

Foute in die meting van die aarde se magneetveld met die protonmagnetometer

G.P. Hancke

Departement Elektriese Ingenieurswese, Universiteit van Pretoria, Pretoria 0002

Ontvang 9 Junie 1988; aanvaar 21 Maart 1989

UITTREKSEL

Die tipiese foute wat voorkom wanneer die metode van periode-meting gebruik word vir die bepaling van die presessiefrekwensie van die magnetiese moment van protone, word bespreek, en metodes om dit teen te werk word voorgestel. Belangrike gevolgtrekkings wat sal lei tot die optimale funksionering van die periodometer, word gemaak — veral ten opsigte van die meettyd, polarisasietyd en die eienskappe van die sensorvloeistof.

ABSTRACT

Errors in the measurement of the terrestrial magnetic field with a proton magnetometer

Typical errors in the measurement of the precession frequency of the magnetic moment of protons when using the periodometer, are discussed and methods are proposed to minimize its influence. Important conclusions are made with regard to the time of measurement and polarization and the properties of the sensor fluid.

INLEIDING

Die werking van die protonmagnetometer berus op die beginsel van die vrye presessie van protone, soos geïmplementeer deur Packard en Varian¹ in 1954. 'n Roterende gelaai deeltjie kan voorgestel word as 'n giroskoop met 'n magnetiese moment $\vec{M}$ parallel aan die rotasie-as. Die verwantskap tussen die magnetiese moment $\vec{M}$ en die meganiese moment $\vec{p}$ van so 'n elementêre giroskoop word gegee deur $\vec{M} = \gamma_p \vec{p}$, waar γ_p bekend staan as die giromagnetiese verhouding. Indien 'n eksterne magnetiese veld $\vec{H}$ (byvoorbeeld die aardveld) inwerk op so 'n roterende deeltjie, sal dit neig om die rotasie-as van die deeltjie in sy eie rigting te deflekteer. Dit lei tot die presessie

van die magnetiese moment van die giroskoop rondom sy oorspronklike rigting. Volgens die Larmor-teorema² is die presessiefrekwensie gekoppel aan die veld H deur die verwantskap

$$f_p = \gamma_p H / 2\pi \quad (1)$$

'n Presessiesin word soos volg verkry: 'n Houer met protonryke vloeistof (soos byvoorbeeld water of alkohol) word geplaas in 'n spoel waardeur 'n stroom gestuur word om 'n sterk, polariserende magnetiese veld $\vec{H}_p$ op te wek. ($H_p \gg H$). Die rigting van die spoel word so gekies dat $\vec{H}_p$ benaderd loodreg is op $\vec{H}$. Die totale magnetisering $\vec{M}$ word in die houer met vloeistof gevestig teen 'n tempo wat bepaal word

deur die longitudinale relaksasietydkonstante³ T_1 . T_1 verteenwoordig die proses waarvolgens die magnetiserende veld $\vec{H}_p$ die willekeurige termiese beweging van die partikels oorkom om hulle te rig in sy eie rigting. Na die vestiging van $\vec{M}$ in ongeveer 3 tot 4 sekondes word $\vec{H}_p$ verwyder en begin presessie van die magnetiese moment van die partikel rondom sy oorspronklike rigting (dié van $\vec{H}$). Hierdie presessie veroorsaak in die spoel die indusering van 'n e.m.k. met frekwensie f_p . Hierdie presessie van magnetiese momente neem eksponensieel af met tydkonstante T_2 , wat bekend staan as die transversale relaksasietydkonstante.³

Die geïnduseerde presessiesin word eers versterk en daarna word die frekwensie daarvan bepaal om uiteindelik die magnetiese veldsterkte H soos in vergelyking (1) vervat, as resultaat te lewer.

BRONNE VAN FOUTE

Die potensiele fout in die meetresultaat kom voor as gevolg van 'n kombinasie van invloede wat rofweg in drie groepe ingedeel kan word. In die eerste plek is daar faktore wat kan inwerk op die fundamentele proses van protonpresessie en sy verwantskap met die omgewingsmagneetveld. Tweedens kan verskeie invloede op die sensor en versterker die kwaliteit van die presessiesin na die versterker bepaal. Ingesluit hierby is die skielike veranderinge in die aarde se magneetveld as gevolg van natuurlike of mensgemaakte steurings. Die metode wat gebruik word om die frekwensie-inligting uit die presessiesin te verkry, kan ook 'n bydrae tot die totale meetfout lewer. Daar sal gepoog word om die belangrikste invloede te identifiseer en moontlike teenmaatreëls voor te stel.

1. DIE MECHANISME VAN PROTONPRESESSIE

Die fundamentele verwantskap van vergelyking (1) kan deur die volgende faktore versteur word:

1.1 Die giromagnetiese verhouding γ_p

As gevolg van sekere fisiese beperkinge is die waarde van die giromagnetiese verhouding nie absoluut bekend nie. Die relatiewe fout in die bepaling van γ_p word aanvanklik deur Driscoll en Bender⁴ gegee as

$$\Delta \gamma_p / \gamma_p = 0,75 \times 10^{-5}$$

In 1979 publiseer Williams en Olsen⁵ 'n noukeuriger waarde vir γ_p , wat deur 'n nuwe meetmetode verkry is. Hulle resultate lewer

$$\Delta \gamma_p / \gamma_p = 0,21 \times 10^{-6} \quad (2)$$

Hierdie eksperiment is uitgevoer met protone in 'n sferiese monster van suiwer H_2O by $25^\circ C$.

1.2 Chemiese verskuiwings

Hierdie sogenaamde chemiese verskuiwing het sy oorsprong by die magnetiese afskerming as gevolg van elektrone.^{6,7} Die kern ondervind dus nie die magnetiese veld wat ekstern aangelê is nie, maar 'n veld wat ver-

ander is as gevolg van afskerming deur omringende elektrone.

$$H_{\text{ker}} = H(1 - \sigma)$$

Die afskermingsfaktor σ beloop ongeveer 10^{-5} vir protone.

Magnetometers wat van verskillende vloeistowwe gebruik maak, kan dus lesings gee wat met ongeveer 1nT verskil. 'n Korreksie vir afskerming kan aangebring word mits σ dieselfde is vir alle protone in die gekose vloeistof. Etielalkohol is byvoorbeeld ongeskik vir eksakte metings omdat dit drie chemiese nie-ekwivalente groepe van protone met verskillende waardes van σ bevat.

1.3 Die magnetiese eienskappe van die sensor

Twee faktore kan hier genoem word. Eerstens kan die sensor elemente bevat waarvan die magnetiese eienskappe verskil van dié van lug en sal die verspreiding van die magnetiese veld in die sensor nie dieselfde wees as wat dit was voordat die sensor daar geplaas is nie. Dit sal 'n fout in die lesings veroorsaak. Om dit te verhoed, behoort alle materiale onderwerp te word aan spektrale analise om moontlike ferro- en paramagnetiese elemente op te spoor.

Aangesien daar in die praktyk geen materiaal is wat magneties absoluut suiwer is nie, behoort daar 'n raming gemaak te word van die fout wat wel voorkom as gevolg van die magnetisme van die konstruksiematerialie van die sensor. Daar is gevind dat met 'n deeglike keuse van materiale dit moontlik is om hierdie fout te beperk tot ongeveer 0,04 nT.⁶

Tweedens is 'n faktor wat 'n rol speel, die oorblywende magnetisering van die sensor.⁸ Die grootte van hierdie invloed is 'n funksie van die tipe draad wat gebruik word. Die fout so veroorsaak, kan enkele nT beloop, terwyl die duur van die presessiesin merkbaar verkort word.

2. DIE KWALITEIT VAN DIE PRESESSIESEIN

Die kwaliteit van die presessiesin soos beskikbaar na die versterkerstadium van die instrument, kan beoordeel word aan die hand van twee parameters: die sein-ruis-verhouding en die tydkonstante waarmee dit wegsterf. Faktore wat hierdie parameters bepaal, sal hier bespreek word, maar die invloed van hierdie parameters op die noukeurigheid van die bepaling van die presessiefrekwensie word in paragraaf 3 ontleed.

2.1 Die sein-ruis-verhouding

Hierdie verhouding kan vergroot word deur die seinamplitude te vergroot en/of die ruis te verminder.

2.1.1 Die amplitude van die presessiesin

Die presessiesingrootte is afhanklik van die ontwerp van die sensor, maar veral van die grootte van die polarisasieveld $\vec{H}_p$ en polarisasietyd T_p . Daar is egter beperkings op die grootte van $\vec{H}_p$ (soos die energieverbruik en verhitting van die sensorspoele as gevolg van ohmiese verliese), sowel as T_p , omdat dit die frekwensie van meting bepaal. Optimale sensorontwerp is 'n omvattende onderwerp wat nie hier hanteer sal word nie,

maar vir die doel van hierdie bespreking is dit voldoende om te aanvaar dat die presessieamplitude by die sensor normaalweg nie 1 tot 2 μ V sal oorskry nie. Daarom is dit belangrik om ongewenste seine (steurings en ruis) tot 'n minimum te beperk.

2.1.2 Steurings en ruis

Protonpresessie-magnetometers is baie gevoelig vir elektromagnetiese steurings omdat die sensor effektief 'n magnetiese antenne is. Verskillende tipes steurings kom voor: veranderlike magnetiese velde (afkomstig van byvoorbeeld transformators) kan steurings in die sensorwikkeling induseer en elektriese (kapasitiewe) steurings kom by die versterkeringang voor. Nog 'n bron van ongewenste seine is die skielike veranderinge in die aarde se magneetveld as gevolg van natuurlike of mensgemaakte steurings. Die termiese ruis van die sensorwikkeling asook die ruis in die versterker tel ook by enige ander seine wat reeds bestaan. Verder word ruis ook opgewek in die kabel tussen die sensor en versterker as gevolg van die meganiese vervorming daarvan. In die praktyk word die akkuraatheid van metings meer deur steurings as ruis beïnvloed en is die neem van metings dikwels as gevolg daarvan onmoontlik.

Ongewenste seine wat sommeer met die presessie sein het fase-modulasie van die sein tot gevolg en dit is hierdie fase-onstabieleit wat die noukeurige bepaling van die presessiefrekwensie belemmer. Daarom is dit belangrik dat voldoende voorsorg getref word teen veral elektromagnetiese steurings.

Indien die magnetiese veld van die steuring homogeen is en die rigting daarvan stabiel, kan die invloed daarvan uitgeskakel word deur die as van die sensorspoel loodreg op die steuringsveld te oriënteer. Indien die rigting van die steuringsveld egter varieer of daar verskillende bronne van steurings is, word die metode van kompensasie toegepas. Kompensasie met betrekking tot die steuring berus op die gebruik van 'n kompensatiespoel identies aan die sensorspoel wat in serie verbind word met die sensorspoel op so 'n wyse dat die presessie sein in die twee spoel sal sommeer, maar dat dit die geïnduseerde steurings sal uitkanselleer.

Wanneer die steuringsveld baie nie-homogeen is met 'n veranderlike topografie, kan 'n geleidende nie-ferromagnetiese skerm gebruik word. Die afskermingskonstante neem toe met toenemende geleidingsvermoë en steuringsfrekwensie. Afskerming het egter nadele tot gevolg: eerstens sal tydens 'n bewegende opname werwelstrome in die skerm geïnduseer word, nie alleen van steurings nie (wat nuttig is), maar ook as gevolg van bewegings in 'n anomale magnetiese veld. Verder sal werwelstrome ook in die skerm ontstaan wanneer die polarisasieveld verwyder word. Dit versteur die toestand vir vorming van die presessie sein en veroorsaak faseverskuiwings wat presessering nadelig beïnvloed.

Die elektriese of kapasitiewe induksie van ongewenste seine by die versterkeringang kan verminder word deur die ingangsimpedansie van die versterker te verlaag. Die rede hiervoor is dat dit na die versterkeringang deurdring deur middel van klein

strooikapasitansies (hoë impedansies). Verder kan elektriese steurings, wat dikwels die magnetiese steurings oorskry, ook op die konvensionele wyse afgeskerm word.

2.1.3 Oorgangsverskynsels in die sensorontwikkeling

Tydens polarisasie word heelwat energie opgegaar in die wikkeling van die sensor en met oorskakeling na die meetversterker moet van hierdie energie ontslae geraak word.

Dit veroorsaak 'n oorgangsverskynsel wat foutiewe lesings tot gevolg kan hê. Daarom kan nie onmiddellik na oorskakeling begin word met die proses van frekwensiebepaling nie. Die vertragingstyd voordat begin word met die meting van die presessie sein moet so gekies word dat die amplitude van die natuurlike ossillasies kleiner is as 0,03 van die amplitude van die presessie sein. Hierdie amplitude-verhouding word verkry na 'n tyd $t = 15T_0$, waar T_0 die tydkonstante van die sensor en meetbaan is. Na hierdie tyd sal die vals fase-modulasie minder as 2° wees, wat 'n relatiewe fout tot gevolg sal hê van

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{2}{360N_s} \quad (3)$$

$$= 1,36 \times 10^{-6} \text{ vir } N_s = 4096$$

N_s is die aantal periodes van die presessie sein wat die meettyd bepaal.

2.2 Die tydkonstante van die presessie sein

Nadat die polarisasieveld vanaf die sensor verwyder is, besit die presessie sein sy maksimum amplitude en daarna sterf dit eksponensieel uit met 'n tydkonstante wat primêr bepaal word deur die waarde van die transversale relaksasietyd T_2 . Die waarde van T_2 is 'n fisiese eienskap van die vloeistof wat in die sensor gebruik gaan word. Vir water byvoorbeeld is dit ongeveer 3 sekondes by kamertemperatuur en dit sal toeneem met toenemende temperatuur.

Die presessie sein sal eksponensieel met tydkonstante T_2 wegsterf slegs vir die geval waar die magnetiese veld H ruimtelik hoogs homogeen is. In die praktyk geld hierdie voorwaarde egter nie en tree 'n tydkonstante $T_2^* < T_2$ op. Grivet en Malnar¹⁰ gee die volgende verwantskap:

$$1/\gamma_p T_2^* \approx \langle \delta H^2 \rangle^{1/2}$$

waar $\langle \delta H^2 \rangle^{1/2}$ die effektiewe waarde van die ruimtelike variasie van die magnetiese veld in die volume van die vloeistofmonster is.

'n Ander faktor wat reeds genoem is en wat die duur van die presessie sein merkbaar kan verkort, is die oorblywende magnetisering van die sensor wat bepaal word deur die tipe draad wat vir die sensor gebruik word.

3. DIE BEPALING VAN DIE PRESESSIEFREKWENSIE

Gewoonlik word twee metodes gebruik om die frekwensie van presessie van die magnetiese momente van die protone te meet: die metode van periode-

meting en die metode van frekwensiemeting. In die eerste geval word die aantal periodes van 'n sein met standaardfrekwensie getel oor 'n tyd wat gelyk is aan 'n vaste veelvoud van periodes van die presessiesein. In die tweede geval word die frekwensie van die presessiesein vermenigvuldig met 'n vaste veelvoud en die aantal periodes daarvan in 'n standaardtyd getel. Beide hierdie metodes is onderworpe aan dieselfde tipe foute, alhoewel die uitwerking daarvan verskillend mag wees. Die invloed van die tipiese foute op die metode van periode-meting word hier ondersoek. Vir die betrokke geval word die grootte van die gemete veld H gegee deur:

$$H = \frac{2\pi}{\gamma_p} N_s \frac{f_v}{N_v} \quad (4)$$

waar die betrokke simbole die volgende betekenis het:

γ_p is die giromagnetiese verhouding van die proton;
 N_s is die aantal periodes van die presessiesein wat die meettyd (T_m) bepaal;
 f_v is die frekwensie van die verwysingsossillator en
 N_v is die aantal periodes van die verwysingsein getel tydens die meettyd (T_m).

Vanuit vergelyking (4.1) volg dat die relatiewe fout in die meting van H gegee word deur die volgende verwantskap:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta \gamma_p}{\gamma_p} + \frac{\Delta f_v}{f_v} + \frac{\delta f_v}{f_v} + \frac{\Delta N_v}{N_v} + \frac{\Delta N_s}{N_s} \quad (5)$$

Die eerste term ($\Delta \gamma_p / \gamma_p$) is reeds bespreek en die ander kan soos volg hanteer word:

3.1 Die frekwensie f_v van die verwysingsossillator

Die frekwensie van die verwysingsossillator kan die noukeurigheid van die lesing op twee wyses beïnvloed:

Die term $\delta f_v / f_v$ beskryf die relatiewe fout as gevolg van die onstabiliteit van die frekwensie van die verwysingsossillator.

Die relatiewe afwyking van die standaardfrekwensie vanaf sy nominale waarde word gegee deur $\Delta f_v / f_v$.

Beide bogenoemde faktore kan 'n relatiewe fout lewer van die orde $0,1 \times 10^{-6}$.

3.2 Pulstelling N_v

ΔN_v is die fout wat voorkom as gevolg van die foutiewe telling van die aantal periodes van die verwysingsein. Hierdie fout beloop gewoonlik ± 1 telling soos verwag kan word van 'n diskrete telstelsel.

N_v word gegee deur $T_m f_v$. Met 'n meettyd van $T_m = 3s$ en $f_v = 100kHz$ is $N_v = 3 \times 10^5$. Dan is

$$\Delta N_v / N_v = 0,33 \times 10^{-5}$$

3.3 Bepaling van die meettyd T_m

Soos reeds genoem, word die meettyd of telyd bepaal deur die voorkoms van 'n vaste aantal periodes van die presessiesein.

$$T_m = N_s / f_s$$

f_s is die frekwensie van die presessiesein.

$\Delta N_s / N_s$ is die relatiewe fout in die telling van die aantal presessieperiodes. Hierdie term lewer die grootste bedrae tot die fout $\Delta H / H$ en is 'n funksie van die sein-ruis-verhouding A , die stabiliteit van die drumpelspanning van die diskriminator van die periodeteller, die telyd en die noukeurigheid waarmee die sensor op die presessiefrekwensie ingestem is. Primêr word hierdie probleem veroorsaak deur die fase-onstabiliteit van die presessiesein as gevolg van die invloede van ongewenste seine soos genoem in paragraaf 2.

Die term $\Delta N_s / N_s$ word gegee deur die uitdrukking¹¹

$$\frac{\Delta N_s}{N_s} = \frac{1}{A_o \omega_s T_m} \frac{1 + \exp(T_m / T_2^*)}{1 - \exp(-T_p / T_1)} \quad (6)$$

A_o is die sein-ruis-verhouding aan die begin van die meetsiklus;

ω_s is die presessiehoekfrekwensie;

T_m is die meettyd soos voorheen gedefinieer;

T_2^* is die tydkonstante waarmee die presessiesein uitsterf;

T_p is die polarisasietyd;

T_1 is die longitudinale ontspanningstydkonstante.

Vergelyking (6) kan sinvol hanteer word indien die volgende vervangings gedoen word:

$$D = 1 - \exp(-T_p / T_1) \text{ en } x = T_m / T_2^*$$

Dan volg:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N_s}{N_s} &= \frac{1}{A_o \omega_s T_2^* D} \frac{(1 + \exp x)}{x} \\ &= \frac{1}{A_o \omega_s T_2^* D} f_1(x) \end{aligned} \quad (7)$$

Die teller in vergelyking (6) word verkry deur die foute aan die begin en einde van die telyd bloot algebraïes te sommeer. Aangesien ruis aan die begin en einde nie gekorreleer is nie, is dit meer korrek om foute as gevolg van ruis te kombineer op die basis van die wortel van die gemiddelde kwadraat van die individuele waardes. Met hierdie veronderstelling word vergelyking (7) soos volg aangepas:

$$\frac{\Delta N_s}{N_s} = \frac{1}{A_o \omega_s T_2^* D} \frac{[1 + \exp 2x]^{1/2}}{x}$$

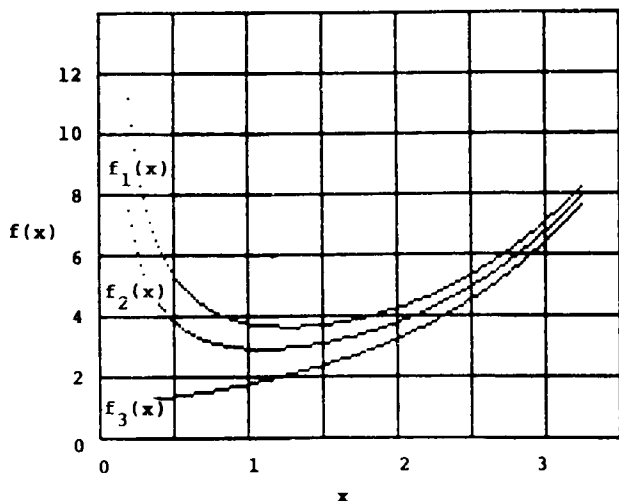
Laasgenoemde vergelyking kan vereenvoudig word deur 'n reeksuitbreiding. Terme hoër as tweede orde word verontagsaam. Dit lewer

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N_s}{N_s} &= \frac{1}{A_o \omega_s T_2^* D} \frac{\exp x}{x} \\ &\left[1 + \frac{\exp(-2x)}{2} - \frac{\exp(-4x)}{4} \right] \\ &= \frac{1}{A_o \omega_s T_2^* D} f_2(x) \end{aligned} \quad (8)$$

Vervolgens word die invloed van elke parameter in die vergelyking vir $\Delta N_s/N_s$ bespreek.

Die waarde van ω_s is vas vir 'n gegewe magnetiese veld.

Die deler $D = 1 - \exp(-T_p/T_1)$ kan gemaksimeer word deur $T_p > T_1$ te kies. Normaalweg is T_p ongeveer 1,5 tot 3 keer die waarde van T_1 .



FIGUUR 1: Die invloed van die meettyd en die drumpelspanning op die relatiewe sein-ruis-verhouding van die presessie-ein. Sien paragrawe 3.3 en 3.4 vir die definisie van $f_1(x)$, $f_2(x)$ en $f_3(x)$.

Die waardes van $f_1(x)$ en $f_2(x)$ teenoor x word getoon in figuur 1. Soos verwag kan word, gee $f_2(x)$ 'n meer optimistiese verloop. $f_2(x)$ bereik 'n minimum waarde vir x net groter as een en oorskry nie die minimum waarde met meer as 20% in die interval 0,6 tot 1,9 nie. Die optimum waarde vir meting is dus $0,6 < x < 1,9$ omdat 'n verdere toename in die meettyd nie die fout verminder nie, terwyl die waarskynlikheid van voorkoms van ruispeike groter word met toename in tyd.

Vir 'n gekose optimum meettyd sal die fout afneem as die produk $A_0 T_2^*$ toeneem. 'n Toename in A_0 vereis 'n toename in die hoeveelheid presessievloeistof, polarisasiestroom, versterker-ingangsimpedansie, sensor kwaliteit en stel streng eise aan die ontwerp. Indien die vereistes dit toelaat kan die transversale relaksasietydkonstante T_2 verhoog word deur die keuse van 'n geskikte vloeistof. Neem die volgende syfers as voorbeeld: Gestel die vereiste fout $\Delta N_s/N_s$ is 7×10^{-6} . Dit stel 'n onsekerheid van ongeveer 0,2 nT voor. Vir $T_p = 2T_1$ is $D = 0,87$. As $x = 1$ moet $A_0 T_2^* = 48$. Vir $T_2^* = 3s$ vereis dit 'n $A_0 = 16$, wat realisties is. Om 'n $T_2^* = 3s$ te verkry moet 'n vloeistof met $T_2 > 3s$ gekies word omdat enige nie-homogeniteit in die magnetiese veld die verswakking versnel. Vir 'n gradiënt van 150 nT/m oor 'n lineêre dimensie van 5 cm word 'n T_2 van ongeveer 6s vereis vir 'n T_2^* van 3s.

3.4 Die drumpelspanning van die diskriminator van die periodeteller

'n Verdere bydrae tot die fout $\Delta N_s/N_s$ is die eindige

waarde van die drumpelspanning van die diskriminator van die periodeteller, omdat die amplitude van die presessie-ein eksponensieel afneem tydens meting. Aan die begin van die meetsiklus word die tydsverskil tussen die aanvang van 'n periode en die bereiking van die drumpelspanning V_d gegee deur

$$\Delta t_{\text{begin}} = \frac{1}{\omega_s} \sin^{-1} \frac{V_d}{V_s}$$

Aan die einde van die meetsiklus word hierdie tydsverskil gegee deur

$$\Delta t_{\text{einde}} = \frac{1}{\omega_s} \sin^{-1} \left[\frac{V_d}{V_s} \exp \frac{T_m}{T_2^*} \right]$$

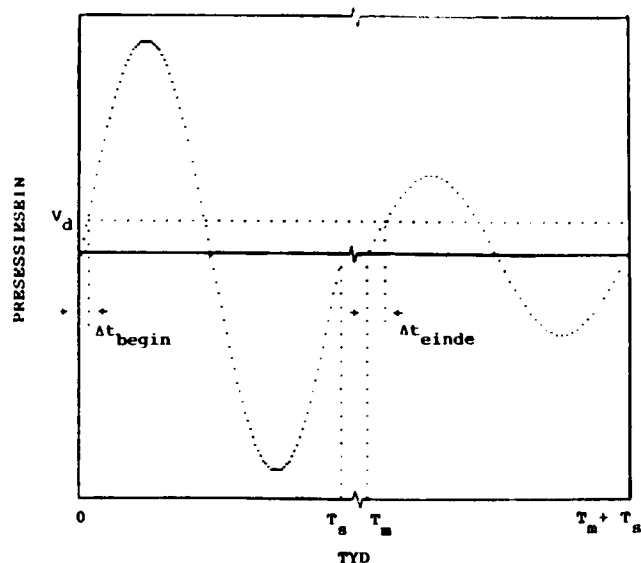
Hierdie verwantskappe kan herlei word uit figuur 2. Omdat Δt_{begin} en Δt_{einde} klein is, kan die $\sin^{-1}$ -funksie geïgnoreer word as eerste benadering en word die fout in die bepaling van die meettyd bereken as

$$\begin{aligned} \Delta t &= \Delta t_{\text{einde}} - \Delta t_{\text{begin}} \\ &= \frac{V_d}{V_s \omega_s} \left[\exp \left(\frac{T_m}{T_2^*} \right) - 1 \right] \end{aligned}$$

Die relatiewe fout is

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N_s}{N_s} &= \frac{V_d}{V_s \omega_s T_2^*} \left[\frac{\exp x - 1}{x} \right] \\ &= \frac{V_d}{V_s \omega_s T_2^*} f_3(x) \end{aligned}$$

Die kromme van $f_3(x)$ word gegee in figuur 1. Die fout kan verminder word deur V_d te verlaag. Vir 'n fout $\Delta N_s/N_s = 3,5 \times 10^{-6}$ en met die ander parameters soos in die vorige voorbeeld, moet $V_d/V_s < 0,08$. Hierdie waarde impliseer dat 'n baie stabiele drumpelspanning benodig word.



FIGUUR 2: Die bepaling van die invloed van die drumpelspanning V_d op die meetfout. Sien paragraaf 3.4.

OPSOMMING EN BESPREKING

Ruis en veral veranderlike magnetiese en elektriese steurings het 'n groot invloed op die werking en die ontwerp van die protonmagnetometer. Ander faktore kan as konstantes beskou word vir 'n gegewe instrument.

Die bepaling van magnetiese veld deur periodemeting is bespreek. Ontleding van foute wat voorkom by die metode van frekwensiemeting kan op 'n soortgelyke wyse uitgevoer word. Die belangrikste wenke vir die optimale funksionering van die periodemeter kan soos volg opgesom word:

Die tyd van meting (T_m) word ongeveer gelyk gekies aan die waarde van T_2^* .

'n Medium met die langste aanvaarbare transversale relaksasietyd (T_2) word gekies.

Die polarisasietyd (T_p) moet ten minste so lank wees as die longitudinale relaksasietyd (T_1).

Die drumpelspanning van die diskriminator moet so klein en so stabiel as moontlik wees.

LITERATUURVERWYSINGS

1. Packard, M. & Varian, R. (1954). Free nuclear induction in

- the earth's magnetic field, *Phys. Rev.*, 89, 941.
2. Poole, C.P. & Farach, H.A. (1971). *Relaxation in magnetic resonance* (Academic Press, New York).
3. McLauchlan, K.A. (1972). *Magnetic resonance* (Clarendon Press, Oxford).
4. Driscoll, R.L. & Bender, P.L. (1958). Proton gyromagnetic ratio, *Phys. Rev. Lett.*, 1, 413.
5. Williams, E.R. & Olsen, P.T. (1979). New measurement of the proton gyromagnetic ratio and a derived value of the fine-structure constant accurate to a part in 10^7 , *Phys. Rev. Lett.*, 42, 1575.
6. Baryshev, V.I. Dekabrun, L.L. Kil'yanov, Yu.N., Kuznetsov, A.A., Poletayev, A.S. & Chelyshev, V.I. (1977). Stationary precision proton magnetometer, *Geomagn. and Aeronomy*, 17, 740.
7. Becker E.D. (1969). *High resolution NMR* (Academic Press, New York).
8. Maksimovskikh & Shapiro, V.A. (1976). High-accuracy T-MP field proton magnetometer, *Geomagn. and Aeronomy*, 16, 231.
9. Rotshteyn, A. Ya. (1969). Influence of variable interferences in field intensity measurements with nuclear-precession magnetometers, *Geomagn. and Aeronomy*, 9, 587.
10. Grivet, P.A. & Malnar, L. (1967). Measurement of weak magnetic fields by magnetic resonance, *Advan. Electron. Electron Phys.*, 23, 39.
11. Fedotov, M.A. & Nagorskiy, D.A. (1971). Errors of a proton magnetometer built on the periodometer principle, *Geomagn. & Aeronomy*, 11, 641.