603	-0.003948603	-0.018473644	-0.001493433	-0.001493433
-0.042483266	-0.016061001	-0.016061001	-0.026252380	-0.006157881	-0.006157881
-0.039637129	-0.004879776	-0.004879776	-0.026013293	-0.002102947	-0.002102947
-0.052506002	-0.019848565	-0.019848565	-0.036966766	-0.008671098	-0.008671098
-0.035100010	-0.004314675	-0.004314675	-0.029167330	-0.002357923	-0.002357923
-0.046427323	-0.017550005	-0.017550005	-0.041448879	-0.009722443	-0.009722443
-0.035736090	-0.004392865	-0.004392865	-0.041633284	-0.003350687	-0.003350687
-0.047268675	-0.017868045	-0.017868045	-0.059163899	-0.013877761	-0.013877761
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.778800771	0.221199229	0.221199229	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	1.000000000	1.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.846481711	0.153518289	0.153518289
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	1.000000000	1.000000000
0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000	0.000000000