

## ПРОГРАМИРУЕМ МОРСКИ ПРОТОНЕН МАГНИТОМЕТЪР

*Веселка М. Маринова, Асен Н. Кръстев*

*Институт по океанология, БАН (Варна)*

Изучаването на земното магнитно поле е ключ към разкриването на много явления и процеси, протичащи на нашата планета. Резултатите от магнитните изследвания намират широко приложение в много научни области. Това обуславя необходимостта от разработване на надеждна измервателна апаратура чрез използване на последните постижения на електрониката и микропроцесорната техника. За морски измервания тези прибори трябва да отговарят на множество изисквания, най-важните от които са : надеждност, чувствителност, голяма точност и стабилност, простота на обслужване и нагледна регистрация на измерваните параметри.

Протонните магнитометри са най-перспективните прибори за измерване на геомагнитното поле при морски геофизични изследвания. Те позволяват определянето на модула на магнитното поле на Земята с максимално възможна точност. В последно време се появиха нови разработки на квантови магнитометри, превъзхождащи по този параметър протонните. Квантовите магнитометри обаче се оказват неподходящи за работа в морски условия поради силното влияние

на ориентацията на датчика в измерваното поле върху точността на измерване и по-голямата консумирана мощност.

Протонните магнитометри нямат движещи се части, дават абсолютна и относителна висока разрешаваща способност. Ориентацията на датчика не влияе върху точността на измерването. Принципът им на действие се основава на ядрено-прецесиалния метод. Те използват прецизността на въртене на протоните или ядрата на водородните атоми в проба от хидрокарбонатна течност, с помощта на която се извършва измерване на общата магнитна интензивност. Въртящите се протони в проба от вода, керосин, октан, алкохол и др. се държат като малки въртящи се диполи. Тези магнитчета са временно подредени или поляризирани чрез прилагане на хомогенно магнитно поле, създадено от ток в бобина. При прекъсване на тока, спинът на протоните ги кара да прецисират в посоката на земното магнитно поле в по-голяма степен, отколкото в посоката на гравитационното поле. Прецесиращите протони генерират слаб сигнал в същата бобина, която се използва за поляризирането им. Чес-

тотата на този сигнал е точно пропорционална на интензивността на общото магнитно поле и не зависи от ориентацията на бобината (датчика на магнитометъра). Пропорционалната константа, която свързва честотата на сигнала с интензивността на магнитното поле, е известната атомна константа - жиромагнитното отношение на протона:  $\gamma_p = 0,2675 \text{ Hz/nT}$ .

Честотата на прецесия на протона  $\omega$  зависи от атомната константа  $\gamma_p$  и магнитната индукция  $B$  на геомагнитното поле (ГМП). Стойността на  $\omega$  се определя по формулата

$$(1) \quad \omega = \gamma_p B$$

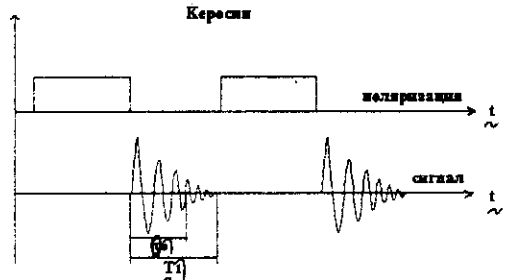
Същността на метода на свободната ядрена прецесия се състои в това, че магнитните моменти на протоносъдържащото вещество се поляризират с достатъчно силно постоянно магнитно поле с вектор на индукцията  $B_0$ , ориентиран в равнина, несъвпадаща с посоката на вектора на магнитната индукция  $B$  на ГМП. След изключване на полето с вектор на магнитната индукция  $B_0$ , магнитните моменти  $\mu_i$  на протоните на протоносъдържащото вещество започват да прецесират относно вектора  $B$  с честота  $\omega$ . Тъй като прецесията на магнитните моменти  $m_i$  на всички протони се извършва синфазно, то сумарният магнитен момент ще бъде равен на тяхната сума -  $M = \Sigma \mu_i$ . Векторът  $\mu$  също прецесира около вектор  $B$  с честота  $\omega$ . В резултат на прецесията в намотките на магниточувствителния елемент - МЧЕ (датчик) ще се индуцира електродвижеща сила (ЕДС), определяща се по формула - та

$$(2) \quad E = E_0 \sin(\omega t + \alpha),$$

където:  $E_0$  е ЕДС на поляризацията;  $t$  - времето на прецесия;  $\alpha$  - началната фаза на прецесия на вектора  $M$ .

Амплитудата на сигнала на свободната прецесия на протоните ще намалява по експоненциален закон с константа на времето  $T_1$  - наречена време на спин-спинова релаксация (фиг.1).

Времето  $T_1$  за дестилирана вода, спирт, керосин и октан е равно на 2-3 s. Процесът на измерване на ГМП по метода на свободната ядрена прецесия е дискретен, вследствие от необходимостта от предварителна поляризация на протоносъдържащото вещество. Цикличността (дискретността) на измерване се определя въз основа на сумарното време на поляризация на веществото и измервания сигнал на прецесия на протоните.

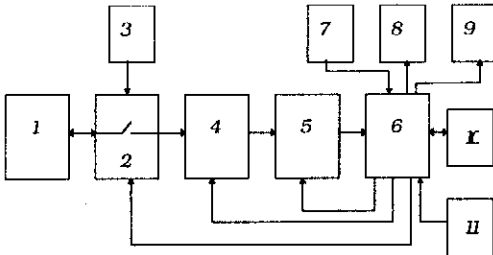


Фиг. 1. Графично представяне на измерението на сигнала на свободната прецесия на протоните по експоненциален закон

От фиг.1 се вижда, че стойността на сигнала, а следователно и отношението сигнал/шум ще бъдат най-големи в началния период на свободната ядрена прецесия. Затова времето за измерване  $\tau_m$  на честотата  $\omega$  се избира по-малко от  $T_1$ .

В Института по океанология при БАН бе разработен програмируем морски протонен магнитометър ПМММ 001 за изследване на магнитните аномалии в басейна на Черно море. Той използва метода на свободната ядрена прецесия за измерване на магнитната индукция на геомагнитното поле. Новото в тази

разработка и нейно съществено преимущество е, че процесът на измерване и съхранение на резултатите е напълно автоматизиран. Осигурена е възможност за допълнителна обработка на записаните данни с персонален компютър. Чрез използване на подходящи графични програми се изработват карти въз основа на получените данни, които се изчертават на плотер.



Фиг. 2. Обобщена блок - схема на магнитометъра

Общата блокова схема на протонния магнитометър ПМПМ 001 е показана на фиг.2, където: 1 - индуктивен датчик; 2 - комутатор; 3 - управляващ източник на поляризация; 4 - прецизен резонансен усилвател; 5 - умножител; 6 - управляващо устройство; 7 - блок за управление; 8 - цифрова индикация; 9 - електронен часовник; 10 - интерфейсен блок RS 232; 11 - захранващ блок.

Магнитната индукция на ГМП с помощта на магнитометъра ПМПМ 001 се измерва чрез прочитане на периодите  $N$  на ядрената прецесия за някакво фиксирано време  $\tau_0$  (време на измерване). За да се получи информацията за ГМП непосредствено в приетите единици за измерване (nT), броят на периодите на ядрената прецесия се умножат с постоянен коефициент  $m$ . В този случай броят на периодите на прецесията  $N$  е величина пропорционална на измерваната магнитна индукция на ГМП (nT) и ще бъде равна на

$$(3) \quad \begin{aligned} N &= m f_c \tau_0 \\ \text{или} \quad N &= m B \tau_0 / k, \end{aligned}$$

където:  $m$  е коефициент на умножение;  $f_c$  - измерваната честота на полезния сигнал;  $\tau_0$  - време за измерване на честотата (s);  $B$  - магнитна индукция на ГМП (nT);  $k = 2\pi/\gamma$  - коефициентът на преобразуване на честотата на прецесия ( $K = 23,4874$  nT/Hz).

За умножаване се използва система с автонастройка на честотата (ФАПЧ) с включване на делител във веригата за обратна връзка, при това на един от входовете на фазовия детектор постъпва усиленият и формиран сигнал на ядрената прецесия, а на втория (чрез съответствания делител на честота) - сигнал от управляващия генератор, честотата на който е приблизително  $m$  пъти по-голяма от честотата  $f_c$ . При неравенство на тези честоти сигналът на разсъгласуване, изработван от фазовия детектор, ще се настройва на честотата на управляващия генератор, докато сравняваните честоти станат равни, т.е.  $f_s = m \cdot f_c$ . По такъв начин управляващият генератор ще бъде синхронизиран с честотата на сигнала, а собствената му честота ще бъде  $m$  пъти по-голяма от честотата на сигнала на прецесия. Коефициентът на умножение е кратен на двете. За постигане на висока чувствителност на прибора в широк диапазон на измерваното поле се използва селективна настройка на входната верига на усилвателя.

Протонният магнитометър ПМПМ 001 позволява измерване на магнитната индукция в диапазона от 20 000 до 70 000 nT.

Основната грешка от измерването, в общия случай, се определя от съотношението

$$(4) \quad U = \Delta_{\text{осн}} + \delta_{\text{осн}},$$

където:  $\Delta_{\text{осн}}$  е систематичната съста-

вяща на основната грешка;  $\delta_{\text{осн}}$  - случайната съставляща на основната грешка.

Систематичната съставляща зависи от степента на съответствие между техническите характеристики на прибора (честота на опорния кварцов генератор, време на измерване и др.) и изходното физическо съотношение -  $\omega = \gamma_p B$ .

Систематичната съставляща на основната грешка на прибора в указания диапазон не превишава  $1nT$ .

Случайната съставляща на основната грешка се определя и ограничава от нивото на входния сигнал, точното отношение сигнал/шум на входа на първичния преобразовател на прибора. Средноквадратичната стойност на  $d_{\text{осн}}$  е от порядъка на  $0.1 - 0.2 nT$ .

В реални, морски условия на работа (при непрекъснато изменение на положението на буксируемата гондола по крсна и диферентна) грешката при измерване нараства. Тази допълнителна грешка  $\delta_{\text{дон}}$  е свързана с колебанията (въртенето) на датчика спрямо посоката на измерваното магнитно поле и се определя от съотношението

$$(5) \quad \delta_{\text{дон}} = 2\pi F / \gamma_p,$$

където:  $F$  е честота (Hz) на механичните колебания на датчика в процеса на измерване;  $\gamma_p$  - жиромагнитното отношение на протона.

Тя се намалява до минимум чрез използване на първичен преобразовател (датчик) с чувствителна бобина, със сърцевина във формата на тороид.

Допълнителната грешка на прибора, предизвикана от изменението на температурата на околната среда не превишава  $1 nT$ .

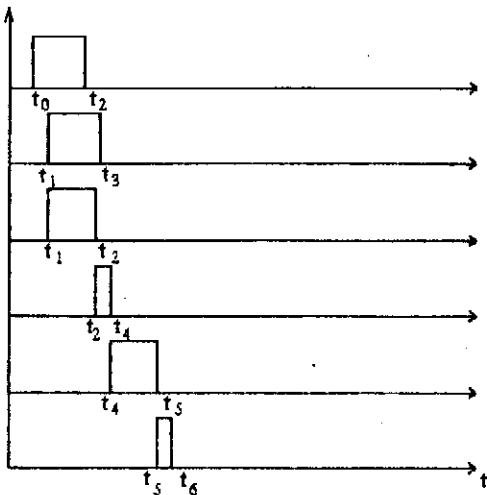
Датчикът (магниточувствителен елемент) с предназначен да изработва сигнал, характеризиращ стойността на интензивността на ГМП, и да го предава на корабния блок на магнитометъра. Магниточувствителният елемент и ра-

ботната течност са поместени в гондола, чийто корпус е изработен от немагнитен материал - стъклоровинк и представлява херметизиран цилиндър. Датчикът се явява първичен преобразовател на индукцията на магнитното поле в честота. При измервания датчикът се отделя от носителя на апаратурата на разстояние, равно на дължината на буксируемия кабел с цел изключване влиянието му върху магнитната маса и променливите магнитни полета. За да се намали зависимостта на стойността на полезния сигнал от ориентацията на датчика спрямо посоката на вектора на магнитната индукция  $B$ , намотката му е изпълнена във вид на тороидална бобина. Оста на бобината съвпада с оста на корпуса. Получената информация във вид на слаб сигнал със синусоидална форма и с амплитуда от няколко микроволта се подава по скраниран, немагнитен кабел на приемното устройство на корабния блок.

Управляващото устройство с изградено на базата на микропроцесор MC146805E2, изпълняващ 61 инструкции за аритметични, логически и управляващи операции. Максималната му тактова честота е  $5 \text{ MHz}$ , при което средното време за изпълнение на една инструкция е  $1 \text{ ms}$ .

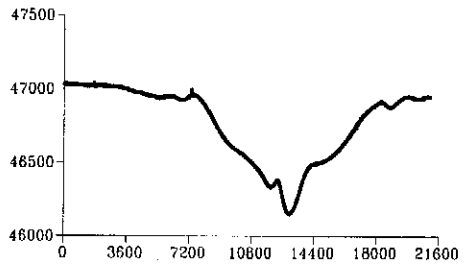
Комутаторът по сигнал от управляващото устройство периодично включва източника на поляризация към датчика. Времето за поляризация зависи от цикъла на измерване и се избира от  $0.4 \text{ s}$  при цикъл 1 и 3 s до  $5 \text{ s}$  при цикъл 10, 20 и  $60 \text{ s}$ . След завършване на поляризацията датчикът се превключва към усилвателя, на входа на който има настроиващи кондензатори. Те заедно с намотката на датчика образуват трептящ контур, честотата на който се избира близка до честотата на сигнала. Това позволява да се увеличи амплитудата на сигнала и да се повиши отношението сигнал/шум. След усилването, формира-

ният сигнал постъпва на умножителя и се умножава 512 пъти. По сигнал от управляващото устройство той се стробира и постъпва на брояч, който предварително е нулиран. Стробът се избира с такава дължина, че резултатът от измерването да бъде непосредствено в пТ. По команда „Запис“ от управляващото устройство информацията в паралелен вид постъпва в паметта на индикация-



Фиг. 3. Профил Созопол - Емине

та и се изобразява върху седемсегментна индикатор. Едновременно с това информацията от паметта на индикацията постъпва на 8-входовите буфери и по сигнал от микропроцесора паралелно на три групи се прочита стойността на магнитната индукция на ГМП. Тя се записва в RAM памет, изградена на базата на стандартните полупроводнико-



Фиг. 4

ви памети - МС6116. В същия момент в RAM паметта се записва и астрономическото време на измерването на ГМП. По команда на оператора събраната информация се прехвърля към персонален компютър чрез интерфейс RS232 за допълнителна обработка и съхранение.

Първите изпитания на програмируемия морски протонен магнитометър ПМПМ 001 в експедиционни условия бяха проведени по време на 20 рейс на НИК „Академик Петровски“ на МГУ „Ломоносов“ от 13.08 до 27.08.1990г. В процеса на работа се установени, че върху надеждността на комутацияния блок влияе високата температура на околната среда. След експедицията този проблем бе отстранен чрез увеличаване на охлаждащата повърхност на комутатора.

През септември 1990г. бс проведена международна експедиция „Емине 90“ с НИК „Академик“, по време на която бяха извършени измервания на магнитното поле в района на Черно море. На фиг.3 са представени във вид на графика получените данни за магнитното поле на изследвания полигон.

## Литература

Б е л я е в, И. 1979. Морской протонный магнитометр МПМ-5. Океанология (М.), XIX, вып. I, 178 - 180. Б е л я

е в, И., Е. В. В е р ж б и ц к и й. 1980. Датчик протонных магнитометров. Океанология (М.), XX, вып. 6, 1103 -

1106. Вандер, С. С., Ю. Д. Долинский, К. К. Поляков. 1977. Преобразователь частота-код для ядерного магнитометра. Геофизическая аппаратура, вып.60, 200 - 203. Воробьев, Н. В. 1984. Микропроцессоры. М., Высшая школа. Галкин, В. Н. 1974. Полевые транзисторы в чувствительных усилителях. Л., Энергия. Декабрун, Л. Л., А. А. Кузнецов, А. С. Полетаев.

1974. Датчик протонных магнитометров. Геофизическая аппаратура, вып. 54, с. 27. Студенцов, Н. В. 1981. Определение гиромангнитного отношения протона в слабом магнитном поле. Вычислительная техника, №6, с. 56. Врейнер, S. 1973. Applications manual for portable magnetometers. U.S.A., California. EG&G Geometrics. 1982. Geophysical survey instrument catalog.

## **Programmable marine proton magnetometer**

*Vesselka M. Marinova, Assen N. Krastev*

### **(Summary)**

The article describes a programmable marine proton magnetometer PMPM 001 designed at the Institute of Oceanology - Bulgarian Academy of Sciences for measuring of magnetic anomalies in the Black Sea region. A block scheme and a

Time-diagrams of the magnetometer are shown. The nuclear-precessional measuring method lying at the basis of operation of the magnetometer is explained. Experimental results from tests during research expeditions are applied.

*Постъпила на 21.03.95 г.*