

**МАГНИТОМЕТР ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ  
MAGNETOMETER FOR EXPERIMENTAL STUDY OF EARTHQUAKES PRECURSORS**

В. Проненко

Львовский центр Института космических исследований НАН и НКА Украины, pron@isr.lviv.ua

*Induction coil magnetometers (IM) are widely used for the experimental study of natural and man-made magnetic fields variations in the frequency band from  $\sim 10^{-4}$  till  $\sim 10^6$  Hz for science and engineering applications in land and space conditions. They are probably the most widespread devices used for the magnetic field study. Certainly, different application areas impose different requirements to the main IM parameters. For the study of natural magnetic field variations of ionospheric and magnetospheric origin usually ultra low frequency (ULF) band (0.001-3 Hz) is used. IM sensors for ULF band usually have length 0.8-1.2 m, diameter 10-15 cm and weight few kilograms with SND 0.1-200 pT/Hz<sup>0.5</sup>. Specially for EQ monitoring the IM set named LEMI-30 intended for the study of magnetic field fluctuations in the frequency band 0.001 ... 30 Hz in land conditions was designed. It is ideal for ULF signals monitoring and can be used both as a part of the computer measuring and registration equipment and autonomously with any digital recorder. It has embedded communication unit (CAM unit), which connects the sensors to PC and provides their power supply, satellite synchronization of data sampling and digitizing. Their additional advantage is extremely high suppression of 50 (60) Hz mains noise what allows their using close to the living areas. The peculiarities of the design of induction magnetometer LEMI-30 and experimental results are discussed.*

### Введение

Изучение предвестников землетрясений ведется во всем мире. Рядом авторов показано, что часто перед землетрясениями наблюдаются магнитные флуктуации в широком диапазоне частот, которые можно назвать «сейсмомангнитными» (СМ) [1,2]. Наиболее надежно эти сигналы выделяются в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне – от 0.001 до 3 Гц. Магнитные УНЧ предвестники наблюдаются от нескольких недель до часов перед землетрясениями и распространяются достаточно далеко в земной коре (до 100 – 150 км). Однако экспериментальное измерение этих сигналов встречается с проблемами, не позволяющими выделить всю возможную их информативность. Прежде всего, УНЧ сигналы литосферного происхождения обычно очень малы и полностью затеняются сигналами ионосферного и магнитосферного происхождения в этом же диапазоне, значительно превышающими литосферные сигналы по амплитуде. Этот факт требует наличия магнитометров с очень низкой пороговой чувствительностью (ПЧ) и широким динамическим диапазоном. В связи с этим создание магнитометра для регистрации напряженности магнитного поля в полевых условиях, соответствующей всему набору требований к системам перманентного мониторинга СМ сигналов, является актуальной задачей. Особенности построения такого специализированного магнитометра рассмотрены в работе.

### Технические характеристики индукционных магнитометров

Наиболее часто для изучения магнитных флуктуаций в УНЧ-диапазоне применяют индукционные магнитометры (ИМ). ИМ выпускаются во многих странах, в таблице внизу приведены основные параметры для лучших из них [3]. Как следует из этой таблицы, у всех ИМ ПЧ находится практически на одном уровне, поэтому для их выбора с целью мониторинга СМ сигналов следует применить дополнительные критерии.

No	IM	Frequency range, Hz	Sensitivity at flat part of FR	Dimensions, m	Weight, kg	Sensitivity threshold $B_{th}$ , nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
1	MTC-50	$2 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^2$ 3 dB (0,2÷10)	1 V/nT	l=1,41; d=0,06	10,5	$1 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$ Hz $3 \cdot 10^{-4} - 1$ Hz $1 \cdot 10^{-4} - 10^2$ Hz	[4]
2	BF-4	$10^{-4} \div 10^3$ 3 dB (0,2÷500)	0,3 V/nT	l=1,42; d=0,06	7,9	$2 \cdot 10^{-1} - 10^{-3}$ Hz $8 \cdot 10^{-5} - 1$ Hz $2 \cdot 10^{-5} - 10^3$ Hz	[5]
3	ANT/4	$5 \cdot 10^{-4} \div 10^3$ 3 dB (0,3÷1000)	100 mV/nT	l=1,38; d=0,048	6,2	$0.2 - 10^{-3}$ Hz $1 \cdot 10^{-4} - 1$ Hz $2 \cdot 10^{-5} - 10^3$ Hz	[6]
4	MFS-06	$2 \cdot 10^{-4} \div 10^4$ ( $2 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^2$ with	0,2 V/nT (at f>4 Hz)	l=1,25; d=0,075	8,5	$1 \cdot 10^{-2} - 10^{-2}$ Hz $1 \cdot 10^{-4} - 1$ Hz	[7]

		FB and $10 \div 1 \cdot 10^4$ without FB)				$1 \cdot 10^{-6} - 1000$ Hz	
5	LEMI-120	$10^{-4} \div 10^3$ 3 dB ( $1 \div 1000$ )	200 mV/nT	$l=1,38;$ $d=0,085$	5,8	$1,5 - 10^{-4}$ Hz $1 \cdot 10^{-4} - 1$ Hz $1 \cdot 10^{-5} - 1000$ Hz	[8]
6	LEMI-121	$10^{-4} \div 500$ 3 dB ( $1 \div 500$ )	200 mV/nT	$l=0,56;$ $d=0,085$	4	$12 - 10^{-4}$ Hz $5 \cdot 10^{-4} - 1$ Hz $3 \cdot 10^{-5} - 100$ Hz	[8]

Скорее всего, вес и размеры, учитывая, что, как правило, мониторинг ведется на стационарных пунктах, особого значения не имеет (вопрос стоимости здесь не обсуждается). Дополнительным весьма важным требованием является глубокое подавление возможных помех, прежде всего – сигналов с частотой сети и ее гармоник. Исходя из этого требования, нами проведена разработка специализированного ИМ.

### Специализированный ИМ для мониторинга сейсмомагнитных сигналов.



Специально для мониторинга магнитных сигналов, связанных с землетрясениями, был разработана система ИМ LEMI-30 для измерения вариаций магнитного поля в диапазоне частот 0.001... 30 Гц (фото слева). Он может использоваться как часть компьютерной системы или автономно с любым цифровым регистратором. Полная система LEMI-30 состоит из трех датчиков и блока сбора и передачи данных, который соединяет датчики с ПК и обеспечивает их электропитание, спутниковую синхронизацию и переводение данных в цифровую форму. Передаточные характеристики всех трёх

датчиков LEMI-30 подобны в пределах 0,1 дБ. Дополнительным преимуществом этих ИМ является весьма высокий уровень подавления помех сети 50 (60) Гц, что позволяет их использовать близко к промышленным объектам.

Функциональная схема датчика LEMI 30 представлена на Рис. 1.

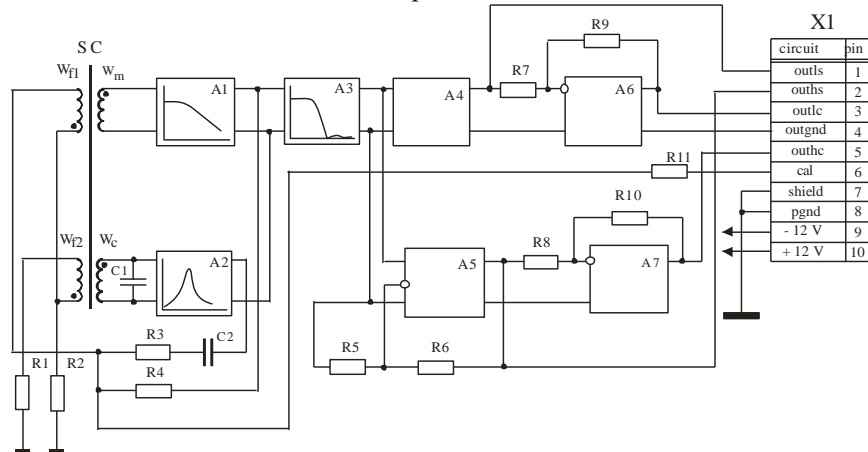


Рис. 1. Функциональная схема индукционного датчика LEMI-30.

Индукционный датчик состоит из сердечника  $SC$ , изготовленного из аморфного сплава с высокой магнитной проницаемостью, основной обмотки  $W_m$ , дополнительной обмотки  $W_c$  и двух обмоток обратной связи  $W_{f1}$  и  $W_{f2}$ . Основная обмотка  $W_m$  соединена со входом малошумящего МДМ (модулятор-демодулятор) усилителя  $A1$ . Обратная связь внутри усилителя  $A1$  устанавливает общий коэффициент усиления на низких частотах.

Выход усилителя  $A1$  через  $R4$  соединен с обмоткой обратной связи по магнитному полю  $W_{f1}$  и дополнительной обмоткой  $W_{f2}$ . Обратная связь по магнитному полю формирует плоский участок кривой передаточной функции магнитометра в полосе частот 1 ... 30 Гц.

Выход А1 подсоединен также к фильтру нижних частот и режекторному фильтру А3, который обеспечивает глубокое подавление частот выше 30 Гц. Выход А3 соединен со входом усилителя А4, который формирует основной выходной сигнал. Выходной инвертор А6 служит для формирования дифференциального выходного сигнала с той же величиной коэффициента передачи. Второй – дополнительный – дифференциальный выход высокого уровня формируется усилителем А5 с коэффициентом усиления 10 и инвертором А7.

Дополнительное подавление шумов на частотах, близких к частоте сети, обеспечивается компенсацией магнитного поля вдоль сердечника датчика через магнитный канал отрицательной обратной связи, который включает в себя дополнительную обмотку канала компенсации  $W_c$ , настроенную конденсатором  $C1$  на частоту 50 Гц, малошумящий селективный усилитель А2, также настроенный на 50 Гц, и цепь обратной связи  $C2-R3-R1-W_{f1}-R2-W_{f2}$ . Правильный выбор коэффициента усиления А2 и параметров цепи обратной связи позволяют скомпенсировать измеряемое магнитное поле вдоль  $W_m$  на частоте  $(50 \pm 1)$  Гц до 30 раз. В результате общее подавление шумов на частоте близкой к 50 Гц составляет более 60 дБ, что обеспечивает измерение достаточно малых сигналов на фоне значительных 50 Гц помех.

В состав LEMI-30 входят три ИМ и система оцифровки и связи с компьютером. Каждый из трех ИМ имеет следующие параметры:

Частотный диапазон измеряемых сигналов	0.001..30 Гц
Уровень магнитных шумов на частоте 0.01 Гц 10 Гц	$\leq 20 \text{ пТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$ $\leq 0.03 \text{ пТл} \times \text{Гц}^{-1/2}$
Подавление помехи (50/60±0.2) Гц	>60 дБ
Разрядность АЦП (САМ unit)	24 бит
Потребление полной системы	< 3 Вт
Размеры датчика	870×Ø85 мм
Вес одного датчика	5.7 кг
GPS синхронизация и определение координат	

Амплитудно-частотная характеристика каналов ИМ приведена на Рис. 2,а; их расчетный уровень шумов – на Рис.2,б.

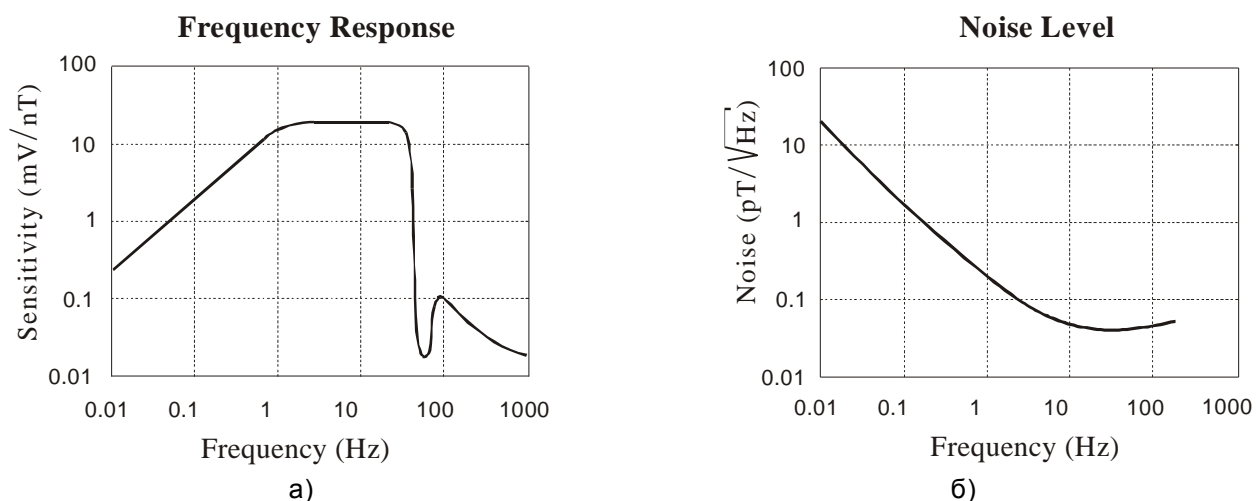


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика (а) и уровень шума (б) LEMI-30.

Для проверки указанных значений в непосредственной близости от жилой зоны были проведены полевые испытания всей системы LEMI-30. График измеренных собственных шумов представлен на Рис. 3. Во время измерений два датчика были установлены в яме глубиной 0,5 м параллельно друг другу на расстоянии 0,5 м. Спектр собственных шумов получен путем вычитания выходных сигналов магнитометров с последующим Фурье анализом.

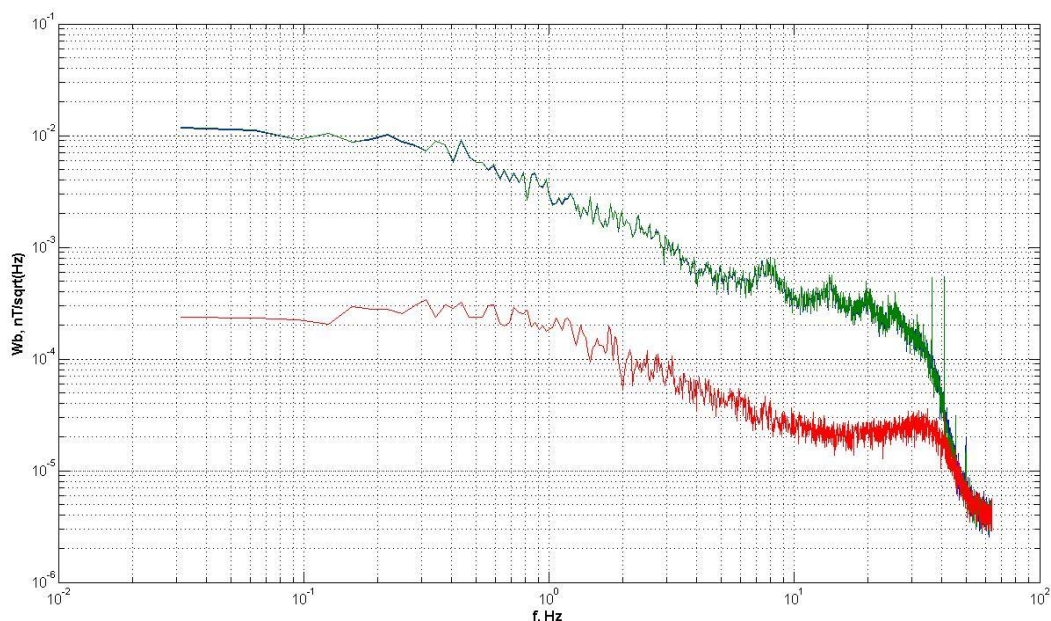


Рис. 3. График собственных шумов ИМ LEMI-30: верхняя кривая – спектры природных сигналов – практически совпадающие выходные сигналы от двух датчиков, расположенных параллельно; нижняя кривая – разность этих сигналов - спектр собственных шумов датчика.

#### Выводы

Технические характеристики ИМ LEMI-30 отвечают характеристикам лучших в мире индукционных магнитометров, в то же время это единственный ИМ со встроенной системой компенсации магнитного поля 50 (60) Гц в сердечнике, что позволяет его использовать вблизи источников промышленных помех.

Проведенные испытания подтвердили отличные параметры этой системы, которая широко используется в нескольких странах для мониторинга сейсмомангнитных сигналов.

Эта работа выполнена при частичной поддержке контракта УНТЦ № 4818.

#### Литература

1. Hayakawa, M., Hattori, K., Ohta, K., Monitoring of ULF (ultra-low-frequency) Geomagnetic Variations Associated with Earthquakes, *Sensors*, **7**, 1108-1122, 2007.
2. Molchanov, O.A., Hayakawa, M., Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing, *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 3091–3094, 1995.
3. Vitalij Nichoga, Eugeniusz Grudziński, Petro Dub, Vira Pronenko Superwide Band Low-Noise Induction Sensors in Magnetic Field Measurements // *Proceedings of the 9th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2008)*, 19-23 February 2008, Lviv-Slavsko, Ukraine, p. 18-21.
4. *Field Sensors Magnetic and Electric, Practical Design for Optimum Productivity*, Phoenix Geophysics Limited 2001, p.2.
5. <http://www.emiinc.com>
6. <http://www.zonge.com>
7. U. Matzander MFS-06. *Product Manual*, Metronix Measurement and Electronics Ltd, 2001, 27p.
8. <http://www.isr.lviv.ua>