

Belangrike parameters by die ontwerp van die sensor van die protonmagnetometer

G.P. Hancke

Departement Elektriese Ingenieurswese, Universiteit van Pretoria, Pretoria 0002

Ontvang 24 Oktober 1988; aanvaar 20 Maart 1989

UITTREKSEL

Die suksesvolle werking van die protonmagnetometer berus hoofsaaklik op die eienskappe van die sensor, wat afhanklik is van die keuse van die bepalende ontwerpparameters. Die belangrikste parameters en hulle invloed word bespreek.

ABSTRACT

Important design parameters of the proton magnetometer sensor

The performance of the proton magnetometer depends mainly on the characteristics of the sensor which are determined by some critical design parameters. The most important parameters and their relevance are discussed.

1. INLEIDING

Die sensor is die hart van die protonmagnetometer, aangesien die effektiewe werking van die instrument afhanklik is van die sein-ruis-verhouding van die presessiesein wat die sensor lewer. Dus is die keuse van geskikte sensorparameters baie belangrik vir die optimale ontwerp van 'n protonmagnetometer. Daar moet 'n keuse en kombinasie van verskillende parameters gemaak word sodat 'n maksimum presessiesein in die sensor geïnduseer word, terwyl 'n minimum van steurings en ruis in die sensor opgewek word. Voordat die individuele parameters bespreek word, moet die fundamentele werking ondersoek word.

2. FUNDAMENTELE VERWANTSKAPPE

Vir 'n lang spoel gedompel in 'n vloeistof met kernmagnetiese momente word die amplitude van die presessiesein net na polarisasie gegee deur¹

$$V_s = \frac{(1 + I)}{3} \frac{N \gamma_p^2 h^2}{\pi k T} S_n n H_p \omega, \quad (1)$$

waar die onderskeie simbole die volgende beteken is het:

I is die kernspingetal;

N is die aantal kerne per cm³;

γ_p is die giromagnetiese verhouding van die proton;

h is Planck se konstante;

k is Boltzmann se konstante;

T is die absolute temperatuur;

S_n is die deursnitarea van die sensorspoel;

n is die aantale windinge van die spoel;

H_p is die polarisasieveld en

ω_s is die hoekfrekwensie van presessie.

Verder is bekend dat die effektiewe waarde van die termiese ruis in die detektor gegee word deur²

$$V_r = 2(kT \Delta f R_d)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

k is Boltzmann se konstante;

T is die absolute temperatuur;

R_d is die detektorweerstand en

Δf is die bandwydte van die meetkanaal.

As slegs vergelykings (1) en (2) beskou word, kan gesê word dat vir 'n praktiese protonmagnetometer in 'n spesifieke magneetveld die sein-ruis-verhouding van die presessieein afhanklik sal wees van die volgende veranderlikes:

- Die sensorvloeistof
- die deursnitarea van die sensorspoel
- die aantal windings van die sensorspoel
- die grootte van die polarisasieveld
- die temperatuur
- die weerstand van die spoelgeleier en
- die bandwydte van die meetkanaal.

Elektromagnetiese sturings in die sensorspoel lewer ook 'n belangrike inset tot die sein-ruis-verhouding. Hierdie invloed is onder andere 'n funksie van die sensorgeometrie, soos aangetoon sal word.

3. KWALITATIEWE BESPREKING VAN ENKELE BELANGRIKE PARAMETERS

Die faktore genoem in paragraaf 2 word bespreek onder die volgende hoofde:

3.1 Die sensorvloeistof

Die sensorvloeistof vervul 'n belangrike funksie by die konstruksie van die sensor van die protonmagnetometer. Aanvanklik is die protonbevattende vloeistof geplaas in 'n houder waarom die polarisasiespoel dan gedraai is. Later is besef dat die vloeistof en die volume binne die wikkeling nie ten volle benut word nie. Deesdae is 'n kenmerk van die instrument dat die sensorwikkeling binne die houder met vloeistof geplaas word sodat die wikkeling dus daardeur omring word. Dit is gevind dat die grootte van die presessieein met 50-75% toegeneem het as gevolg hiervan.³ Verder vind die afkoeling van die polarisasiespoel meer effektief plaas te danke aan direkte kontak met die vloeistof.

Die relaksasietye van die sensorvloeistof speel 'n belangrike rol ten opsigte van die meetnoukeurigheid van die protonmagnetometer.⁴ Daar is tot die gevolgtrekking gekom dat 'n vloeistof met relatief lang relaksasietye die betroubaarste resultaat sal lewer. Dit veroorsaak egter dat die periode van meting lank sal wees, omdat die optimum polarisasietyd (T_p) ten minste so lank moet wees as die longitudinale relaksasietydkonstante (T_1) en die optimum meettyd (T_m) ongeveer so lank as T_2^* (wat bepaal word deur die transversale relaksasietyd T_2). Daar bestaan 'n verwantskap tussen die relaksasietydkonstantes en die viskositeit van 'n vloeistof. Bloembergen et al⁵ vind 'n benaderde omgekeerde eweredigheid tussen die twee parameters, soos onder getoon vir enkele vloeistowwe.

Vloeistof (by 20 °C)	Viskositeit (pascal-sekonde)	T_1 (sekondes)
Water	$1,02 \times 10^{-3}$	2,3
Etielalkohol	$1,2 \times 10^{-3}$	2,2
Swaelsuur	25×510^{-3}	0,7
Gliserol	1	0,023

Verder het die relaksasietydkonstantes 'n positiewe temperatuurkoeffisiënt.

Daar is gevind dat die presessie-amplitude nie noemenswaardig verskil vir verskillende vloeistowwe nie. Belyayev et al³ het in 'n reeks metings wat op sensors van protonmagnetometers uitgevoer is, gevind dat die amplitude van die presessieein omtrent dieselfde was vir drie verskillende tipes vloeistowwe, naamlik gedistilleerde water, bensien en oktaan.

3.2 Die grootte van die sensor

Om 'n sensor te verklein hou groot voordeel in, naamlik 'n vermindering in gewig en 'n afname in sy gevoeligheid vir die niehomogeniteit van die magnetiese veld. Verkleining het egter ander implikasies. Uit vergelykings (1) en (2) kan direk waargeneem word dat die sein-ruis-verhouding van die presessieein eweredig is aan die deursnitarea en aantal windings van die spoel. Vir dieselfde sein-ruis-verhouding sal 'n kleiner spoel meer windings vereis om te kompenseer vir die kleiner deursnitarea. Om dit te bereik sal 'n dunner spoelgeleier gebruik moet word met die implikasie van hoër spoelweerstand en gevolglik meer termiese ruis en ook meer polarisasieverliese vir dieselfde polarisasieveld.

3.3 Die geometrie van die sensorspoel

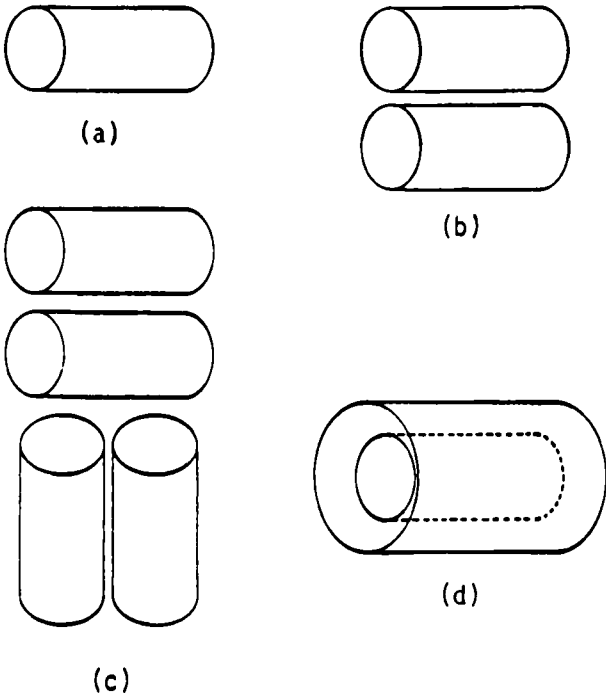
In die literatuur word variasies van hoofsaak drie tipes spoelontwerpe teëgekem, naamlik die silindriese solenoïed, die ellipsoïdale solenoïed en die toroïed.

Figuur 1(a) toon die eenvoudigste vorm bestaande uit 'n enkele silindriese solenoïed. Hierdie sensor het twee basiese nadele: Eerstens is dit baie gevoelig vir sturings, omdat dit eintlik as 'n magnetiese antenna optree. In die tweede plek is dit afhanklik van sy oriëntasie ten opsigte van die magnetiese veld.

Die sturingsgevoeligheid kan verminder word deur twee identiese spoel langs mekaar te gebruik [figuur 1(b)]. Deur die twee gedeeltes serie-opponerend te koppel, sal die presessieeine sommeer, terwyl die geïnduseerde sturingseine sal uitkanselleer. Hierdie metode bring 'n aansienlike verbetering ten opsigte van sturingsgevoeligheid mee, maar sy oriëntasiegevoeligheid is dieselfde, soos vir (a).

Afhanklikheid van oriëntasie kan verminder word (met behoud van sturingsverwerping) deur twee pare soos in (b) loodreg op mekaar te gebruik. [Figuur 1(c)].

Die opstelling getoon in figuur 1(d) berus op 'n ander beginsel as die vorige drie. Een spoel word binne die ander geplaas en ook serie-opponerend gekoppel [soos in (b)]. Die aantal windings op elke spoel is omgekeerd eweredig aan die kwadraat van die diameters. Hierdie konfigurasie is relatief ongevoelig vir sturings en ook minder gevoelig vir niehomogeniteite in die magnetiese veld. Soos in (a) en (b) sal hierdie opstelling ook afhanklik wees van die oriëntasie ten opsigte van

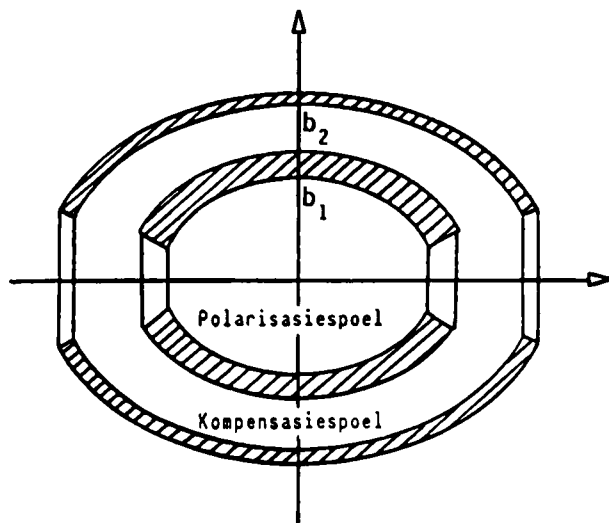


FIGUUR 1: Verskillende konfigurasies van silindriese solenoïdes.

die rigting van die magnetiese veld. Hierdie tipe spoel word volledig deur Blednov⁶ hanteer, tesame met die stelsel van ellipsoïdale solenoïdes.

Die beginsels van laasgenoemde tipe sensor is dieselfde as dié van figuur 1(d), maar daar word aange- toon dat dit 'n kleiner dwaalveld buite die sensor veroorsaak en gevolglik ook minder gevoelig vir steurings van buite is. Figuur 2 toon 'n snit van die sensor.

Die ellipsoïdale stelsel is 'n interessante moontlik- heid, maar die vervaardiging hiervan is omslagtig en duur en toon geen noemenswaardige voordeel bo by- voorbeeld die toroïed nie.



FIGUUR 2: Die koaksiale ellipsoïdale solenoïdes.

Toroïdale solenoïdes is as gevolg van twee inherente voordele aantreklik vir gebruik in protonmagnetome- ters. 'n Toroïed behoort minder gevoelig te wees vir eksterne steurings, omdat dit ekwivalent aan 'n enkele winding met betrekking tot eksterne bronne is. Die magnetiese veld is feitlik totaal gekonsentreer binne die toroïed; gevolglik besit dit 'n lae gevoeligheid ten

opsigte van veranderlike eksterne steuringsvelde. Ver- der het die toroïed 'n voordeel bo die silindriese vorm ten opsigte van oriëntasie-gevoeligheid. Die groot na- deel van die sensor is die moeilike konstruksie daar- van, maar die probleem kan grootliks oorkom word deur die toroïdale spoel op te bou uit verskeie seksies wat in serie gekoppel word.

Belyayev et al³ het 'n reeks metings uitgevoer om vas te stel of die geometrie van die sensorspoel 'n rol speel sover dit die grootte van die presessiesein betref. Die sensors wat hulle getoets het, was of kombinasies van silindriese solenoïdes of die toroïdale solenoïed. Hulle resultate toon geen noemenswaardige verskil tussen die silindriese en toroïdale solenoïdes nie.

3.4 Die temperatuur van die sensor

Verkoeling van die sensor veroorsaak die volgende veranderinge:

- (a) die amplitude van die presessiesein neem toe as ge- volg van 'n toename in die kernmagnetiese sussepi- bilititeit;
- (b) die ruisvlak neem af as gevolg van 'n afname in die temperatuur en weerstand van die sensor- wikkeling;
- (c) Jouleverliese neem af en gevolglik kan 'n groter polarisasieveld aangelê word en
- (d) die relaksasietydkonstantes neem af met afname in temperatuur.

Voordele wat voortspruit uit bogenoemde veranderin- ge is

- (a) 'n toename in meetakkuraatheid;
- (b) 'n uitbreiding van die meetbereik na swakker velde;
- (c) 'n toename in die spoed van meting en
- (d) 'n afname in die grootte van die sensor en gevolglik 'n kleiner gevoeligheid vir enige niehomogeniteit van die magnetiese veld.

3.5 Die polarisasieveld

Die amplitude van die presessiesein is direk eweredig aan die grootte van die polarisasieveld. In die praktiese magnetometer word die grootte van die polarisasi- eveld egter beperk deur sowel die vermoë van die krag- bron (veral by draagbare instrumente) as 'n potensieële temperatuurtoename weens ohmiese verliese.

4. ENKELE EKSPERIMENTELE WAARNEMINGS

Enkele van die invloede wat genoem is, is eksperimen- teel nagevors. Die doel van die eksperimente was hoof- saaklik om te bepaal of die toroïdale ontwerp wel 'n wesentlike voordeel bo die dubbelsilindriese vorm het. Tydens hierdie eksperimente is gebruik gemaak van die sensors soos getoon in figuur 3(a) en (b). Die afme- tings gegee is in mm. Die basiese eienskappe van die sensors is soos volg:

	Silindriese solenoïed	Toroïdale solenoïed
Induktansie (L_d)	≈ 114 mH	≈ 114 mH
Weerstand (R_d)	≈ 49 Ω	≈ 50 Ω
Aantale windinge (n)	≈ 2 600	≈ 2 800
	(1 300 per spoel)	

Polarisasiestroom (I_p)	$\approx 0,5$ A	$\approx 0,5$ A
Polarisasietyd (T_p)	$\approx 2,8$ s	$\approx 2,8$ s
Detektorvloeistof	paraffien	paraffien

Vir die doel van hierdie werk is die toroïdale sensor self vervaardig, terwyl gebruik gemaak is van die dubbelsilindriese sensor en voorversterker van die CHEMTRON MODEL G3 magnetometer.

4.1 Die oriëntasiegevoeligheid van die silindriese sensor
 Die spoele word in 'n PVC-omhulsel geplaas wat met paraffien gevul is en op 'n viermeterhoë paal geplaas is, op so 'n wyse dat die as van die spoele vertikaal is. Die sensor is dan roteer in stappe van 45° en die grootte van die presessiesin is waargeneem. Die resultaat word getoon in figuur 4. Rotasie deur slegs 180° word getoon, omdat die res slegs 'n herhaling sou wees.

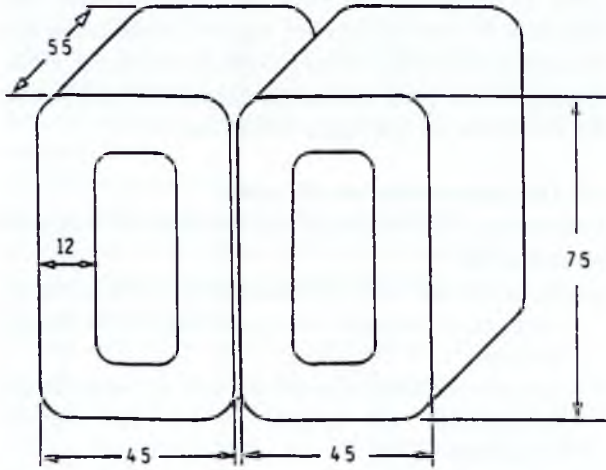


Fig. 3(a)

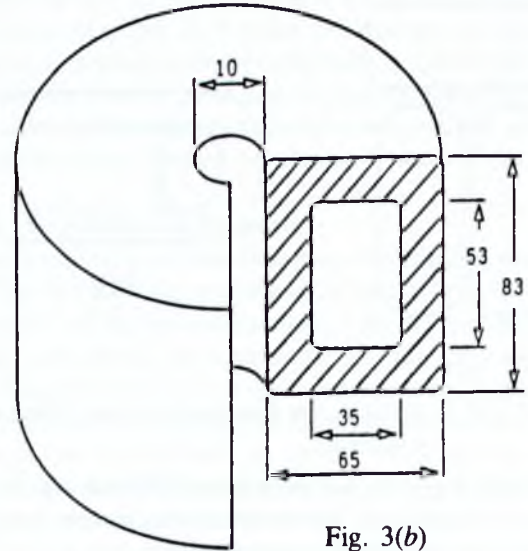
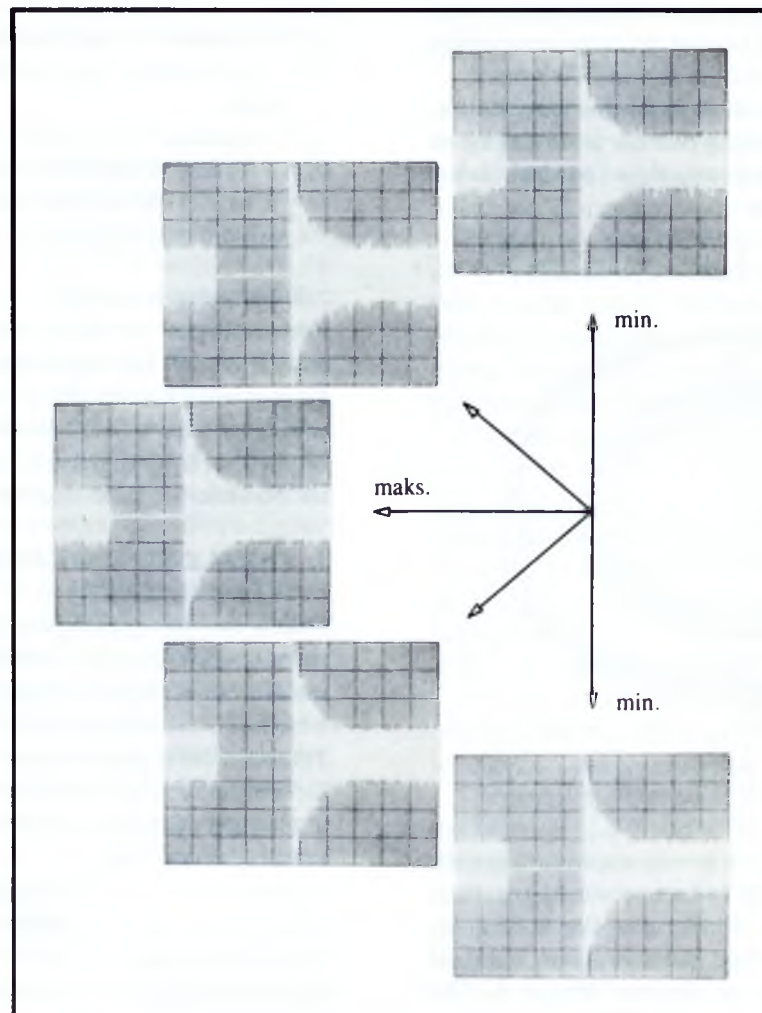


Fig. 3(b)

FIGUUR 3: Die afmetings van sensors vir eksperimentele aanwending (a) silindries tipe (b) toroïed. Afmetings in mm.

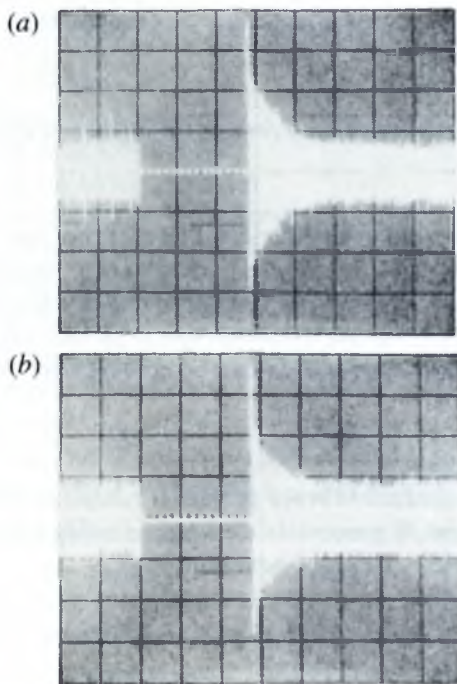


FIGUUR 4: Die oriëntasiegevoeligheid van die silindriese solenoïdes. TYDSKAAL: 1 cm = 1 s.

Soos van die ossilloskoopfoto's gesien kan word, is die instrument relatief ongevoelig ten opsigte van die oriëntasie van die sensor (solank die as van die spoel vertikaal is). Hierdie relatiewe onafhanklikheid van oriëntasie kan toegeskryf word aan die feit dat die polarisasieveld nie so homogeen en rigtinggebonde is soos teoreties aangeneem word vir 'n oneindige lang spoel nie. Verder is daar altyd 'n komponent van die aardveld wat loodreg op die as van die sensorspoel is.

4.2 'n Vergelyking tussen die silindriese vorm en toroïed ten opsigte van sein-ruis-verhouding

Weens die teoretiese ongevoeligheid van die toroïed ten opsigte van eksterne sturings, is die toroïed in hierdie opsig teenoor die silindriese tipe geëvalueer. Die resultate word getoon in figuur 5. Dit dui op 'n effens hoër sein-ruis-verhouding vir die toroïed, omdat die presessie sein effens groter en die ruisvlak effens laer is. Geen dramatiese verbetering kon egter waargeneem word nie.



FIGUUR 5: 'n Vergelyking tussen die presessie sein afkomstig vanaf (a) 'n toroïed (b) silindriese solenoïdes.

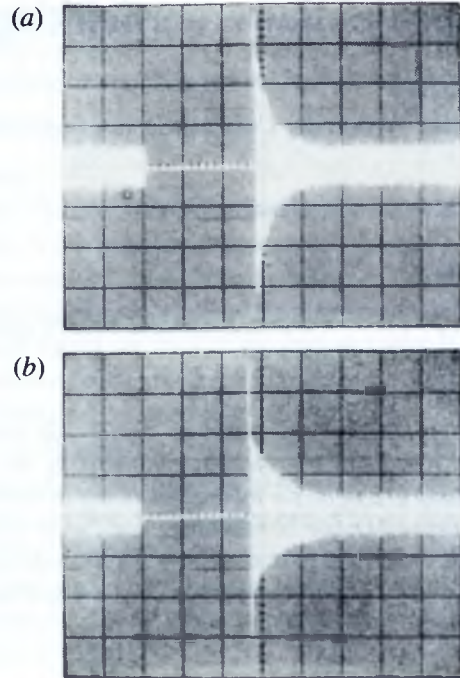
TYDSKAAL: 1 cm = 1 s.

4.3 Temperatuurgevoeligheid

Die presessie sein soos verkry met die dubbelsilindriese solenoïed by normale temperatuur van ongeveer 25 °C is vergelyk met die presessie sein afkomstig van dieselfde sensor by ongeveer 0 °C. Die resultaat word gegee in figuur 6 en dit toon twee belangrike verskille soos verwag kan word: Eerstens is die amplitude van die presessie sein by die laer temperatuur groter en tweedens sterf die sein vinniger weg omdat die relaksasietyd konstantes kleiner is.

5. GEVOLGTREKKINGS

Met die oog op die konstruksie van 'n praktiese magnetometer vir veldgebruik kan die volgende opmer-



FIGUUR 6: Die invloed van die sensortemperatuur op die presessie sein. (a) Sensortemperatuur 0 °C (b) 25 °C.

TYDSKAAL: 1 cm = 1 s.

kings ten opsigte van die ontwerp van die sensor gemaak word:

- Die keuse van sensorvloeistof is nie baie kritiek nie.
- Indien hierdie instrument oor 'n baie wye temperatuur-bereik gebruik gaan word, moet sorg gedra word dat die minimum aanvaarbare sein-ruis-verhouding vir die vereiste tydperk sal voortbestaan. Dit is gevind dat die seinamplitude met toenemende temperatuur afneem, maar dat die relaksasietyd konstantes toeneem met toenemende temperatuur.
- Hierdie ondersoek kon geen regverdiging vind vir die gebruik van die toroïdale sensor nie. Die konstruksie van die toroïed is heelwat moeiliker en die voordeel wat dit teoreties teenoor die silindriese tipe behoort te hê ten opsigte van oriëntasiegevoeligheid en sein-ruis-verhouding, is in die praktyk nie so opvallend nie.
- Daar bestaan 'n optimum grootte vir sowel die sensor as die polarisasieveld, vir die redes genoem.

LITERATUURVERWYSINGS

- Kudryavtsev, V. B., Lysenko, A. P., Pochtarev, V. I., Rotshteyn, A. Ya & Romyantsev, B. I. (1976). Use of deep cooling to improve the characteristics of nuclear-precession magnetometers. *Geomagn. and Aeronomy*, 16, 304-306.
- Connor F. R. (1973). *Noise* (Edward Arnold, London).
- Belyayev, I. I. & Verzhbitskiy, Ye. V. (1980). Proton magnetometer sensors. *Oceanology*, 20, 726-728.
- Fedotov, M. A. & Nagorskiy, D. A. (1971). Errors of a proton magnetometer built on the periodometer principle. *Geomagn. and Aeronomy*, 11, 641-643.
- Bloembergen N., Purcell E. M., Pound R. V. (1948). Relaxation effects in nuclear magnetic resonance absorption. *Phys. Rev.*, 73, 679-712.
- Blednov V. A. (1972). Electromagnetic systems of noiseproof nuclear precession sensors. *Geomagn. and Aeronomy*, 12, 835-837.