

І. А. Большакова¹, Р.Л. Голяка¹, В.Е. Єрашок²¹Національний університет “Львівська політехніка”²Лабораторія магнітних сенсорів, Центр “Кристал”

ГАЛЬВАНОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ РЕАКТОРІВ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ: ОСНОВНІ ПІДХОДИ

Огляд

© Большакова І. А., Голяка Р.Л., Єрашок В.Е., 2005

I.A. Bolshakova, R.L. Holyaka, V.E. Yerashok

GALVANOMAGNETIC INSTRUMENTATION FOR NUCLEAR FUSION REACTORS: BASIC APPROACHES

Survey

© Bolshakova I.A., Holyaka R.L., Erashok V.E., 2005

Аналізуються проблеми вимірювання магнітного поля в реакторах термоядерного синтезу з магнітним утриманням плазми (типу ТОКАМАК). Показано, що нове покоління ректорів термоядерного синтезу потребуватиме апаратури для діагностики магнітного поля, яка відповідає критеріям довготривалої експлуатації в екстремальних умовах експлуатації. Розглянуто принципи побудови такої апаратури, нові конструкції інтегрованих перетворювачів, елементну базу схем обробки сигналу тощо. Наведено результати виконаних в кінці 2004 року експериментів з вимірювання магнітного поля в реакторі TORE SUPRA (Кадараш, Франція).

The problems of magnetic field measurement in nuclear fusion reactors (ТОКАМАК type) with magnetic field plasma's shape controlling are discussed. It shown that new generation of nuclear fusion reactors will demand the devices for magnetic field diagnostic which meet the long term exploitation in hard conditions. The approaches toward developing of this devices, as well as, new structure of integrated transducers and element base of signal processing are considered. The results of fulfilled in end 2004 year the experiments on magnetic field measurement in TORE SUPRA reactor /Cadarache, France/ are presented.

Вступ

Для забезпечення дедалі більших енергетичних потреб людства зусилля вчених провідних країн світу направлені на створення нових, екологічно безпечних джерел енергії. Одним з пріоритетних напрямків для розв'язання задач енергетики майбутнього нині вважається створення реакторів керованого термоядерного синтезу. Високотемпературна плазма в цих реакторах утримується магнітним полем [1], яке не дає їй змогу доторкатися до стінок реактора. Водночас нейтрони, які утворюються під час термоядерної реакції синтезу, не затримуються магнітним полем і передають свою енергію стінкам установки, які нагріваються за рахунок теплового випромінювання плазми і охолоджуються рідкими теплоносіями.

Отже, магнітне поле відіграє дуже важливу роль в реакторах термоядерного синтезу. Магнітна система Міжнародного термоядерного експериментального реактора (ITER) має загальну вагу 8700 тонн і складається з великої кількості котушок та обмоток різного призначення. Діагностика магнітного поля займає провідне місце в діагностичній системі як в наявних тороїдальних реакторах (токамаках), так і в майбутньому ITER, будівництво якого розпочинається в 2005 році.

В магнітній діагностиці існуючих токамаків та ITER передбачено використання традиційних індуктивних перетворювачів – котушок з інтеграторами. Інформативною величиною індуктивних перетворювачів є інтеграл вихідної напруги котушок. В короткотривалих імпульсах магнітного поля в токамаках тривалістю від частки секунди до десятків секунд індуктивні перетворювачі задовільно виконують свою функцію. Але із зростанням тривалості імпульсу до 3600 с, як це передбачено в ITER, індуктивні перетворювачі не дають змоги отримати необхідну точність вимірювання магнітного поля, оскільки із збільшенням тривалості імпульсу точність інтегрування різко зменшується [2, 3]. Крім того, радіаційні умови в реакторах термоядерного синтезу спричиняють в індуктивних перетворювачах небажані радіаційно індуквані ефекти, такі, як радіаційно індуквана провідність (RIC), радіаційно індуквана електрорушійна сила (RIEMF), радіаційно індуквана електрична деградація (RIFD). Як показали дослідження, похибка вимірювання магнітного поля індуктивними перетворювачами в цих умовах становить 3,5 %, що на порядок перевищує вимоги щодо похибки вимірювання [2, 4]

Найбільший внесок в похибку вимірювання робить похибка, пов'язана з недостатньою точністю вимірювання індуктивними перетворювачами квазістаціонарного (steady state) магнітного поля під час довготривалих імпульсів, причому вона збільшується із зростанням тривалості імпульсу.

Найпридатнішими для вимірювання довготривалих імпульсів магнітних полів є гальваномагнітні перетворювачі, передовсім напівпровідникові сенсори холлівського типу, які, на відміну від індуктивних перетворювачів, не мають ніяких обмежень щодо тривалості імпульсу і з достатньо високою точністю вимірюють як короткотривалі імпульсні, так і квазістаціонарні та постійні магнітні поля.

Створення пристроїв для вимірювання магнітного поля на основі гальваномагнітних перетворювачів могло би підвищити точність вимірювання квазістаціонарного магнітного поля в довготривалих імпульсах реактора ITER.

Однак засоби магнітної діагностики для ITER повинні задовольняти надзвичайно жорстким умовам експлуатації: високі радіаційні навантаження (флюенс нейтронів 10^{18} н·см⁻²), високі температури (100÷200°C), сильні імпульсні магнітні поля (5Т), довготривалі імпульси і пов'язана з ними необхідність вимірювання квазістаціонарного магнітного поля. Розроблення магнітовимірювальних пристроїв повинно супроводжуватися випробуваннями в умовах, наближених до ITER.

Оскільки будівництво реактора ITER тільки розпочинається, вчені та конструктори з різних країн світу інтенсивно здійснюють експериментальні дослідження на наявних установках, які є майже в кожній з розвинутих країн світу: CASTOR (Чеська Республіка), TORE SUPRA (Франція), JET (Великобританія), W7X (Німеччина), YAERI (Японія), TFTR (США) та інші.

Умови в цих установках значно відрізняються собою як тривалістю імпульсу, так і величиною магнітного поля та радіаційним навантаженням. Тому під час розробки гальваномагнітної апаратури для магнітної діагностики ITER необхідно проводити випробування окремих технічних підходів та виготовлених пристроїв на наявних токамаках з врахуванням умов, які притаманні кожному з них.

Викладено основні підходи до розробки магнітовимірювальних пристроїв на основі гальваномагнітних перетворювачів для магнітної діагностики в реакторах термоядерного синтезу, а також результати випробування створеної гальваномагнітної апаратури в одному з найбільших токамаків Європи TORE SUPRA у Франції.

Основні підходи до розробки гальваномагнітних пристроїв

Основні підходи до розробки гальваномагнітних пристроїв для магнітної діагностики реакторів контрольованого термоядерного синтезу визначаються вимогами щодо стабільності і точності апаратури та умовами її експлуатації.

Що стосується точності вимірювання магнітного поля, то в реакторі ITER, як було зазначено вище, вимагається точність, не гірше за 0,35 %. Основні характеристики, що забезпечують таку точність вимірювання, повинні залишатися стабільними упродовж 3–5 років.

Враховуючи жорсткі умови експлуатації (радіаційні, температурні та широкий частотний діапазон вимірюваного магнітного поля), створення апаратури магнітної діагностики ITER потребує розробки декількох основних підходів, серед яких: радіаційна стійкість напівпровідникових гальваномагнітних сенсорів магнітного поля, спосіб стабілізації магнітометричних засобів в радіаційних умовах, прецизійне вимірювання індукції магнітного поля, термокомпенсація характеристики перетворення, оцінка рівня електромагнітних завад, вимірювання індукції магнітного поля в широкому діапазоні частоти.

Радіаційна стійкість сенсорів магнітного поля. Нестабільність напівпровідникових матеріалів в радіаційних умовах опромінювання нейтронами обмежує використання напівпровідникових сенсорів для вимірювання магнітних полів в реакторах термоядерного синтезу. Зміна електрофізичних властивостей напівпровідників зумовлена тим, що в результаті накопичення в кристалічній ґратці напівпровідника радіаційних дефектів змінюється положення рівня Фермі, яке визначається балансом між радіаційними дефектами донорного і акцепторного типів.

В основу практичного розв'язання задачі отримання радіаційностійких напівпровідникових матеріалів для сенсорів покладена теоретична модель закріплення рівня Фермі в його граничному положенні в легованих опромінених кристалах і на міжфазних границях в тонких плівках [5]. Радіаційностійкі мікрочастинки і тонкі плівки напівпровідникової сполуки InSb, на основі яких виготовлялись перетворювачі Холла, були отримані методом CVD і леговані під час отримання комплексом домішок, що включає Sn, Al, Cr [6]. При опромінювання нейтронами в матеріалі сенсора відбуваються два конкуруючі процеси: утворення радіаційних дефектів переважно акцепторного типу та легування InSb донорною домішкою Sn за рахунок ядерних реакцій на атомах ґратки In. Врахування цих процесів та умов опромінення (температури та енергетичного спектра нейтронів) дає змогу визначити параметри матеріалу, які забезпечують стабільність характеристик сенсорів в нейтронному потоці [7].

Випробування радіаційної стійкості отриманих мікрочастинки і плівок InSb, а також магнітних сенсорів на їх основі, виконувалися при опромінюванні швидкими нейтронами в імпульсному швидкому реакторі ІБР-2 в Об'єднаному інституті ядерних досліджень (Дубна, Росія) і в реакторі LVR-15 (Реж, Чеська Республіка). Інтегральний потік швидких нейтронів в ІБР-2 становив $F=3,1 \cdot 10^{16} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$. Пізніше в LVR-15 був досягнутий надзвичайно високий флюенс нейтронів $F=1 \cdot 10^{18} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ при середній енергії нейтронів $E \approx 1,35 \text{ MeV}$. Такий флюенс нейтронів є наближеним до радіаційних умов ITER.

Результати експерименту в реакторі ІБР-2 показали, що відносна зміна концентрації носіїв в зразках мікрочастинки InSb і чутливості створених на їх основі магнітних сенсорів не перевищує 0,05 % при опромінюванні до флюенсу $1 \cdot 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ (цей рівень радіаційної стійкості відповідає флюенсу нейтронів в CERN за 10 років роботи LHC). При опромінюванні до флюенсу $3 \cdot 10^{16} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ вказані зміни не перевищують 1 %. Температура під час цих експериментів становила 17°C.

Оптимальна концентрація носіїв найбільш радіаційностійких віскерів становить $n = (6 \div 7) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ для спектра нейтронів з середньою енергією $E=1,5 \text{ MeV}$ і часткою теплових і проміжних нейтронів в загальному потоці 20 % і 25 % відповідно. При опроміненні нейтронами з іншим енергетичним спектром значення оптимальної концентрації носіїв заряду у вихідному матеріалі повинні дещо змінюватись за рахунок різного внеску атомів Sn, що вводяться в результаті ядерних реакцій на теплових та проміжних нейтронах. Стабільність плівкових сенсорів з концентрацією електронів, близькою до оптимальної, дещо гірша: їх чутливість при опромінюванні до флюенсу $3,1 \cdot 10^{16} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ змінилася приблизно на 7 %. Це, імовірно, зумовлено дефектами структури, оскільки тонкі плівки з самого початку за способом їх виготовлення є дефектнішими, ніж монокристали віскерів, отримані при вільній кристалізації з газової фази.

Щоб дослідити можливості використання напівпровідникових магнітних сенсорів в значно жорсткіших умовах ITER, були здійснені випробування у вертикальному каналі нейтронного

реактора LVR-15. Температура під час цих випробувань досягала 90°C . Аж до найвищого флюенсу нейтронів $F=1 \cdot 10^{18} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ зміна характеристик сенсорів не перевищувала 10 %. Такі зміни цілком доступні для коригування за допомогою електронної апаратури та із застосуванням методів перекалібрування. Для порівняння: характеристики сенсорів провідних американських фірм F.W.Bell та Lake Shore Cryotronics Inc., у цих самих умовах опромінювання зазнали значних змін – 70 % та 94 % відповідно[8].

Виконані дослідження вперше показали можливість створення радіаційностійких напівпровідникових матеріалів і стабільних сенсорів на їх основі, працездатних в умовах великих інтегральних потоків нейтронів. Використання сенсорів, стабільних в жорстких радіаційних умовах, відкриває можливість нових підходів до магнітної діагностики в наявних пристроях термоядерного синтезу і в майбутньому ІТЕР.

Спосіб стабілізації магнітовимірювальних пристроїв в радіаційностійких умовах. Як було показано вище, розроблені технології підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів забезпечують достатньо високу стабільність перетворювачів Холла в екстремальних умовах експлуатації. Однак під час довготривалої експлуатації (декілька років) в радіаційних умовах та за підвищених температур параметри навіть найбільш радіаційно- та температурностабільних перетворювачів Холла зазнають певних змін.

Для забезпечення високої точності вимірювання магнітного поля в умовах реакторів термоядерного синтезу був розроблений спосіб стабілізації магнітовимірювальних пристроїв в радіаційних умовах.

Спосіб базується на формуванні навколо перетворювача Холла (ПХ) тестового магнітного поля величиною 5 мТ. Тестове магнітне поле формується мініатюрним соленоїдом з діаметром котушки 1мм, який виконує роль актуатора. Мікросолоноід та сенсор разом утворюють функціонально інтегрований перетворювач (рис. 1).

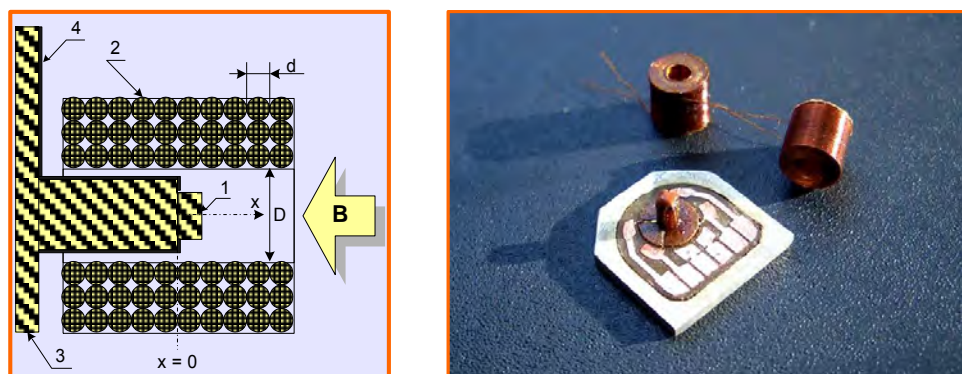


Рис. 1. Функціональноінтегрований магнітометричний перетворювач
(1 – ПХ, 2 – котушка, 3 – основа, 4 – виводи)

Під час експлуатації в жорстких радіаційних умовах зміна опору соленоїда, виготовленого з мідного дроту, є набагато меншою порівняно з дрейфом параметрів напівпровідникового сенсора. Крім того, при живленні мікросолоноїда стабільним струмом зміна його опору не призводить до зміни значення тестового поля. Створений функціонально інтегрований перетворювач, в якому конструктивно поєднані сенсор і актуатор магнітного поля, є багатофункціональним пристроєм. Серед його основних функцій: пряме вимірювання перетворювачем Холла індукції магнітного поля; вимірювання індукції слабких магнітних полів компенсаційним методом; формування та вимірювання постійних тестових магнітних полів, формування та вимірювання імпульсних магнітних полів з підвищеними значеннями індукції, формування та вимірювання диференційного тестового магнітного поля, вимірювання температури за опором соленоїда (як мідного терморезистора).

Перевагою вказаного пристрою є можливість його періодичного самокалібрування і, тим самим, забезпечення коригування зміни чутливості ПХ в умовах довготривалої дії на нього

проникаючої радіації. Для такого самокалібрування використовується тестове поле, яке періодично формується в мікросолоноїді. Для цього через нього пропускають струм заданої величини. Знаючи струм мікросолоноїда, розраховують величину тестового магнітного поля, яке він створює. Далі, вимірюючи це тестове магнітне поле гальваноманітним перетворювачем, визначають чутливість останнього і, тим самим, виконують періодичне калібрування пристрою вимірювання магнітного поля.

Розроблений нами новий алгоритм коригування функції перетворення дає змогу забезпечити високу чутливість магнітметричних засобів до тестових магнітних полів і є ефективним до як завгодно великих значень вимірюваних полів. Алгоритм базується на трьох засадах: одночасному аналізі характеристики перетворення за інтегральною та диференційною складовими сигналу, частотним рознесенням інтегральної та диференційної складових сигналу, методами розрахунку величин функції перетворення та вимірювання магнітного поля.

Прецизійне вимірювання індукції магнітного поля. Безпосереднє вимірювання магнітного поля здійснюється традиційним для високоточних магніметрів способом з живленням мікросенсора змінним струмом та подальшим синхронним детектуванням сигналу. Частота змінного струму живлення мікросенсора дорівнює 100 Гц. Це забезпечує високу завадостійкість, що є важливим за значної просторової віддаленості між мікросенсором в зоні вимірювання та апаратурою обробки сигналу. Коефіцієнт придушення завад утримується на рівні 60÷70 дБ. Невідтворюваність вимірювань індукції магнітного поля демонструє рис. 2. В режимі прямого вимірювання невідтворюваність не перевищує 0.01 % при $B > 0.1\text{T}$ (рис 2, а), в тестовому режимі $\pm 0,02\%$ (рис. 2, б).

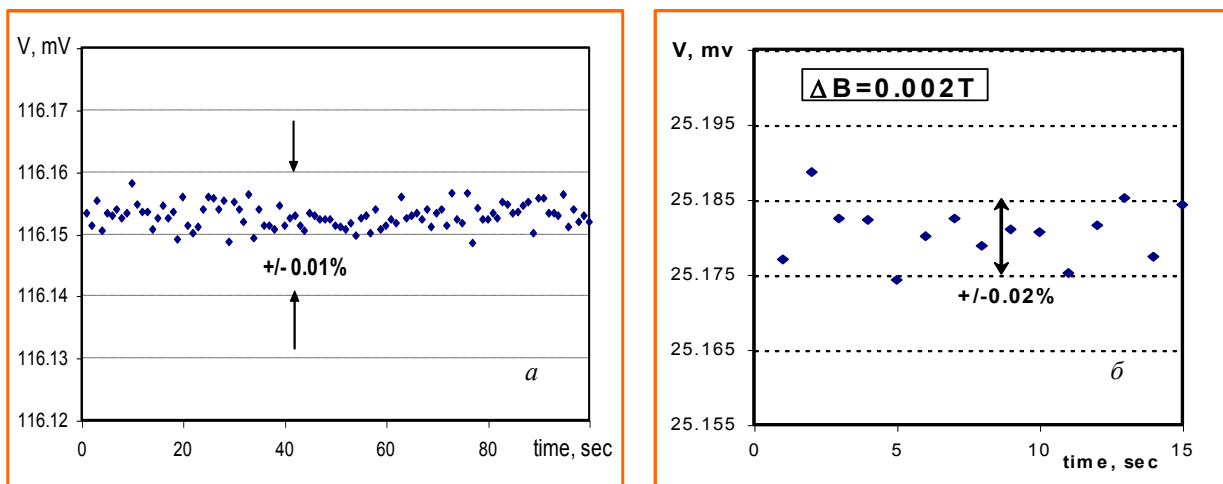


Рис. 2. Невідтворюваність вимірювання сигналів

Термокомпенсація характеристики перетворення. Термокомпенсацію характеристик перетворення здійснюють, вимірюючи температуру вимірювального перетворювача і реалізують за допомогою мікросолоноїда як терморезистора. Враховуючи значну просторову віддаленість між вимірювальним перетворювачем та схемою обробки сигналу, вимірювання виконують з допомогою синхронного детектування. Похибка вимірювання температури становить 0,1 °C. Перегріванням мікросенсора можна нехтувати, оскільки при опорі соленоїда 40 Ом та струмі споживання 2 мА потужність розсіювання становить менше ніж 0,16 мВт. Виміряне значення температури служить для термокомпенсації параметрів мікросолоноїда. Коригування здійснюється за допомогою програмного забезпечення і базується на температурній залежності параметрів вимірювального перетворювача, виміряних під час калібрування.

Оцінка рівня електромагнітних завад. В апаратурі передбачена функція придушення електромагнітних завад та часового дрейфу вимірювальних кіл. Ці функції забезпечуються синхронним детектуванням сигналу, прогресивними методами аналого-цифрового перетворення та використанням бездрейфових підсилювачів з періодичним підстроюванням нуля. Але іноді,

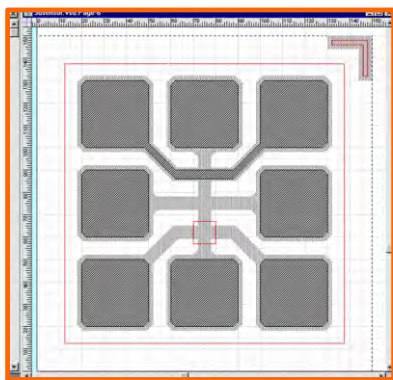
особливо коли йдеться про вимірювання в реакторах термоядерного синтезу, де струми досягають сотень кА, можуть виникнути настільки високі завади, що значно перевищують допустимий рівень. Поява таких непередбачених завод є основою для припинення вимірювань та дослідження причин, що їх викликали.

Для виявлення рівня та характеру електромагнітних завод в апаратурі передбачено спеціальний режим вимірювання, в якому інформаційною величиною сигналу є зміна напруги на соленоїді. Ця напруга підсилюється, перетворюється в цифрову форму і виводиться на монітор комп'ютера. За формою та амплітудою зміни напруги оцінюють рівень електромагнітних завод.

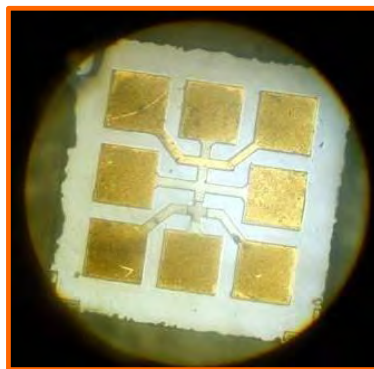
Коригування характеристик перетворення. Коригування характеристики перетворення здійснюють в режимі живлення мікросолоноїда змінним струмом, а мікросенсора – постійним. В процесі формування тестового поля робочий струм через мікросолоноїд становить 10 мА. Вимірювання виконують в декілька етапів. На першому етапі, після завершення перехідного теплового режиму, встановлюють температуру вимірювального перетворювача, вимірявши зміни опору мідного мікросолоноїда. На другому етапі вимірюють диференційну складову холлівської напруги, яка зумовлена тестовим магнітним полем мікросолоноїда. На третьому етапі вимірюють інтегральну складову холлівської напруги, за якою в першому наближенні знаходять індукцію вимірюваного поля. Такі вимірювання дають змогу розрахувати крутість перетворення мікросенсора, і, порівнявши її з каліброваним значенням, відповідно уточнити результати вимірювання. Похибка коригування становить 0.1 %.

Вимірювання індукції магнітного поля в широкому діапазоні частоти. Діагностика магнітного поля термоядерних реакторів передбачає вимірювання магнітного поля в широкому діапазоні частоти: від постійного магнітного поля до 100 кГц. Однак при частотах зміни поля понад декілька десятків кілогерц точність вимірювання магнітного поля за допомогою ПХ значно погіршується. Причиною цього є виникнення на виводах ПХ електромагнітних завод. Для вирішення цієї проблеми нами запропоновано низку нових конструктивно-схемних рішень широкосмугових магнітометрів, а також розроблено імітаційний стенд, за допомогою якого відлагоджувались такі магнітометри.

Широкосмуговий магнітометр базується на оригінальному гальваномагнітному сенсорі (рис. 3), який інтегрує в єдиному кристалі ПХ та петлю електромагнітної компенсації.



a



б

Рис. 3. Топологія та фотографія гальваномагнітного сенсора

Новизна цієї роботи захищена патентом України [9]. Сигнали з такого сенсора підсилюються широкосмуговим двоканальним підсилювачем. Перший канал підсилює сигнал з потенційних виводів ПХ, причому цей сигнал має дві складові – корисну складову, яка є інформативною величиною магнітного поля, та паразитну складову, яка зумовлена електромагнітними заводами. Другий канал підсилює сигнал з петлі електромагнітної компенсації. Завдяки симетрії виводів ПХ та петлі електромагнітної компенсації, а також малим відстаням між цими елементами, можна вважати, що напруга електромагнітної завади на виводах ПХ та напруга на виводах петлі

електромагнітної компенсації є приблизно однаковими. Шляхом спеціальної компенсації, яка полягає у відніманні певної частини сигналу другого каналу від сигналу першого каналу отримують корисну складову сигналу.

В магнітометрі використано новий широкосмуговий (250kSPS) 16-бітний аналого-цифровий перетворювач AD7663 (Analog Devices, USA). Для відлагодження широкосмугового магнітометра та дослідження вимірювання імпульсних магнітних полів був створений імітаційний стенд, який дає змогу формувати швидко змінюване магнітне поле. На рис. 4 наведено схему розробленого стенда.

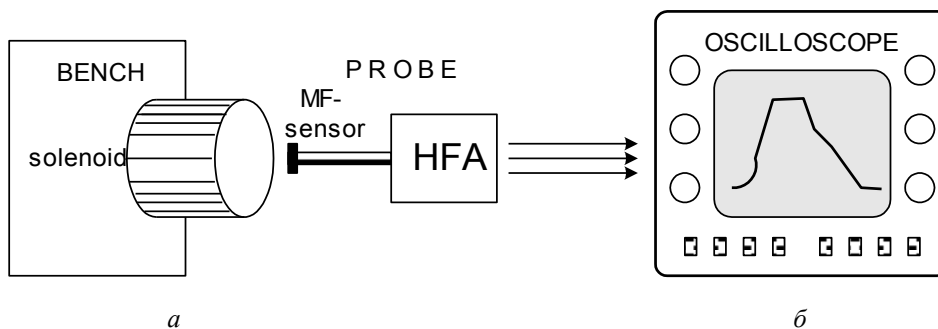


Рис. 4. Стенд для відлагодження широкосмугового магнітометра: (solenoid – імпульсний електромагніт, probe – вимірювальний зонд, HFA – двоканальний високочастотний підсилювач, oscilloscope – двоканальний широкосмуговий осцилограф типу С1-99 (або швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач)

Спосіб формування високочастотного магнітного поля імітаційного стенда наведено на рис. 5. Основним елементом формування високочастотного магнітного поля є LC коливальний контур. Імпульси енергії в коливальний контур передають, періодично замикаючи ключ SW. Накопичується енергія на батареї конденсаторів C_B , які заряджаються через резистор R від джерела напруги V_S в період між замиканнями ключа SW.

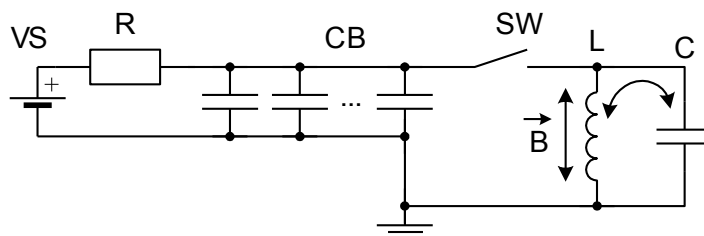


Рис. 5. Схема формування швидких змін магнітного поля

Джерелом змінного магнітного поля служить соленоїд L коливального контуру, пікове значення струму в якому становить 50 А. Вибір робочої частоти коливання здійснюється зміною ємності конденсатора C . Для забезпечення високої добротності коливального контуру соленоїд виготовлено з мідної стрічки шириною 16 mm і товщиною 0.05 mm. Соленоїд має 24 витки стрічки, а його внутрішній діаметр становить 6 mm.

Принципово важливими елементами розроблених схем формування імпульсного поля є швидкодіючий ключовий MOS FET транзистор типу IRC840 фірми International Rectifiers, USA (максимальне значення напруги $V_{DSS} = 500$ V, максимальне значення імпульсного струму $I_{SM} = 32$ A, опір відкритого стану $R_{DS} = 0.85$ Ω , час увімкнення/вимкнення $t \approx 20$ ns) та високочастотний підсилювач типу AD8009 фірми Analog Devices, USA (смуга частот 1000 MHz, нерівномірність амплітудно-частотної характеристики 0.1 dB в смузі частот 75 MHz).

На рис. 6, а наведено вихідну осцилограму при дослідженні зонда широкосмугового магнітометра за допомогою імітаційного стенда. У верхній частині осцилограми показано коливальну зміну струму через соленоїд. Цей струм формує високочастотне магнітне поле (приблизно 10 мТ), яке вимірюється за допомогою ПХ.

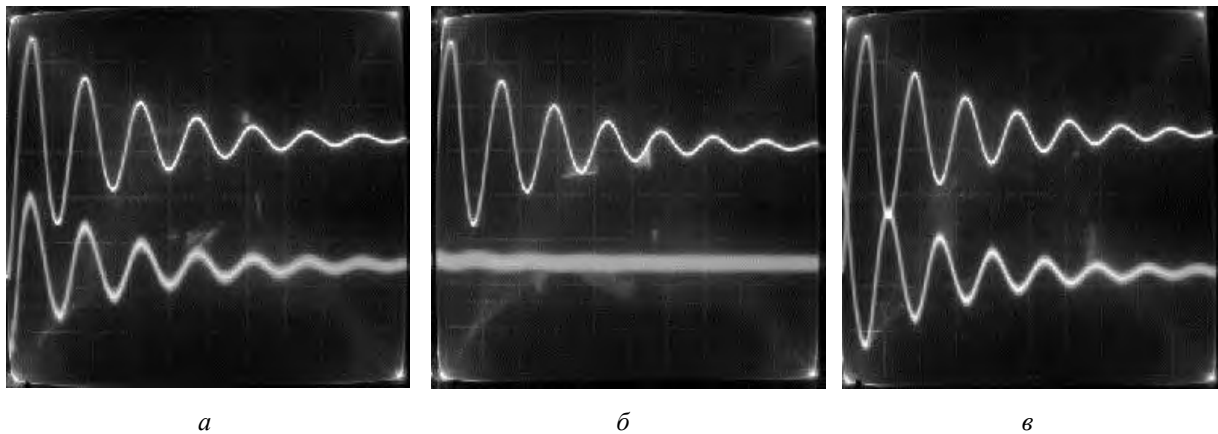


Рис. 6. Осцилограми сигналів широкосмугового магнітометра

Сигнали з ПХ та електромагнітної петлі підсилюються і у відповідній пропорції взаємно віднімаються. Результат такого компенсаційного вимірювання наведено в нижній частині осцилограми. Критерієм якісного вимірювання магнітного поля є відсутність сигналу зонда імпульсного магнітометра за відсутності струму живлення ПХ. Така осцилограма наведена на рис. 6, б. Крім того, на рис. 6, в наведені результати аналогічних вимірювань при зміні на протилежний напрям струму через холлівський перетворювач. Як видно, полярність сигналу зонда широкосмугового магнітометра також змінилася на протилежну. Все це свідчить про відсутність в сигналі електромагнітної завади, а, отже, про якісне вимірювання високочастотного магнітного поля.

Випробування апаратури магнітної діагностики в реакторі TORE SUPRA

Апаратура магнітної діагностики реакторів термоядерного синтезу була розроблена на основі створених функціонально-інтегрованих вимірювальних перетворювачів, що поєднують радіаційностійкі сенсори та актюатори магнітного поля. При її розробці були використані основні підходи до розробки гальваноманітних пристроїв, зазначені вище, та нові алгоритми коригування функції перетворення.

Структура та зовнішній вид апаратури діагностики магнітного поля показані на рис. 7.

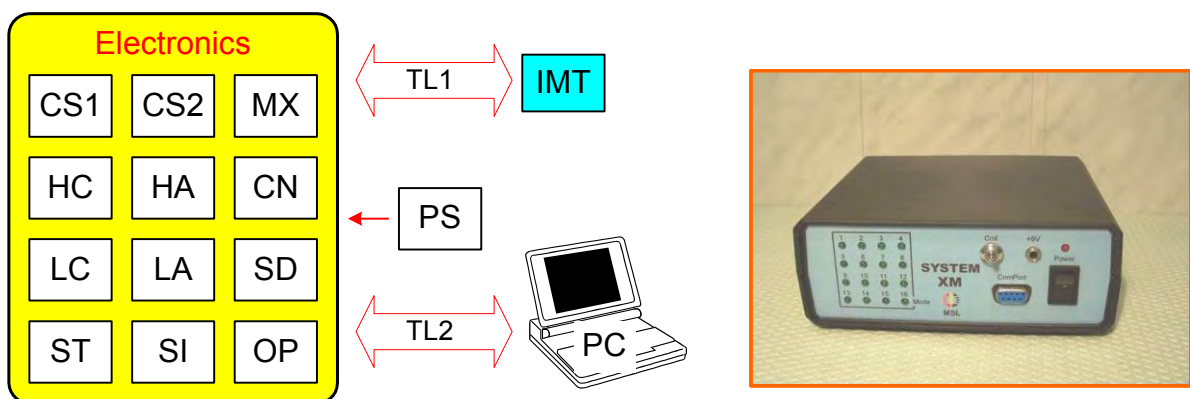


Рис. 7. Структура та зовнішній вид апаратури діагностики магнітного поля:

MX – мультиплексор; *CN* – блок керування; *CS1, 2* – джерела струму; *SD* – синхродетектор; *HA* – широкосмуговий підсилювач; *HC* – широкосмуговий аналого-цифровий перетворювач; *LA* – вузькосмуговий підсилювач; *LC* – вузькосмуговий аналого-цифровий перетворювач; *ST* – стабілізатор; *SI* – послідовний інтерфейс; *OP* – вузол оптичної розв'язки; *PS* – джерело живлення; *IMT* – інтегрований магнітометричний перетворювач; *TL1, 2* – лінії передачі сигналів

Крім того, був розроблений вторинний перетворювач для компресії сигналу. Цей перетворювач забезпечує автоматичний перехід з коефіцієнта підсилення сигналу $K_V=100$ при напрузі сигналу V_{IN} менше ніж 150 mV до коефіцієнта підсилення $K_V=10$ при $V_{IN} \geq 150$ mV. Принципово важливим є те, що такий перехід відбувається без традиційних ключів, які, зокрема, перемикають резистори кола зворотного зв'язку підсилювача. Ми відмовилися від ключів кола зворотного зв'язку, оскільки в режимі широкосмугових вимірювань таке рішення призводить до погіршення динамічних характеристик підсилювача та збільшення його шуму. Наш підхід базується на використанні в колі зворотного зв'язку діодних елементів на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною. Структура вторинного перетворювача для восьмиканальної компресії сигналу та його прохідна характеристика наведені на рис. 8. Використання запропонованого вторинного перетворювача дає змогу вдвічі розширити динамічний діапазон сигнального кола, що дає змогу підвищити реальну роздільну здатність широкосмугового вимірювання магнітного поля.

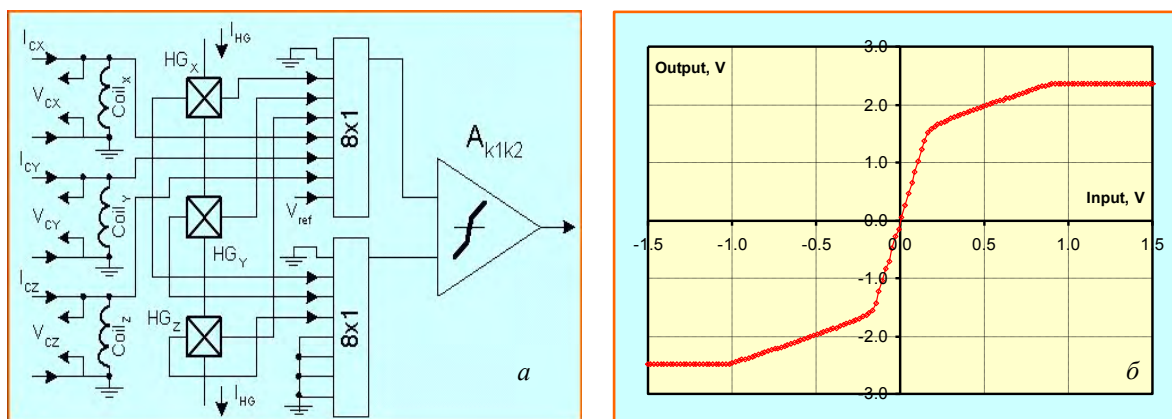


Рис. 8. Структура вторинного перетворювача для восьмиканальної компресії сигналу (а) та його прохідна характеристика (б)

При підготовці апаратури до випробування її в реакторі TORE SUPRA були здійснені експерименти, в яких виконували порівняння вимірювання імпульсного магнітного поля за допомогою ПХ та котушок, які використовуються в сучасних термоядерних реакторах.

В експериментах враховувалось, що вимірювання магнітного поля перетворювачем Холла не має обмежень щодо тривалості імпульсу (на відміну від котушок). Тому вимірювання за допомогою ПХ в цих експериментах приймалися за опорні і при збільшенні часу вимірювання аналізувалося наростання похибки вимірювання поля з допомогою котушок.

Результати експерименту наведено на рис. 9. В центрі рис. 9, а наведено часову зміну результатів вимірювання магнітного поля з допомогою котушки – $S(\text{Coil})$ та ПХ – $A(\text{HG})$ упродовж п'яти секунд.

Результати цих вимірювань якісно збігаються. Спостерігається хороший збіг також на початку вимірювання, зокрема, як це показано в інтервалах $0.6 \div 1.0$ с (рис. 9, б) та $0.8 \div 0.9$ с (рис. 9, в). Однак наприкінці вимірювань відхилення результатів вимірювання з допомогою котушки стає істотним, наприклад, в інтервалі $4.4 \div 4.8$ с (рис.9, г) та $4.55 \div 4.65$ с (рис. 9, д). Необхідно відзначити, що короточасні зміни магнітного поля за допомогою котушки усереднюються, що призводить до обмеження смуги частот магнітометра. Виконані експерименти підтверджують переваги ПХ порівняно з котушками при зростанні часового інтервалу вимірювання.

Для випробування апаратури магнітної діагностики в реакторі TORE SUPRA був виготовлений трикоординатний вимірювальний перетворювач, так званий 3D-зонд, в якому були поєднані три функціонально інтегровані перетворювачі, розташовані по трьох координатних осях (рис. 10) для вимірювання трьох компонентів V_x , V_y , V_z вектора індукції магнітного поля.

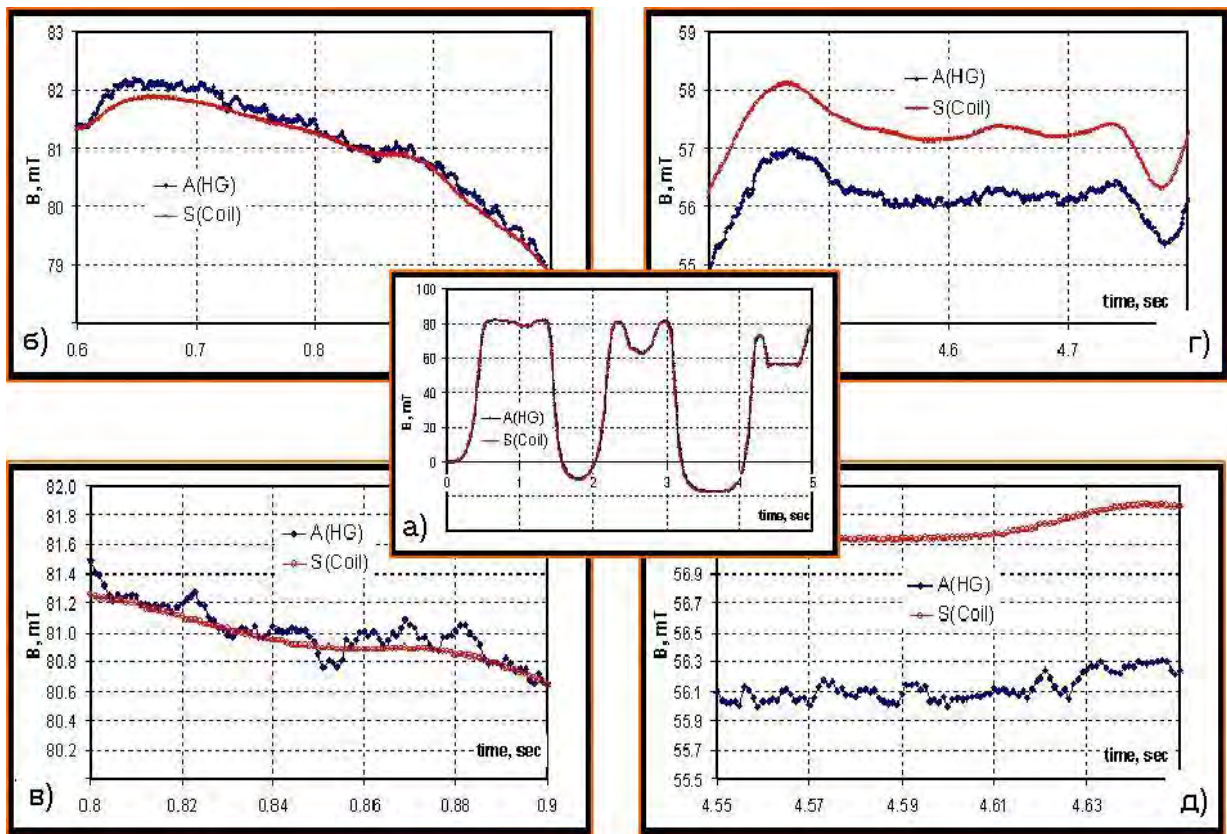


Рис. 9. Порівняльні вимірювання магнітного поля з допомогою котушки та ПХ

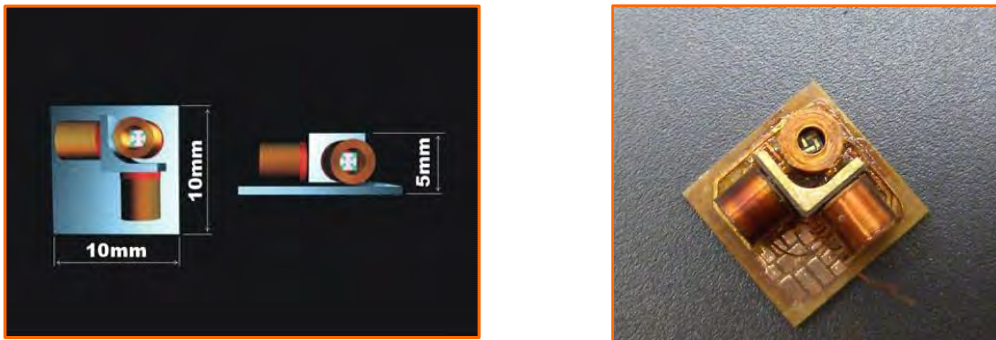


Рис. 10. Трикоординатний магнітометричний перетворювач

Під час випробування 3D-зонд нашої апаратури був розташований на зовнішній стороні корпусу тороїдальної камери реактора TORE SUPRA, електронний блок апаратури був розташований в залі реактора на відстані 15 м від вимірювального зонда. Сигнали з апаратури по оптоволоконному кабелю передавались в зал управління та контролю, дозволений для роботи персоналу, та відображались на моніторі компютера.

На рис. 11 наведено результат вимірювання нашою апаратурою трьох ортогональних компонентів вектора індукції магнітного поля в одному з експериментів N 34073 під час роботи реактора TORE SUPRA в жовтні 2004 р.

Як видно з наведеного результату вимірювання, тривалість квазістаціонарного стану магнітного поля в експерименті № 34073 становить 30 с. Величина основної компоненти магнітного поля в цьому місці розташування 3D-зонда нашої апаратури становить близько 1 Т (рис. 11, а), другої та третьої компонент – відповідно 0,4 Т та 0,3 Т (рис. 11, б). За час тривалості квазістаціонарного стану в одному імпульсі спостерігається коливання в межах від 0,95 Т до 1,1 Т магнітного поля, величина якого керується системою утримання плазми так, щоб просторове положення плазми зберігалось в заданих межах.

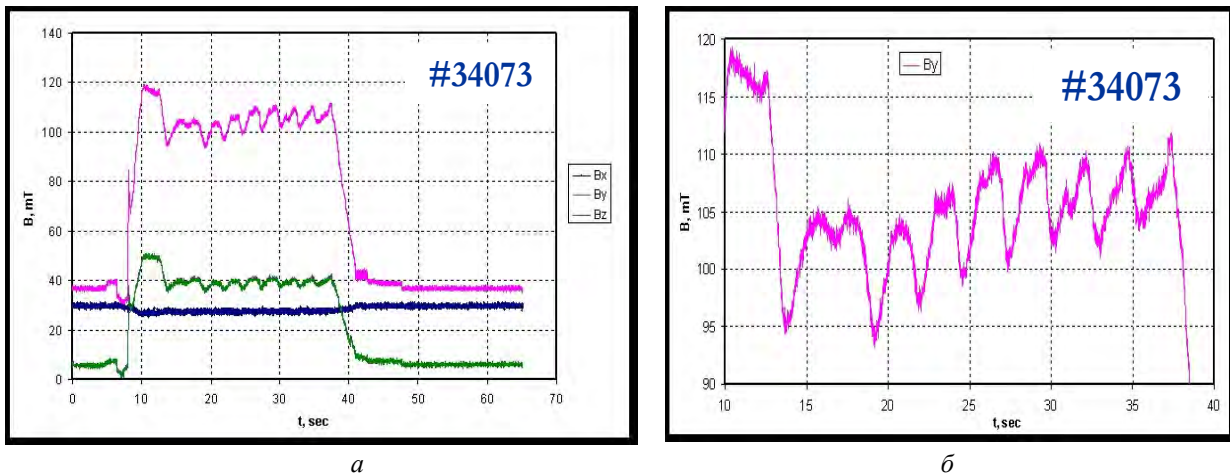


Рис. 11. Результати вимірювання магнітного поля в ректорі TORE SUPRA, Франція (експеримент з утримання плазми № 34073)

Ці вимірювання показали, що апаратура магнітної діагностики на основі гальваномагнітних холлівських перетворювачів дає змогу вимірювати навіть тонку структуру квазістаціонарного магнітного поля на відміну від індуктивних перетворювачів, в яких короточасні зміни магнітного поля усереднюються, оскільки вихідна напруга котушок інтегрується.

Виконані попередні дослідження та випробування в ректорі Tore Supra переконливо продемонстрували переваги магнітовимірювальної апаратури на основі перетворювачів Холла перед індуктивними перетворювачами на основі котушок при вимірюванні квазістаціонарного магнітного поля. Із зростанням тривалості імпульсу досягти високої точності вимірювання магнітного поля одними лише індуктивними перетворювачами неможливо. Тому в довготривалих імпульсах проекту ITER необхідно буде доповнити систему магнітної діагностики апаратурою на основі перетворювачів Холла.

Викладені вище результати досліджень були представлені в березні 2005 року на міжнародній нараді з діагностики ITER в Оксфорді і в рішенні наради були відзначені серед пріоритетних напрямків[10].

Висновки

Проблема вимірювання квазістаціонарного магнітного поля в реакторах термоядерного синтезу може бути ефективно вирішена за допомогою гальваномагнітних перетворювачів холлівського типу. Дослідженнями показано, що ПХ, на відміну від традиційних вимірювальних котушок, можуть з достатньою точністю вимірювати магнітні поля в широкій смузі частот – починаючи від постійних до сотень кілогерц.

Запропоновані принципи побудови апаратури для діагностики квазістаціонарних магнітних полів на основі розроблених радіаційностійких ПХ та оригінальних схем обробки сигналу відповідають критеріям довготривалої експлуатації в екстремальних умовах нового покоління реакторів термоядерного синтезу.

Результати проведених в кінці 2004 року групою науковців Лабораторії магнітних сенсорів Національного університету “Львівська політехніка” експериментів з вимірювання магнітного поля в ректорі TORE SUPRA /Кадараш, Франція/ підтвердили ефективність запропонованих рішень.

1. *International Tokamak Physics Activity*. <http://itpa.ipp.mpg.de>.
2. Costley, A. Donne et al., *The Challenge of ITER Diagnostics// ECA, Vol. 25A, (2001), 1333-1336*.
3. Duran I. et al.: *Irradiation effects on candidate Hall probes, final report on EFDA Technology Task TW3-TPDC-IRR CER Deliverable 9, June 16, 2004*.
4. Vayakis G., Walker C., *Magnetic Diagnostics for ITER/BPX plasmas// Rev. Sci. Instrum., 74(4), (2003), 2409-2417*.

5. Brudnyi V.N., Grinyaev S.N., Kolin N.G. *Physica B*, 348, 213 (2004).
6. Terra F., Fakhim G., Bol'shakova I.A., Leroi S., Makido E.Yu., Matkovskii A. and T. Moskovets *Fabrication, investigation, and application of doped indium antimonide microcrystals in radiation resistant sensors // Russian Physics Journal.* – 2003. – Vol.46, №6. – P.601–608.
7. Большакова И.А., Бойко В.М., Брудный В.Н., Каменская И.В., Колин Н.Г., Макидо Е.Ю., Московец Т.А., Меркурисов Д.И. Влияние нейтронного облучения на свойства нитевидных микрокристаллов *n-InSb // Физика и техника полупроводников.* – 2005. – Т.39, №7. – С.814–819.
8. Bolshakova I., Brudnyi V., Voiko V., Kolin N., Kumada M., Leroy C., Merkurisov D. *The radiation hardness of magnetic sensors and devices in extreme conditions of irradiation with high neutron fluxes // Вісник НУ "Львівська політехніка". Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки.* – 2004. – №512. – С.86-92.
9. Патент України №2003032790. Вимірювальний перетворювач магнітного поля. Большакова І.А. Голяка Р.Л.
10. http://www.rijnh.nl/ITPA/Protected_stuff/Minutes_ITER_EG_and_ITPA_TG_Meetings/Minutes_8th_TG_Mtg_final.pdf.