

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМОМАГНІТНОГО ВІДПАЛУ АМОΡФНИХ ФЕРОМАГНІТНИХ ОСЕРДЬ ДЛЯ ФЕРОЗОНДОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМАЛЬНОГО ШУМУ

А.А. Марусенков, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН та ДКА України



Наведено результати експериментальних досліджень над зменшенням власних шумів ферозондових перетворювачів, побудованих на осердях з аморфного магнітного матеріалу $Co_{68}Fe_3Cr_3Si_{15}B_{12}$. Проведено вимірювання власних шумів сенсора з осердями, отриманими при різних параметрах термомагнітної обробки. Показано, що при відпалі в діапазоні температур 430...445 °C і в режимі нерегульованого охолодження з постійною часу 400 °C забезпечується мінімальний рівень шумів ферозондів.

The results of the experimental researches for minimizing the own noise level of the flux-gate sensors with the cores based on the amorphous magnetic material $Co_{68}Fe_3Cr_3Si_{15}B_{12}$ are presented. The measurements of the sensor noise level with the cores, which were subjected to the thermo-magnetic treatments with different parameters, are carried out. It is shown, that the annealing at the temperatures 430-445 °C followed by the unregulated cooling with the time constant 400 s provides the minimal noise level of the fluxgate sensors.

Вступ

Підвищення роздільної здатності вимірювання магнітних полів є важливим і актуальним завданням для розробників відповідної апаратури. Це пов'язане з тим, що практика геофізичних досліджень, зокрема пошуки покладів нафти і газу, а також космічні дослідження, медицина тощо, потребують не традиційного рівня чутливості магнітометрів у одиниці або десяти долі нанотесли, а вимагають його підвищення до одиниць пікотесли. Найпоширенішими в практиці магнітометрами є ферозондові магнітометри (ФЗМ), які використовуються переважно для вимірювань постійного магнітного поля та його повільних коливань.

Найважливішим параметром для характеристики якості магнітометрів є рівень магнітних шумів

(МШ). За своєю фізичною природою МШ є паразитними коливаннями, які виникають при періодичному перемагнічуванні осердя ферозондового давача (ФЗД). Саме МШ визначають поріг чутливості сучасних ФЗМ [1, 2].

Як показує практика [3], основним методом досягнення мінімального рівня МШ є вибір магнітного матеріалу осердя та оптимального режиму відпалювання після його виготовлення.

Велика кількість експериментальних і теоретичних досліджень ФЗД та магнітних підсилювачів дозволила визначити співвідношення між рівнем шуму і основними параметрами магнітом'яких матеріалів. Ю. Афанасьєв зробив вичерпний огляд цих залежностей і сформулював набір вимог до матеріалу магнітного осердя давача [1]: мінімально можливі константи магнітострикції і анізотропії; низькі значення індукції насичення, коерцитивної сили і втрат потужності; максимальна початкова проникність; температура Кюрі якомога нижча, але не менша верхньої межі робочого діапазону температур. Крім того, магнітне осердя повинно бути вільним від механічних пошкоджень та напружень і намагнічуватися якнайрівномірніше. Правильний вибір магнітного осердя, яке задовольняє ці вимоги, як правило, забезпечує найменші варіації в енергетичному ландшафті магнітного матеріалу і, отже, низький рівень неоднорідності стрибків Баркгаузена та добру відтворюваність петлі гістерезису від циклу до циклу, що в підсумку дозволяє отримати давач з низьким рівнем власних шумів.

Вибір кристалічних магнітних матеріалів, дослідження і вдосконалення їх магнітних характеристик для застосування у низькопорогових ФЗД та магнітотулаційних перетворювачах описано в багатьох роботах [1, 4–10]. З появою магнітом'яких аморфних матеріалів з'явилася значна кількість досліджень їх застосування у ФЗМ [11–14]. Останнім часом виробництво таких матеріалів організовано і в Україні [15], вже перші дослідження їх якості дали обнадійливі результати для подальшого зниження МШ.

Значний вплив на властивості феромагнітних матеріалів, особливо аморфних, має режим відпалу. Якщо під час відпалу зразок знаходиться в магнітному полі, така процедура називається термомагнітним відпалюванням (ТМВ) і характеризується як параметрами температурного профілю (температурою та часом витримки, швидкістю нагрівання й охолодження), так і характеристиками поля підмагнічення (напрямом поля відносно зразка, амплітудою й частотою напруженості магнітного поля).

Відпал аморфних магнітних матеріалів має значні технологічні переваги над кристалічними феромагнетиками:

- нижчу температуру (300...500 °С замість 800...1200 °С);
- використання атмосфери інертних газів або діоксиду вуглецю замість вакууму чи атмосфери водню;
- ширші можливості модифікації магнітних властивостей залежно від параметрів ТМВ.

Метою проведених досліджень була оптимізація режимів ТМВ осердь ФЗД, виготовлених із перспективних вітчизняних аморфних магнітних матеріалів (за критерієм мінімальних шумів) [15]. На цьому етапі особливу увагу сконцентровано на аморфному магнітному матеріалі $\text{Co}_{68}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$, який має умовне позначення виробника P12-B3.

Методика досліджень та отримані результати

Досліджуваний матеріал виготовлено у вигляді стрічки товщиною 20 мкм і шириною (1,3±0,05) мм. Для проведення досліджень стріч-

ку було порізано на пластини довжиною 40 мм. Відпал проводили для пакетів із 20 пластин за допомогою спеціально створеного термомагнітного устаткування. У процесі відпалу матеріал знаходився в атмосфері інертного газу під дією повздовжнього магнітного поля частотою 0,644 або 1 кГц і напруженістю 5 чи 12 кА/м відповідно. Швидкість нагрівання і час витримки протягом усіх відпалів були однаковими і становили 800 °С/год та 1 год відповідно. Температуру витримки змінювали в межах 400...490 °С. Досліджувані зразки охолоджували в трьох режимах: двох лінійних зі швидкостями зміни температури 100 та 400 °С/год відповідно й одному експоненціальному з постійною часу 400 с під час нерегульованого охолодження. Критерієм якості термомагнітної обробки визначено рівень шумів (РШ) стандартного ФЗД з 2-стрижневим осердям із відпаленого матеріалу. З урахуванням отриманої раніше залежності шуму давача від кількості пластин в осерді, кожна половинка осердя містила по 5 пластин, оскільки подальше збільшення кількості пластин в осерді не приводило до суттєвих змін РШ. Шум давача вимірювали при таких параметрах збудження: частота збудження $f_{\text{ex}}=5$ кГц, амплітуда імпульсу збудження $H_m=1,8$ кА/м, кут відсікання $\alpha=0,3$ рад. Разом із вимірюваннями шуму проводили оцінку початкової магнітної проникності невідпаленого та відпаленого матеріалів. Оцінку магнітної проникності проводили, вимірюючи індуктивність обмотки збудження давача на частоті 10 кГц і при напруженості магнітного поля 0,4 А/м. Результати вимірювань подано в табл. 1.

Таблиця 1

Результати термомагнітної обробки матеріалу P12-B3

№	Параметри ТМВ				Магнітна проникність, відн. од.	Шум, пГл·Гц-1/2		
	Температура, °С	Швидкість охолодження, °С/год	Поле підмагнічування			0,2 Гц	1 Гц	5 Гц
			Частота	Амплітуда				
1	430	400	1 кГц	5 кА/м	58400	13	5,3	2,7
2	445	400			63400	11	4,3	2,6
3	460	400			60900	22	9	5,1
4	475	100			54000	19	8	4,3
5	430	100			62300	10	4,7	2,6
6	490	100			26400	18	8	5
7	445	100			55700	17	8	4,5
8	460	100			55500	19	8,3	5,3
9	475	100			44000	27	13	8
10	415	100			36400	39	17	8,7
11	430	100			48900	17,5	7,5	4
12	445	400			55200	13,5	5,5	3,2
13	445	400	644 Гц	12 кА/м	61700	11	4,7	2,8
14	445	400			61400	12	5,7	3,3
15	415	354			45200	23	10	5
16	430	400			59000	10,5	4,7	2,5
17	445	400			59100	11	4,7	2,5

№	Параметри ТМВ			Магнітна проникність, відн. од.	Шум, пТл·Гц ^{-1/2}			
	Температура, °С	Швидкість охолодження, °С/год	Поле підмагнічування		0,2 Гц	1 Гц	5 Гц	
			Частота					Амплітуда
18	460	400			54100	15,5	7,5	4,5
19	475	400			52900	19	8,5	4,7
20	445	$\tau = 400 \text{ с}^*$			53700	9	4,5	2,5
21	445	$\tau = 400 \text{ с}^*$			50200	9	4	2
22	445	$\tau = 400 \text{ с}^*$			54600	10	4,5	2,5
23	Невідпален.	-	-	-	9010	65	32	20

* постійна часу нерегульованого охолодження

Обговорення результатів

Аналіз отриманих даних показує, що повторюваність результатів відпалу спостерігалася не завжди. Наприклад, у відпалах з номерами 5 і 11, 4 і 9 як рівень шуму, так і початкова магнітна проникність суттєво відрізняються. Причину таких відхилень поки що знайти не вдалося. Назагал спостерігається деяка кореляція між початковою магнітною проникністю та РШ (рис. 1): чим менша проникність, тим більший шум, особливо за малих значень проникності матеріалу. При досягненні значень відносної магнітної проникності порядку 50 000...60 000 розкид шумових параметрів стає настільки великий,

що неможливо зробити однозначний висновок про взаємозв'язок між цими параметрами.

Отримана залежність РШ від амплітуди й частоти магнітного поля, прикладеного під час відпалу, виявилася дуже несуттєвою. Принаймні, відмінність РШ при різних параметрах прикладеного магнітного поля є одного порядку з розкидом РШ при повторних відпалах за тих самих умов.

Спостерігається деяка залежність рівня шумів від швидкості охолодження. Для наочного уявлення в табл. 2 наведено вибірку результатів для температури відпалу $T = 445 \text{ }^\circ\text{C}$.

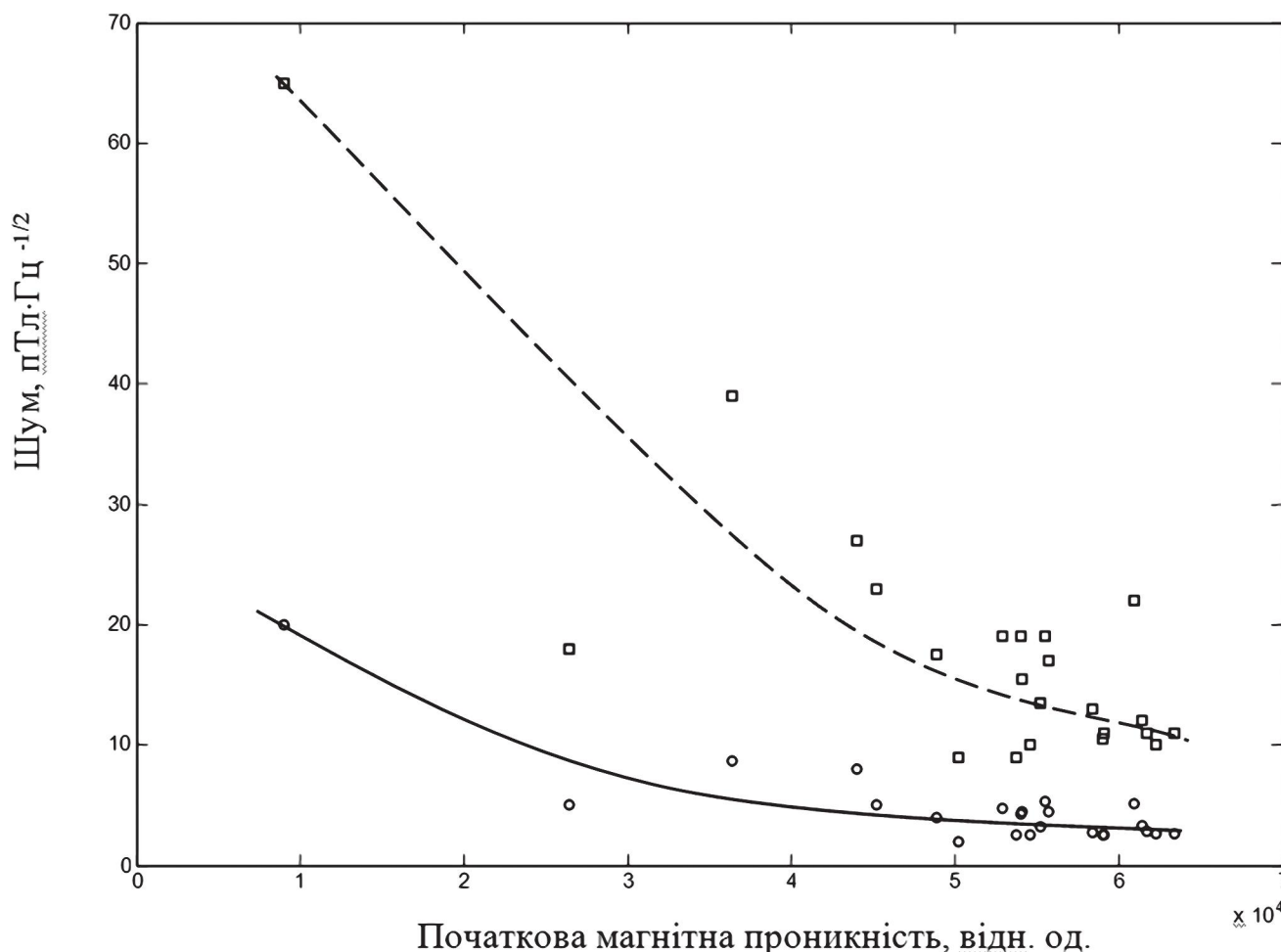


Рис. 1. Залежність рівня шумів від початкової магнітної проникності

Результати відпалів при температурі $T=445\text{ }^\circ\text{C}$

Тип і швидкість охолодження	Поле підмагнічування					
	5 кА/м; 1 кГц			12 кА/м; 644 Гц		
	Шум, пТл·Гц ^{-1/2}			Шум, пТл·Гц ^{-1/2}		
	0,2 Гц	1 Гц	5 Гц	0,2 Гц	1 Гц	5 Гц
Експонента $\tau = 400\text{ с}$				9	4,5	2,5
	-	-	-	9	4	2
Лінійне 400 $^\circ\text{C}/\text{год}$				10	4,5	2,5
	11	4,3	2,6	11	4,7	2,8
	13,5	5,5	3,2	12	5,7	3,3
Лінійне 100 $^\circ\text{C}/\text{год}$				12	5,7	3,3
	17	8	4,5	-	-	-

Як видно із цієї таблиці, з пришвидшенням процесу охолодження шуми відпаленого матеріалу зменшуються. Можна припустити, що це відбувається за рахунок швидшої фіксації рівномірного стану матеріалу, отриманого у процесі відпалювання.

Залежність рівня шумів від температури відпалу побудовано при таких параметрах: швидкість охолодження 400 $^\circ\text{C}/\text{год}$, амплітуда й частота поля підмагнічування 12 кА/м та 644 Гц. Графік цієї залежності наведено на рис. 2 разом із такими ж кривими для раніше відпалених матеріалів типу MM5-Co, P12-086, P12-ИСХ.

Виявлено, що як і для раніше досліджуваних матеріалів, для P12-B3 існує досить вузький інтервал температур відпалу, в якому спостерігається найнижчий рівень магнітних шумів. При цьому мінімальний рівень шуму в 6–10 разів менший

від шумів невідпалених матеріалів. На відміну від інших модифікацій (MM5-Co, P12-086, P12-ИСХ), P12-B3 має не дуже гострий мінімум шумів. Експерименти з P12-B3 підтвердили, що для кожної модифікації матеріалу існує своя температура відпалу, при якій спостерігається найнижчий рівень магнітних шумів і після збільшення якої РШ різко збільшується, аж до втрати магнітних властивостей матеріалу. Цей результат узгоджується з експериментами над залежністю коерцитивної сили від температури відпалу [16] аморфного магнітного матеріалу з подібним хімічним складом. Імовірно, збільшення шумів, як і збільшення коерцитивної сили, в роботі [16] викликане частковою кристалізацією аморфної фази при занадто високій температурі, внаслідок чого після охолодження утворюються локальні зміни магнітної доменної структури.

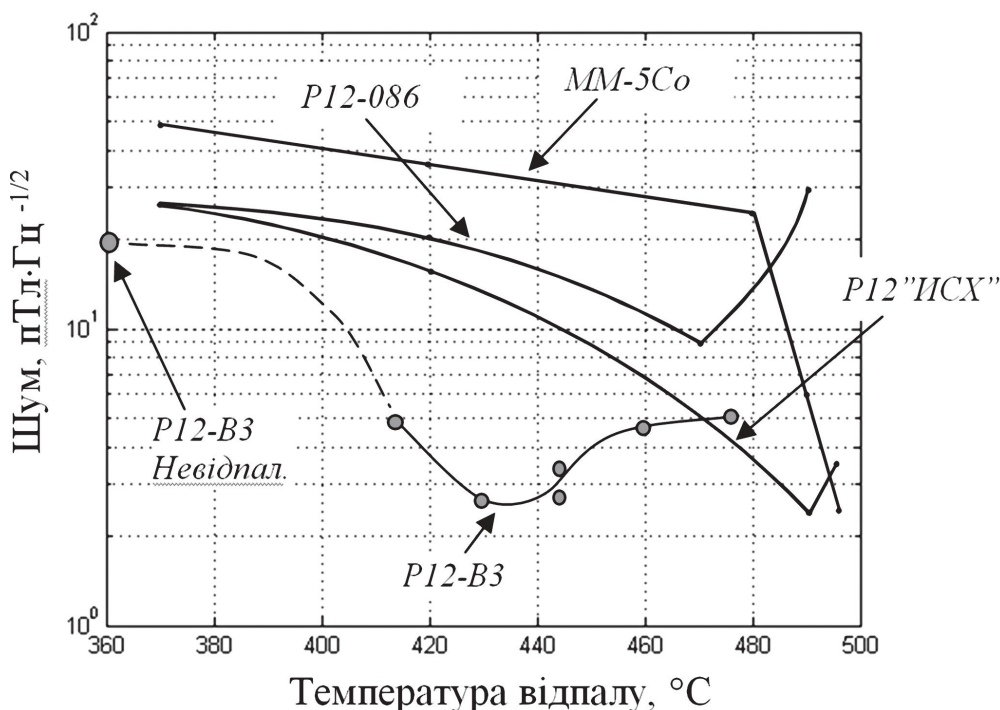


Рис. 2. Залежність рівня шумів від температури відпалу для різних модифікацій аморфного магнітного матеріалу $\text{Co}_{88}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$

Висновки

Проведені дослідження дозволили підібрати комбінацію параметрів термомагнітної обробки (температуру відпалу, швидкість охолодження, амплітуду та частоту поля підмагнічування), яка забезпечує найнижчий рівень шумів ФЗД. Отриманий режим ТМВ магнітних матеріалів дозволив побудувати нове покоління ФЗМ, які за рівнем своїх технічних характеристик не мають аналогів у світі [17].

Список літератури

1. *Афанасьев Ю.В.* Феррозондовые приборы / Ю.В. Афанасьев. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1986. – 188 с.
2. *Korepanov V.* Comparison of magnetometers efficiency for ELF band / V. Korepanov, R. Berkman // Proceedings of the 2nd international conference of measurement. – Smolenice, Slovak Republic, – 1999. – P. 195–198.
3. *Berkman R.* Theoretic and experimental investigation of flux-gate magnetometer noise / R. Berkman // Proceedings of IMEKO-XV World Congress. – Osaka, Japan, 1999. – P. 149–156.
4. *Колачевский Н. Н.* Магнитные шумы / Н.Н. Колачевский. – М.: Наука, 1971. – 136 с.
5. Магнитомодуляционные преобразователи с низким уровнем шумов на основе сплава 83НФ / Р.Я. Беркман, Б.Л. Бондарук, В.В. Соснин, Т.И. Щербакова // Методы и средства измерения параметров магнитного поля: III Всесоюз. конф.: тез. докл. – Л.: НПО “ВНИИМ им. Д.И. Менделеева”, 1985. – С. 144.
6. Применение магнитомягких материалов в низкочастотных магнитомодуляционных устройствах / Т.И. Щербакова, В.В. Соснин, Б.Л. Бондарук, Р.Я. Беркман // Магнитные шумы в феррозондах и магнитных усилителях. – М.: МФТИ, 1983. – С. 46–50.
7. *Gordon D. I.* Low field magnetometer sensor of high stability / D.I. Gordon, R. H. Lundsten // Revue de Physique Appliquee. – 1970. – V. 5, No 1. – P. 175–177.
8. Grain structure, coercivity and high-frequency noise in soft magnetic Fe 81Ni 6Mo Alloys / M. Müller, T. Lederer, K.H. Fornacon, R. Schäfer // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1998. – No 177. – P. 231–232.
9. *Narod B. B.* The origin of noise and magnetic hysteresis in crystalline permalloy ring-core fluxgate sensors / B.B. Narod // Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems. – 2014. – V. 3, No 2. – P. 201–210. doi:10.5194/gi-3-201-2014.
10. Магнитные шумы низкочастотных магнитомодуляционных устройств с сердечниками из сплава 83НФ, подвергнутых различной термической обработке / В.В. Колачевская, В.В. Сушков, Н.М. Самарина, Т.И. Щербакова // Методы и средства измерения параметров магнитного поля: 3-я Всесоюз. конф.: тез. докл. – Л., 1985. – С. 149–150.
11. *Shirae K.* Noise in amorphous magnetic materials / K. Shirae // IEEE transactions on magnetics. – 1984. – V. 20, No 5. – P. 1299–1301. doi:10.1109/TMAG.1984.1063504.
12. An evaluation of the noise performance of Fe, Co, Si, and B amorphous alloys in ring-core fluxgate magnetometers / B.B. Narod, J.R. Bennest, J.O. Strom-Olsen [et al.] // Canadian Journal of Physics. – 1985. – V. 63, No 11. – P. 1468–1472
13. *Афанасьев Ю. В.* Магнитный шум феррозондов с сердечниками из аморфных сплавов / Ю.В. Афанасьев, В.Н. Горобей, Т.И. Щербакова // Магнитные шумы в феррозондах и магнитных усилителях. – М.: МФТИ, 1983. – С. 17–22.
14. Исследование аморфных материалов для сердечников прецизионных феррозондов / Ю.В. Афанасьев, Ю.Н. Бобков, Г.А. Внучков [и др.] // Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры: VII Всесоюз. науч.-техн. конф.: тез. докл. Ч. 1. – Л., 1989. – С. 64.
15. *Носенко В.К.* Аморфні та нанокристалічні сплави для приладобудування і енергоефективних технологій / В.К. Носенко // Вісник НАН України. – 2015. – № 4. – С. 68–79.
16. Soft Magnetic properties of annealed cobased amorphous Co66Fe4Ni1B15Si14 alloy ribbon / J.S. Yang, D. Son, Y. Cho, K.S. Ryu // J. Magn. – 1997. – V. 2, No 4. – P. 130–134.
17. www.isr.lviv.ua